

Özdirencin Gerilme - Yamulma İle İlişkisi

Relationship Between Resistivity and Stress - Strain

AHMET ERCAN, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Kürsüsü Teşvikiye, İstanbul.

ÖZ : Deprem oluşumunu önceden belirlemek (sezinlemek) için yapılan elektrik ölçmeler, deprem öncesi yerde oluşan aşın gerilme - yamulma birikiminin yerin elektrik özelliklerini etkileyeceği varsayımına dayanır. Kayaç için elektrik akım iletimi, birbirleriyle dokunakta olan mineraller aracılığı ya da özellikle gözenekler içindeki sıvılar ve kırıklar ile sürdürülür. Gerek gözenekler ve gerekse kırıklar kayacın gerilme - yamulma'dan en çok etkilenen bölümü olduğundan bu etki bir özdirenç değişimi olarak izlenebilir. Ne var ki, depremi oluşturan yamulma değişiminin küçük olması (10^{-4}) özdirençte, duyarlı ölçüm yapılmadıkça, sezinlenemeyecek oranda (%1) bir başkalaşmaya neden olur. Dolayısıyla depremi önceden sezinleme amacıyla yapılan elektrik ölçmelerden beklenen; yan etkisiz ve %1 den daha duyarlı ölçü alabilmektir.

İncelenmesi gereken diğer konular; derinlik ve çökelti kayaçlarında elektrik iletkenliği etkileyen öğeler, yamulma ile özdirenç değişimini belirleyen deneylik ölçümleri ve bugüne değin bu dalda kazanılan deneyimlerin irdelenmesidir.

ABSTRACT : Many of the geoelectrical measurements being made in connection with earthquake prediction studies are based on the concept that these properties are influenced by stress or strain build up, especially so near the failure point. Electrical properties of rocks are controlled by the fluid in the pores and cracks of the rocks and, since this is the fraction of a rock most influenced by stresses, one should expect electrical measurements to be sensitive measures of changing stresses and strains. The strain changes that one is dealing with in these studies, however, are very small (i.e. in the order of 10^{-4}) and even though the electrical responses can amplify the effect great sensitivity is needed in making the measurements. Because, the estimated change in resistivity is only as much as 1% percent.

Some important aspects to examine are depth of occurrences and factors influencing electrical properties in sedimentary rocks, laboratory experiments to determine strain - resistivity relationship and careful studies of all previous work completed in this field of interest.

GİRİŞ

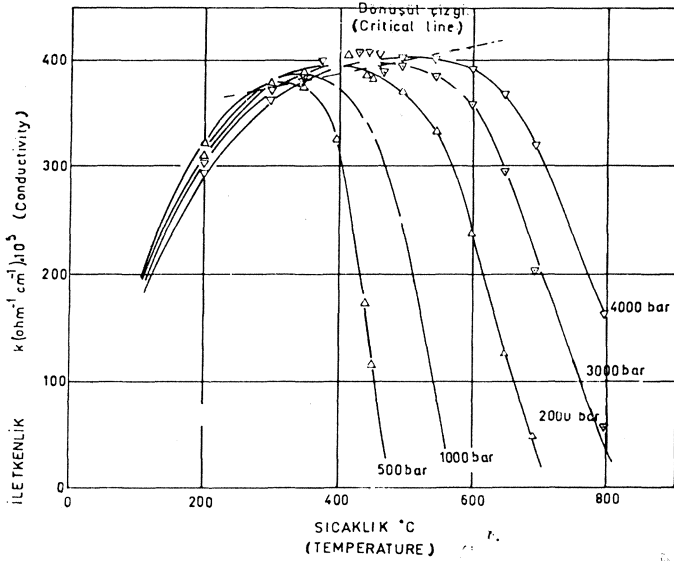
Yapı ve elektrik özellikleri bakımından kayaçlar dört ayrı dalda incelenebilir. (1). Derinlik kayaçları (magmatic), (2). Çökelti kayaçları (sedimentary), (3). Başkalaşım kayaçları (metamorphic), (4) Kırık kuşağı kayaçları.

Konu gereği önemi olan kayaç türü kırık kuşağı kayaçları olmasına karşın, bu tür kayaçlar diğer ilk üç türe göre özellikleri en az çalışılmış kayaçlardır. Bu nedenle, her ne denli aynı olması beklenmesede, ilk üç dala düşen kayaç özellikleri ile benzeşimi olacağı düşüncesiyle yalnız bu türlerdeki kayaç özelliklerine göz atılacaktır. Yer kabuğu içinde yer alan kayaçlarda elektrik akım iletimi, birbirleriyle bağlantılı gözenekler içindeki sıvılar aracılığı ile olur. Tuz yatakları ve kimi mermerler dışında kabuğun hemen her bölgesinde yer alan kayaçlarda böyle içsel çözeltiler vardır ve özdirenç 10^5 Ohm - metre ya da daha azdır (Morrison ve diğerleri, 1977; 1979)

Özellikle yer genişlemesine ya da şişmesine (dilatancy) neden olan tektonik gelişimin özdirençte gözlenen değişimleri oluşturabileceği sanılmaktadır (Scholz ve diğerleri, 1973). Buna temel neden, yamulma etkisiyle genişleme sırasında kayaç gözenekliliği değişmesidir.

Kayaç içinde elektrik akım iletimi, kayaç yapısındaki iletken mineral bağlantılarından çok bağlantılı gözenekler içindeki sıvılardaki iyon taşımacılığı ile oluşuyorsa gözeneklilik değişimi ile özdirenç arasında sıkı bir ilişki beklenir. Deneylik gözlemlerine göre, alçak saran (confining) basınçlarda, kayaç içindeki çatlaklar kapanır ve basıncın birkaç kilobar arttırılmasıyla özdirenç hızla yükselir (Brace ve Orange, 1968). Daha yüksek basınçlarda (hemen hemen kırık oluşturan basıncın yarısı büyüklüğünde basınçlarda) genişleme (dilatancy) başlıyasıya değin özdirenç - basınçla değişim göstermez. Sonuç olarak genişlemeyle gözeneklilik artar ve kırık oluşmadan önce özdirenç büyük ölçüde düşer.

Gerçek özdirenç değerleri iki ögeye dayanır. Bunlar, gözenek suyunun özdirenci ve kayaç içindeki bağlantılı gözeneklerin ve kırık aralıklarının oylum (hacim) ve biçimleridir. Sığ yer kabuğu basıncı ve sıcaklığı altında özdirenç değeri, içerilen sıvının tuzluluğuna ve sıcaklığına bağlıdır. Özdirencin tuzluluğa bağlılığı yaklaşık olarak doğrusal olup, tuzlulukla özdirenç kimileyin üç kat oranında değişebilir. Sıcaklık etkisi yaklaşık olarak ekspanansiyel olmasına karşın etkinleştirme erkesi (energy) düşük olduğundan, donma noktasından dönüşül (critical) noktaya dek sıcaklık etkisiyle özdirenç ancak bir kat oranda değişebilir. İletkenlikte (ya da özdirençte) ani değişim dönüşül noktadan sonra başlar. Bu noktadan sonra (-37°C) erimiş tuzların ayrışma (disassociate) yetenekleri değiştiğinden iletkenlik hızla düşer özdirenç hızla yükselir). Basınç ve tuzluluk arttıkça iletkenliğin düşme noktası (dönüşül nokta) yüksek sıcaklıklara doğru kayar (Şekil 1).



Şekil 1 : 0.00501 m NH_4Br çözeltisinin öz iletkenliğinin 500 ve 4000 bars arası basınçlarda sıcaklıkla eşbasınç değişimi (Quist ve Marshall'dan).

Figure 1 : Isobaric variation of specific conductances of 0.00501 m NH_4Br solutions with temperature at pressure form 500 to 4000 bars (Quist and Marchall).

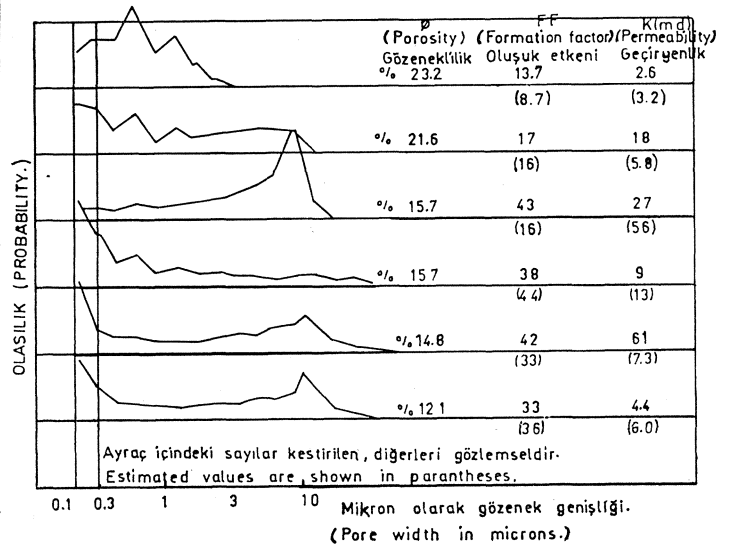
Kayaç içi gözeneklerinin oldukça küçük olması durumunda (0.01 mikrondan küçük) iletkenliği arttıran diğer bir öge; yüzey iletkenliği, önem kazanır. Bu ek iletkenlik, mineraller üzerindeki net bir yük nedeniyle, aşırı orandaki iyonların elektrostatik olarak mineral yüzeylerince çekilmesidir. Bu net yük ile oluşan potansiyelle zeta potansiyeli denir. Oda sıcaklığında kuvars mineralleri için bu değer -30 ile -70 mV arasında değişir. Kil oldukça yüksek yüzey iletkenliği içerdiğinden ve hava ile dokunmakta olan kayaçlar kil içerdiklerinden diğer kayaçlara oranla genellikle çok daha iletkenlerdir.

Kayaç gözeneklerinin biçimlerinin elektrik iletkenlik üzerindeki etkileri ayrıntıları ile bilinen bir konu olmamasına karşın, yamulma etkisinin iletkenlik üzerine etkisinin denetlenmesinde konunun önemi oldukça büyüktür. Bunun yanı sıra, toplam hacim içinde aldıkları yer küçük olsa bile, oldukça dar kırıkların toplam iletkenlik üzerindeki etkisi büyüktür. Dar kırıklar en kolay biçim değişimine uğradıklarından, kayaç iletkenliğinin yamulmaya oldukça duyarlı olması beklenir.

Ancak, gözenekleri ve kırıkları göz önüne alarak kayaçın elektrik özelliklerinin belirlenebilmesi, kırık ve gözenek özelliklerinin ayrıntıları ile bilinmesi gerekir ki bu çoğunlukla başvurulmayan bir yoldur. Ne varki, çökelti kayaçlarının bu yolla elektrik özelliklerini belirleyen, Archie yasası diye anılan bir bağıntı vardır. Bu yasaya göre bir çökelti kayacının özdirenci, kayaç gözeneklerinde yer alan sıvının özdirenci ile doğru, kayaç gözenekliliğinin n inci kuvveti ile ters orantılıdır:

$$\rho_k = \rho_s \cdot \Phi^{-n} \quad (\text{Archie, 1942})$$

ρ_k : Kayaçın toplu özdirenci, ρ_s : kayaç gözenekleri içindeki sıvının özdirenci, Φ : kayaçın toplam hacmine göre gözeneklilik oranı (yüzdesi), n : deneysel olarak saptanan bir katsayı olup genellikle 2 dir. Yasa, kumtaşları üzerine yapılan çalışmaya dayanıyor olsa da diğer çökelti kayaçları için de benzer biçimde geçerlidir. Gözenekliliğin üzerindeki üstün (n) değeri, tümüyle kayacı yapan taneciklerin biçimine bağlıdır. Söz gelimi, yuvarlak tanecikler için $n = 1.5$ iken, taneciğin kenarları düzgülneştikçe bu değer büyür. Şekil 2 te birkaç çökelti kayacı için gözenek genişliği dağılımı ve akma özellikleri sergilenmektedir.



Şekil 2 : Kimi çökelti kayaçlarının gözenek değiştirgenleri ve akma özellikleri (Madden, 1976'dan).

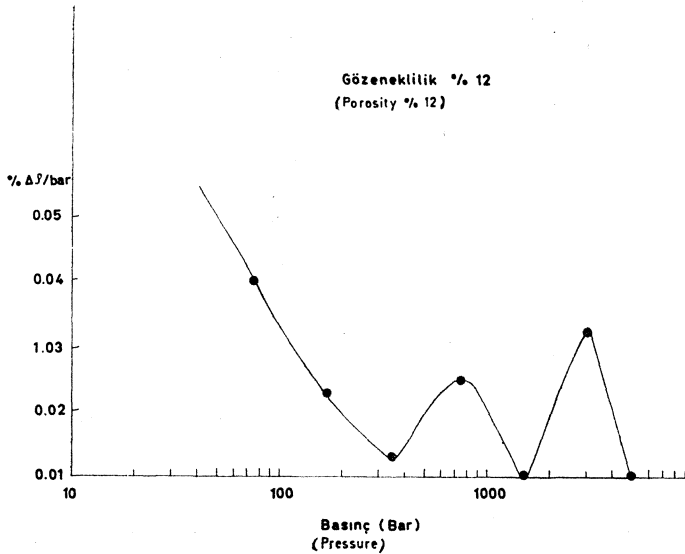
Figure 2 : Pore parameters and flow properties of some sedimentary rocks (After Madden, 1976).

Derinlik kayaçları için Archie yasası aynı güzellikte sonuç vermezse, alçak basınçlarda derinlik kayaçları ya-

sa ile saptanandan daha iletkenidir. Bu, özellikle oldukça büyük gerilmeler altında kalmış kayalar için geçerlidir. Böyle kayalarda kırıklar, oransal olarak çok olmasının yanısıra uzunluk dağılımı bakımından da çeşitlidir. Bu durum geometrik ortalama kuramını karmaşıktırır. (Madden, 1976) ve birbirine bağlantılı küçük ölçekli kırıklar daha geniş kırıklar doğrultusunda sıralanmaya eğilim gösteriyorsa iletkenliğinde artmasına neden olurlar.

Çatlaklarla iletkenlik arasındaki ilişkiyi saptamak amacıyla Kuzey Doğu Amerika'da bir granit taşı işletme ocağı içinde ölçüler yapılmıştır (Madden, 1976). Bu çalışmada, patlatmalar nedeniyle yüzeye yakın yerlerde granit oldukça çatlak olmasına karşın, elektrik özelliklerin aslında çok küçük kırıklarca denetildiği ortaya çıkmıştır. Patlatma alanından uzak yerde yapılan sığ ölçümlerde en yüksek, ocak tabanında yüksek ve patlatma yerinde kayacık örneği alınarak yapılan ölçmelerde ise en düşük öz direnç değerleriyle karşılaşılmıştır. Bu sonuçlar patlatmalarla gerilim boşaldığını ve çatlakların önemsiz olduğunu göstermiştir.

Gerilme tepkili öz direnç değişiminin karşılaşıldığı iki durum vardır. Bunlardan biri gerilme değişimlerinin çatlak ve kırıkları açıp kapadığı yüzeye yakın birkaç kilometre derinlikler, diğeri ise genişlemenin yer alabileceği derinlerdeki yüksek gerilme düzeyleridir. 10 ile 1000 Ohm-m arasındaki öz direnç içeren kayalar üzerinde yapılan deneyler, kayacık içindeki çatlak, eklem (joint) gözenekliliğinin, toplam gözenekliliğin yalnız küçük bir parçasını oluşturduğu ve bu nedenle çatlak değişimlerinin öz direnç değişimini oluşturacak derecede önemli olmadığını göstermiştir. (Brace, 1971) (Şekil 3).



Şekil 3 : Öz direnç - Gerilme duyarlılığı (% $\Delta\rho$ /bar). Yönbagimsız gerilim altında büyük gözenekli çökelti kayaları (Brace ve diğ., 1968 ve Brace, 1974 ten).

Figure 3 : Resistivity - stress sensitivity (% $\Delta\rho$ /bar). High porosity sedimentary rocks under isotropic pressure.

ÖZDİRENÇ, GERİLME - YAMULMA İLİŞKİSİ

Gerilmenin kayaların öz direncine etkisi; var olan yarık ve gözenekleri açması ya da kapaması, ya da yeni yeni yarıklar oluşturması sonucu doğar. Sıcaklık, suyun dönüşülme sıcaklık noktasının üzerinde olduğu zaman, gözenek içindeki basınç değişimi gözenek sıvısının iletkenliğini de de*ğıştirebilir. Gözenek ve yarık değıştirgenleri (parameters) üzerindeki gerilme etkisi deneylik çalışmaları ile ortaya konabilir. Özellikle çökelti kayaları üzerinde makaslama kuvvetlerinin etkisinin açıklanması önemsende, çalışmaların çoğu hidrostatik basınç altında kayaların özelliklerinin incelenmesine dayanmaktadır. Şöyleki, hidrostatik basınç iletim yollarını kapatarak öz direncin yükselmesine ne*den olur. Ancak makaslama kuvvetlerinin etkisi daha karmaşıktır. Küçük makaslama kuvveti altında, genişleme (dilatancy) başlangıcına değıin öz dirençteki değıişim pek küçüktür. Ne varki bu aşamadan sonra öz dirençte büyük bir değıişim gözlenir.

Çatlak ve gözenek kapanmalarının çoğunlukla yalıtılmış (isolated) çatlak davranışları sonucu oluştuğu varsayılır. Yalıtılmış çatlak (yarık)lar ise çatlak ve gözenek durumu oranına bağlıdır. Düşük oranı simgeleyen çok dar çatlakların, orta büyüklükteki basınçlarda kapanması beklenir. Gerçekte, gözenek ve çatlak yüzeyleri dalgalı olduklarından, orta büyüklükteki basınçlarda yüzey uyumsuzlukları nedeniyle gözenekler tam, tamına kapanmaz. Ancak, iletkenliği çoğunlukla çatlak ve gözeneklerle sağlanan kayaların öz direnci orta basınçlarda çok büyük değıişim gösterirler. Ki bu tür davranışlar özellikle düşük gözenekli derinlik ve başkalaşım kayalarında örnek gösterilecek biçimde izlenir. Bu tür kayaların gözenekleri düşük olduğundan, öz direnç değıişimiyle eşzattıanlı olarak oluşan hacim değıişimide küçüktür. Böyle kayalarda öz direnç değıişimi yamulma değıişimindeki artışın bir sonucudur. (Çizelge 1,2) de sözü edilen kayalara özgü örnek değerleri sergilemektedir. Çizelge I den izlendiği gibi, gözeneklilik azaldıkça, basınç azaldıkça öz direncin yamulmaya olan duyarlılığı artar.

Bar Olarak Basınç Pressure (Bar)	Stone Dağı Granite		Cape Cod Granite		
	Westerly Granite	Granite	Casco Granite	Rutland Quartzite	Granodiorite
75	880	760	400	1350	1630
175	680	680	530	910	1500
375	460	590	640	600	570
750	300	560	530	400	360
1500	250	420	310	250	190
3000	160	350	210		110
Gözeneklilik Porosity	0.9%	3.6%	0.7%	0.5%	0.4%

Çizelge 1 : Öz direnç - yamulma yükseltme oranı { $\Delta\rho/\rho/\Delta$ yamulma}. Yönbagimsız gerilim altında düşük gözenekli kayalar (Brace, 1971 den).

Table 1 : Resistivity - Strain Amplification Factor $\Delta\rho/\rho$ (—) Low Porosity Rocks Under Isotropic Stress (Brace, 1971).

Bar Olarak Basınç Pressure (Bar)	Siyah şist Black schist									
	Westerly Graniti Granite	Stone Dağı Graniti Granite	Casco Graniti Granite	Rutland Kvartziti Quartzite	Chittenden Dolomiti Dolomite	Blair Dolomiti Dolomite	Grenville Mermeri Marble	Pottsville Kumtaşı Sandstone	Çökelmeye Koşut Parallel to Sedimentation	Çökelmeye Diğ Normal to Sedimentation
75	.607	.702	.732	.777	.419	1.494	.811	.575	.211	.262
175	.291	.434	.462	.415	.225	.645	.425	.378	.154	.118
375	.143	.253	.264	.197	.152	.293	.156	.277	.175	.080
750	.082	.153	.142	.115	.071	.103	.114	.142	.105	.062
1500	.058	.097	.071	.063	.041	.049	.078	.076	.060	.035
3000	.034	.067	.042	.035	.030	.027	.048	.028	.033	.026
5000	.026	.052	.029	.026	.029	.018	.050	.031	.033	.022
Gözeneklik Porosity	0.9%	0.6%	0.7%	0.5%	1%	0.2%	0.4%	2.9%	1.2%	

Çizelge 2 : Az gözenekli kayaçların tek yönlü basınç altında özdirenç - basınç duyarlılığı (%Ap/kar) (Madden, 1976'dan).

Table 2 : Resistivity - stress sensitivity (%Ap/^{bar})^{L o w} porosity rocks under uniaxial stress (Madden, 1976).

Çökelti kayaçları için yamulma büyütme çarpanı Archie yasasını kullanarak saptanabilir.

$$A_p = \frac{A_p}{A_u} \cdot \frac{p}{p_0}$$

Yamulma Büyütme çarp. $\frac{A_p}{A_u} = \frac{p}{p_0}$

- A_p : Özdirenç değişimi
 p : özdirenç
 A_u : Yamulma değişimi
 $\frac{A_p}{A_u}$: Gözeneklik yüzdesi

Bağıntıdan ve dökümdeki örneklerden izlendiği gibi gözenekli kayaların büyütme çarpanı düşük gözeneklilikten çok daha küçüktür.

Gözenekli kayaların katılığı göreceli olarak daha az olsada daha az özdirenç gerilme etkisi gösterirler. (2) bapırtısı kullanılarak, kuru kayaçların gerilme duyarlılıkları ölçülebilir. Bu tür ölçümlerle %15-25 gözenekli kumtaşları için, büyütme faktörü bar başına %0.01 Ap/bar dır. Statik ölçümlerde bu değer daha büyü. Çizelge 3, hidrostatik basınç altında yapılan özdirenç ölçümlerinin sonuçlarını göstermektedir.

Eğer zaman aralığı uzayacak olursa, kimyasal etkinliğin olaya katkısı önem kazanır. Şöyleki, bu olayın katkısıyla çatlaklaşma ve birleşme yaygınlaşır ve çimentolaşma işleminin başlamasıyla da gözeneklilik düşer.

Deprem çalışmalarında daha önemli nokta, kayaçların kırılma noktalarına yaklaşıldığı zaman özdirenç ile gerilme arasındaki ilişkidir. Kayaç kırılmadan önce, makaslama kuvvetleri etkisiyle hacimsal olarak genişler. Bu olaya genişleme (dilatancy) denir. Hacimdeki bu tür genişleme, önceden var olan çatlakların aralanması ya da yeni, yeni çatlakların oluşması biçiminde gelişir. Bu nedenle, sıcaklık ve basınç düzeyinin gözenek suyu iletkenliğini önemli ölçüde etkileyecek büyüklükte olmaması durumunda, gerilme artışıyla özdirençte bir düşme beklenmelidir.

Her ne denli deneylikte kayaçlara uygulanan basınç düzeyi, çok yüksek ve bu nedenle deprem olayını yapay olarak simgeleyecek. Özellikle olmasada, bu tür deneylere basınçla özdirenç değişimini aydınlatmak için başvuru. Şekil 4 bu amaçla, Westerly granit kayacı üzerine yapıla dört ayrı deneyi göstermektedir.

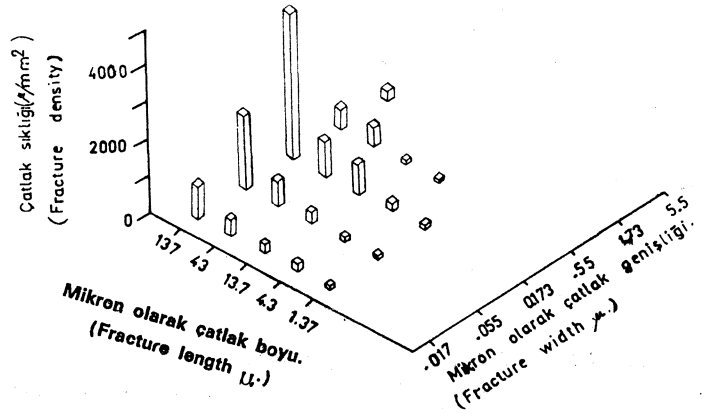
Basınç (Bar) Pressure	Bedford Kireçtaşı Limestone	Karışık Kumtaşı Mixed Sandstone
75	.040	
175	.022	
250		.030
375	.013	
750	.024	.005
1500	.011	.005
3000	.022	.009
5000	.006	.017
Gözeneklik Porosity	12%	24%

Çizelge 3 : Tek eksenli basınç altındaki yüksek gözenekli çökelti kayaçlarında özdirenç - basınç duyarlılığı (%Ap/bar). (Brace ve Orange, 1968; Brace, 1971'den).

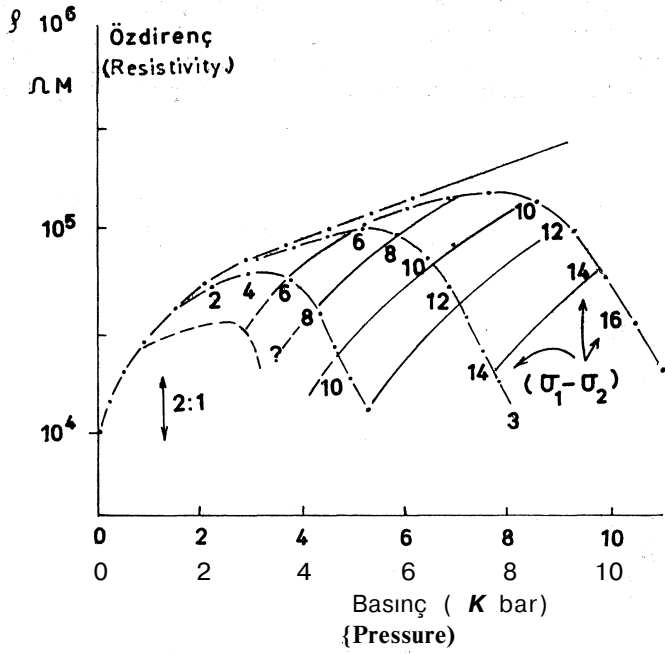
Table 3 : Resistivity - stress sensitivity (%Ap/bar). High porosity sedimentary rocks under isotropic stress (Brace and Orange, 1968; Brace, 1971);

Şekil 4 üzerindeki eğriler granitin özdirenç - basınç değişimini göstermektedir. Ayrıca her dört deneyde karşılaşılan eşit makaslama (shear) gerilim noktaları, eğrilerle birleştirilmiştir. Bu şekilde özdirençin özellikle alçak basınç altında, basınç değişime çok duyarlı olduğunu göstermektedir.

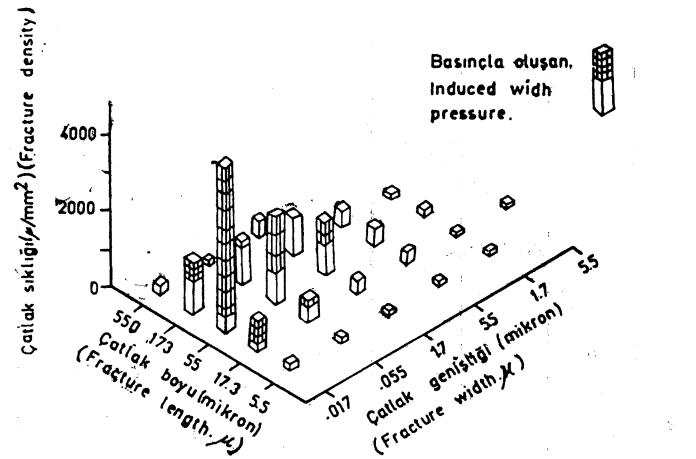
dir. İzlenen en büyük duyarlılık bar başına %0.05 tir ki, bu aynı basınçta yönbağımsız gerilmeye olan duyarlılıktan daha büyüktür. Duyarlılığın en büyük olduğu yer, yönbağımsız duyarlılığın çok büyük olduğu, alçak saran (confining) basınç bölümüdür. Yamulma büyümesini tek bir sayı ile tanımlamak zordur. Genişleme (dilatancy) aşamasında çatlaklarla oluşan hacim genişlemesi kayaç içindeki mineral sıkışmaları ile dengelendiğinden toplam hacim genişlemesi çok küçüktür (Brace ve diğerleri, 1966). Çatlak oluşumu, oldukça yönbağımlı olduğundan, ayrı ayrı yönlerde ayrı ayrı yamulma ile karşılaştırılır. Westerly granit üzerine edinilen yamulma ve özdirenç bilgileri karşılaştırılırsa, bu kayaç için büyütme (amplification) çarpanı 250 - 500 arasında olduğu ortaya çıkar. Eğer makaslama (shear) gerilimi ile oluşan hacim içindeki net çatlak oranı değişiminin yönbağımsız (isotropik) gerilme ile oluşana göre daha az olduğu düşünülürse, bu sonucun ne ölçüde önemli olduğu anlaşılır. Bu durumda, duyarlılık artışı çatlak sayısındaki artışa bağlanmalıdır.



Şekil 5 : Basınç altında tutulmamış Westerly granitinde çatlak genişli ve boy dağılımı (Hadley, 1975*ten)
Figure 5 : Crack width and length distributions of Westerly Granite unstressed (Hadley, 1975).



Şekil 4 : Yön bağımsız ve üç yönlü yükleme ile Westerly granitinde oluşan özdirenç değişimi (Brace et. al., 1966 ve 1968).
Figure 4 : Resistivity of Westerly Granite for Isotropic and Triaxial Loading (form Brace et al., 1965, 1968).



(Hadley, 1975)
I (Hadley, 1975)

Şekil 6 : % 65 kırılmaya değin basınç altında tutulan Westerly granitte, çatlak genişliği ve boyu dağılımı (Hadley, 1975).
Figure 6 : Crack width and length distributions of Westerly Granite stressed to 65 % of failure (Hadley, 1975).

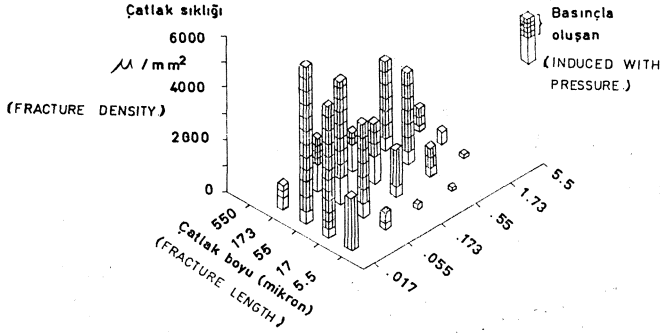
Şekil 5, kuvvet altında çatlak sayısının nasıl arttığını göstermektedir. Çatlak boyu dağılımının genişletilmişleriyle birlikte elektrik etki daha da artar. Bu durum, Şekil 5, 6 ve 7 deki dağılımlardan izlenebilir. Kırılmaya dek sıkıştırılan kayaçta çatlak yoğunluğu gerçekte beklenen kuramsal sınıra yakındır (eğer çatlaklar yönbağımsız olarak dağılmış larsa).

Ancak çökelti kayaçları üzerine kazanılan deneyimler sonuca götürücü nitelikte kesin değildir. Kumtaşı üzerine

elde edilen basınç - özdirenç ilişkisi Şekil 8 ve 9 da gösterilmektedir. Ne varki kumtaşı için elde edilen eğri magmatik kayaç için elde edilen (önceki) eğriye benzemektedir ve öncesinde olduğu gibi, genişleme bölgesinde özdirenç değişimlerinin, gerilmeye olan duyarlılığı bar başına %0.05 oranındadır. Yamulma büyütme çarpanı ise oldukça düşük olup, 100 - 200 çevresindedir.

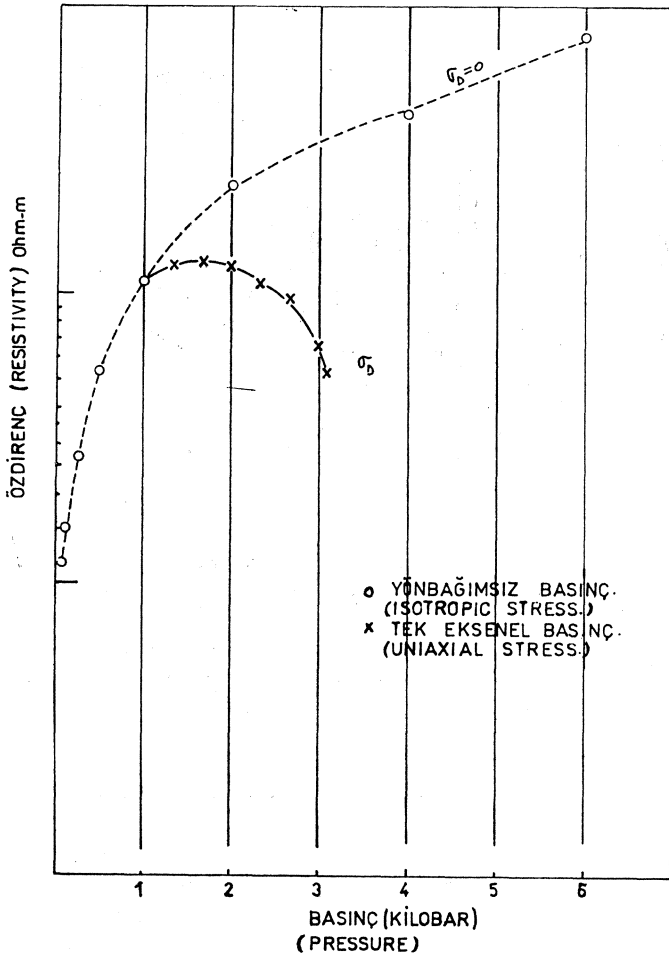
Bu deneylerden elde edilen sonuç kumtaşitaneleri içindeki çatlakların elektrik özellikleri tanımlamada oldukça etkin olduğudur.

Çok gözenekli çökelti kayaçlarında, tanecikler arası gözenek etkisi, çatlakların oluşturacağı katkıyı örtecek



Şekil 7 : % 100 kırılmaya değin basınç altında tutulan Westerly granitte, çatlak genişliği ve boyu dağılımı (Hadley, 1975).

Figure 7 : Crack width and length distributions of Westerly Granite stressed to 100 % of failure (Hadley, 1975).

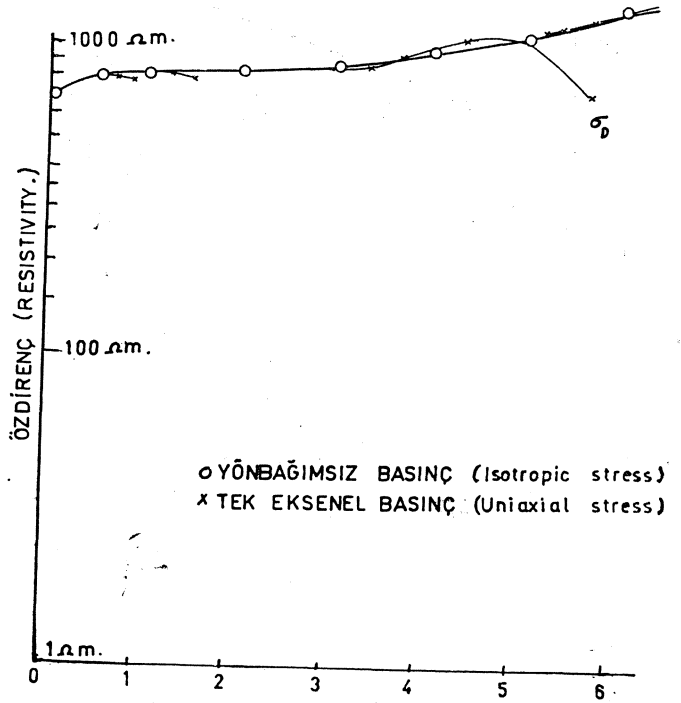


Şekil 8 : Gözenekliliği % 3 olan Pottsville kumtaşında öz direnç - gerilme ilişkisi (Brace ve Orange, 1968'den).

Figure 8 : Resistivity - Stress relationship of pottsville sandstone (porosity: 3 %) (from Brace and Orange, 1968).

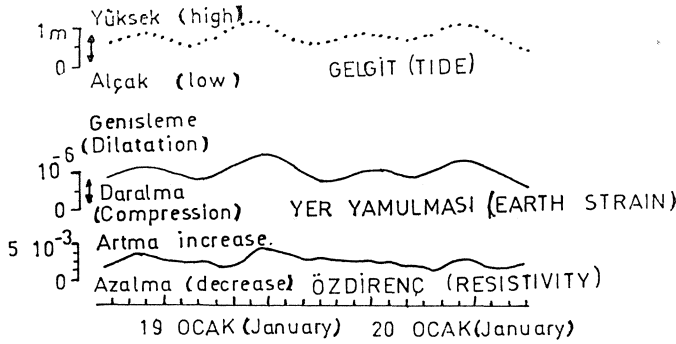
oranda baskın gelebilir. Örnek olarak Şekil 9, oldukça gözenekli kumtaşı için elde edilen sonucu göstermektedir ki, bu sonuç öncekilerden oldukça ayrıdır. Belki hemen kırılma noktasının dışında makaslama kuvvetlerinin öz direnç üzerine etkisi pek küçüktür. Hidrostatik basınç yüklemesi ise 2 kbar çevresinde eğride bir dönme oluşturması açısından ilginçtir. Eğer bu deneyler, kırık kuşağı kayaçlarını simgeler nitelikte ise, elektrik ölçmelerden pek çok şey beklenmemeli. Diğer yandan, gözenekli kumtaşlarda ve dinamik ölçmelerde statik etkilerin daima olduğundan küçük ölçüldüğünde unutulmamalıdır. Ne olursa olsun, bu noktada özellikle fay kuşağı kayaçları üzerine henüz yeterli bilgi yığılımı olmadığı ortaya çıkıyor ve bu nedenle bu konuda kesin bir sonuca varmak için çeşitli kayaçlar üzerine deney çalışmalarını sürdürmek gerekir.

Yamazaki (1967) ün başlattığı gözenekli - doymun kayalar üzerine deneyler, doymun kayaların büyültme faktörünün çok daha fazla olduğunu göstermiştir. Sözgelimi, göreceli doymun tufün büyültme oranı 2000 ile 10000 arasında değişir. Ancak bu tür bir büyültmenin kanıtları dolaylı olup, inandırıcı nitelikte değildir. Şöyle ki, arazi çalışmalarından edinilen bu bilgiler üzerinde, gel-git etkisiyle oluşan yamulmanın yarattığı günlük öz direnç değişimininde mutlaka katkısı vardır (Şekil 10). Ne varki, bilgiler gel - git evresinin günlük olaya göre koymuş olabileceği bir



Şekil 9 : Gözenekliliği % 24 olan, karışık içerikli kumtaşında öz direnç - gerilme ilişkisi (Brace, 1974'ten), Çemberler yönbağımsız basıncı, çarpılar tek yönlü basıncı simgelemektedirler.

Figure 9 : Resistivity - Stress relationship of mixed company sandstone (porosity 24 %). Circles and crosses indicate isotropic and uniaxial stresses respectively (Brace, 1974).



Şekil 10 : Görünür öz direnç, yer yamulması ve deniz düzeyinin eş zamanlı gözlemleri (Yamazaki, 1967).
Figure 10 : Simultaneous records of the apparent resistivity, the earth strain and the sea level (Yamazaki, 1967).

zamanda toplandığından gel-git (tidal) etkisini günlük etkilerden süzme olanağı yoktur. Yine aynı tüfler üzerine deneylikte sürdürülen çalışmalar bu kez benzer sonuçlar vermemiş ve alçak basınçta büyültmenin en çok 400 olabileceğini göstermiştir. Doğunluğa erişmiş diğer çökelti kayalarında benzer bir büyültme oranı artışı izlenmemiştir. Doğunluk, yüzeye yakın sığ derinliklerde olduğundan, konunun derin elektrik ölçümlerde öneminin çok olduğu söylenemez.

Özet olarak, elektrik özelliklerin gerilme ve yamulmaya olan duyarlılığı büyük oranda ortam içinde oluşan çatlak ve kırıklara bağlıdır. Çatlaklı yapı en çok derinlik ve yoğunluk (metamorphie) kayalara özgü olduğundan bu tür kayalar öz direnç değişimine en duyarlı, gözenekli çökelti kayaları ise en az duyarlıdır. Her ne ölçüde artan basınçla duyarlılık düşerse, genişleme başlamasıyla olayın tersi izlenir (basınç arttıkça duyarlılık artar.) Kırık kuşağı kayaların davranışı pek bilinmemektedir. Kuşkusuz faylanmaya uğramış bölgelerde çatlak yoğunluğunun yüksek olması beklenir. Ancak bu çatlakların elektrik özellikleri denetmesi ortam içinde yer alan kayaların gözenekliliğine bağlıdır. Olağan çökelti kayaları için, tanecikler üzerinden çatlak iletimi gözenekliliğinin % 3 ile 5 olması durumunda önem kazanır. Belki, kırık kuşağı kayaları yüksek çatlak yoğunluğu ve gözeneklilik içerebilir, ancak elektrik özelliği denetimi salt çatlaklarca sağlanıyor olabilir.

Çizelge 4 deki bilgiler genişleme başlamadan önce gözeneklilik ve derinlik arttıkça büyültme çarpanının (factor) (A_p/p)/ A_u küçüldüğünü göstermektedir. Ancak genişlemenin olduğu zaman (ya da yer) içinde büyültme çarpanının değeri göreceli olarak artsada, gözeneklilik ve derinlik artışıyla büyültme çarpanının değeri düşmektedir. Durum gerilme duyarlılığı ($\%A_p/\text{bar}$) içinde benzerdir. Gözeneklilik ve derinlik arttıkça gerilme duyarlılığı düşmektedir. Ölçülerden anlaşıldığına göre, deneylik çalışmasıyla elde edilen gerilme etkili - değişimler, gerçeğe olduğundan daha küçüktür.

Sıcaklığın 500°C aştığı derinliklerde gözenek basıncı değişimiyle gözenek sıvısı iletkenliğinde büyük değişimler izlenir. Bu etkiler daha çok gerçek gözenek basıncı ve gö-

zenek sıvısı tuzluluğuna bağlıdır. Ancak, kökeni litostatik olmadan öte hidrostatik olan gözenek basıncı ve akıcı çözeltiler için bu değişimler bar başına en çok % 0.2 çevresindedir (Madden, 1976).

ÖZDİRENÇ - YAMULMA GÖZLEMLERİNİN ANA İLKELERİ

Deprem olayının çalışılmasında kullanılan öz direnç ölçümlerinin önemi, depremi oluşturan gerilmenin ortamın öz direncinde, sezinlenebilecek ölçüde değişme oluşturmamasında yatar. Diğer önemli sınırlama; doğal etkilerin zaman içinde duraylılığını koruması ve bu değişimleri örtcek ya da kırıştırarak düzeyde dengesiz olmamasıdır.

Depremle oluşan gerilme düşüşü ve yamulmanın büyük değeri halen tartışılan bir konu olsada, gerilme düşüşü 1 ile 100 bar arasında ve yamulmanın doruk değeri ise 100 u çevresindedir. Rikitake (1975) büyüklükleri 6.1 den 8.4 e değin değişen 26 depremin jeodezik verilerini inceleyerek ortalama yamulmayı 50_{μ} çevresinde ve yalnız 2 deprem için 100_{μ} 'ı aşkın ve birisi için ise 170_{μ} çevresinde olduğunu bulmuştur. Bu bulgular kabada olsa, depremle beklenen öz direnç değişimi üzerine ortalama bilgi vermesi açısından aydınlatıcıdır. Eğer yamulma hızının yılda 0.5×10^{-6} olduğu varsayılırsa ve kırılmadan önce değişimin zaman ve yer içinde tekdüze olduğu düşünülürse, yıl başına beklenen öz direnç değişimi % 0.005 ile % 0.01 çevresinde olacaktır (Madden, 1980; Fitterman, 1976). Hiç kuşkusuz ortamdaki yapısal değişikliklerin (inhomogeneities) düzensiz gerilme dağılımına neden olması beklenmeli ve kırılma aşamasından önce yamulma etkisinde de bir hız değişiminin olabileceği gözden kaçırılmamalıdır. Bu gerçeklere dayanarak depremden önce beklenen öz direnç değişiminin iyimser koşullarda bile % 1'i aşmayacağı düşünülür. Bu durumda deprem kestirimi için yapılan öz direnç ölçümlerinin duyarlılığı % 1 ise; bu ölçümler yetersiz, % 0.1 çevresinde ise bir ölçüde benimsenebilir. % 0.01 ise bu çalışmalardan beklenen en olumlu duyarlılık düzeyidir.

Bu durumda durup düşünmek gerekir; gerçekten öz direnç ölçümleri deprem çalışmalarında yeterli (kullanılabilir) bir araç mıdır? yoksa gerilimle tetiklenen etkiler yan etkenlerle silinip atılacak düzeyde güçsüz olabileceğinden yöntem geçersiz (ya da yersiz) midir? Madden (1974) e göre sorun duyarlı ölçü alabilecek düzeyde bir elektronik algılayıcı düzeneğini geliştirmede yatmaktadır. Çünkü öz direnci etkileyen sıcaklık, gözenek sıvısı tuzluluğu ve doğunluk derecesi gibi diğer etmenlere bakılacak olursa; kayaların yüksek ısı yeteneği ve küçük sıcaklık iletkenliği içermesinden dolayı, yer içinde sıcaklığın çabuk değişmesi beklenemez. Günlük sıcaklık değişimlerinin etki derinliği bir kaç santimetre ve yıllık sıcaklık etkisi ise yalnız bir kaç metredir. Uzun süreli değişimlerin etki derinliği daha büyük olsada süreç içinde değişimleri çok azdır. Bu durumda büyük ölçekli algılamaların sıcaklıktan pek az etkilenmesi beklenir. Sıcaklıktan gelen günlük değişimin %0.01 i geçmemesi istenir. Ancak bir kaç kilometrelik kıvılcık (electrode) aralamaları için bu değer gözden uzak tutulacak değin küçüktür. Şekil 11 ve 12 de günlük ve yıllık sıcaklık değişiminin öz direnç değişimi üzerine etkisi olup olmadığını gösteren, San Andreas fayının Melendy çiftliğinde alınan algıları sergilenmektedir.

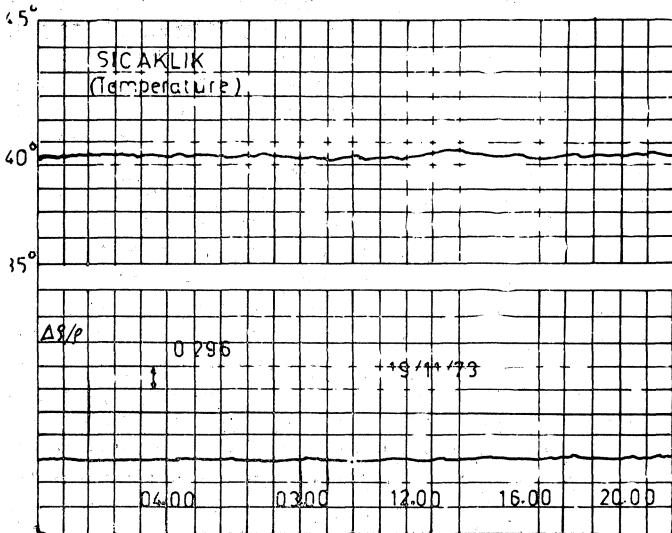
% Gözeneklik Porosity %		1	3	10	30	
Derinlik, km Depth	0	500	100	20	7	
	1	400	100	20	7	şişmenin olmadığı yamulma bölgesi strain without swelling
	3	300	80	20	7	
$\Delta\rho/\rho$	10	200	60	20		
$\Delta\mu$	0	750	200	30	10	
	1	500	200	30	8	
	3	400	150	25	7	şişmenin olduğu yamulma bölgesi strain with swelling
	10	300	100	20		

% Δ /bar Basınç Duyarlılığı

% Gözeneklik Porosity %		1	3	10	30	
Derinlik, km Depth	0	.4	.3	.04	.02	
	1	.2	.15	.04	.02	şişmenin olmadığı yamulma bölgesi strain without swelling
	3	.07	.10	.03	.02	
	10	.03	.03	.02		
	0	.5	.4	.1	.03	şişmenin olduğu yamulma bölgesi strain with swelling
	1	.3	.2	.1	.03	
	3	.1	.10	.05	.03	
	10	.05	.05	.03		

Çizelge 4 : Kestirilmiş öz direnç : gerilme - yamulma ilişkisi. $\frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta\mu}$ büyütme çarpanı.

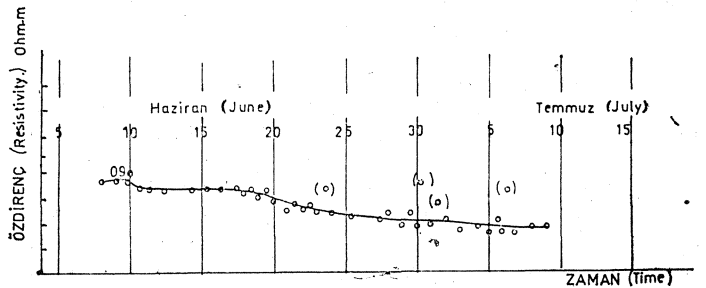
Table 4 : Estimated resistivity : Stress-strain relationships. Amplification factor $\frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta\mu}$.



Şekil 11 : Melendy çiftliğinde 100 metre açılımlı Schlumberger diziliminde akım ve gerilim uçlarını aynı

yerde tutarak ölçülen öz direnç değişimi (Madden, 1976).

Figure 11 : Resistivity variation recording from Melendy Kanch 100 meter Schlumberger array using fixed current and fixed array (Madden, 1976).



Şekil 12 : 1973 yılının Haziran - Temmuz aylarında Melendy çiftliğinde gözlenen öz direnç değişimi. Sıcaklık ölçümü yapılmamıştır (Madden, 1976'dan).

Figure 12 : Melendy ranch resistivity variations. June - July 1973, No. temperature readings made (Madden, 1976).

Tuzluluk etkisine gelince; yeraltında ne ölçüde tuzluluk değişimi oluştuğunu belirleyen hidrolojik bilgilere gerek duyulur. Ancak bu değişimlerin süreç içinde bir gürültü kaynağı olabileceği sanılmamaktadır.

Yeraltı su düzeyindeki değişim, belki, bunlardan en önemlisi olan ve zaman içinde izlenmesi ve öz direnç değerleriyle karşılaştırılması gereken etmen olabilir.

Bu tür yan etkilerin önemsiz ölçüde olması, eğer ölçüm duyarlılığı % 0.01 çevresinde tutulacak olur ve inceleme derinliği bir kaç kilometreyi bulacak düzeyde tutulursa, öz direnç değişimleri ile gerilim dengesindeki değişimi izlenebilir. Ancak, geniş bir alan içinde bu denli duyarlı ölçü olmanın kimi güçlükleri olduğu yadsınamaz bir gerçektir.

SONUÇLAR

Yukarıda değinilen deneylik sonuçlarına dayanarak, özellikle arazi ölçüleri için yer seçiminde göz önünde bulundurulması gereken konular şunlardır:

1. Gözenekliklerini çatlak ve eklemlerle kazanmış derinlik başkalaşım kayaçların öz direnci, gözenekliklerini çoğunlukla taneler arası boşluklardan kazanan çökel kayaçlara göre yer gerilme - yamulmasından daha çok etkilenir. Bu nedenle ölçüm bu derinlik ya da bakışık kayaç içeren yapılar üzerinde toplanmalıdır.

2. Dar kırıklar ya da çatlaklar düşük basınçlarda en kolay kapandıklarından, böyle kayaçların öz direnci gerilme - yamulmaya daha duyarlıdır.

3. Çatlak boyu uzun olan kayaçlarda öz direncin gerilme - yamulmaya duyarlılığı artar.

4. Öz direnç gerilme - yamulma duyarlılığı büyük ölçüde çatlak sayısı artışına bağlıdır.

5. Gözeneklik arttıkça öz direncin gerilme - yamulma duyarlılığı azalır.

6. Sığ derinliklerde öz direnç çatlak ve kırıkların açılıp kapanması ile derinlerde ise yüksek basınç altında genişleme (dilatancy) ile oluşur. Derinlik arttıkça öz direncin gerilme - yamulma duyarlılığı küçülür.

7. Genişleme; kayacın kırılmadan önce makaslama kuvvetleri etkisi ile esnemenin çatlıyarak şişmesidir. Genişleme ile çatlaklar açılır ya da yenileri oluşur. Genişleme kırılmayı oluşturan basıncın yaklaşık % 50 si düzeyinde oluşur. Gerilme sırasında oluşan çatlaklar öz direncin düşmesine neden olur. Genişleme sırasında çatlaklarla oluşan hacim genişlemesi kayaç içindeki mineral sıkışmaları ile dengelendiğinden toplam oylum (hacim) genişlemesi çok küçüktür.

8. Genişleme başlamadan önce gözeneklik ve derinlik arttıkça öz direncin gerilme - yamulmaya olan duyarlılığı küçüktür.

9. Genişleme aşamasında öz direnç yamulma büyütme çarpanı derinlik ve metamorfik kayaçlar için 300-500, çökel kayaçlar için 100 - 200 çevresindedir.

10. Kırılma noktasına erişmeden makaslama kuvvetleri altında öz dirençte büyük değişim olmaz. Bu aşamadan sonra öz dirençte büyük değişim izlenir.

11. Hidrostatik basınç iletim yollarını kapatarak öz direncin yükselmesine neden olur.

12. Sığ kabuk basıncı ve sıcaklığı altında öz direnç değeri içerilen sıvının tuzluluğuna ve sıcaklığına bağlıdır. Dönüşül noktaya değin (300-500°C) sıcaklıkla öz direnç düşer bundan sonra artar. Basınç ve tuzluluk arttıkça dönüşüm noktası yüksek sıcaklıklara doğru kayar.

13. Sıcaklığın 500°C yi aştığı derinliklerde gözenek basıncı değişimi ile gözenek sıvısı iletkenliğinde büyük değişimler izlenir.

14. Doygun kayaçların öz direnci gerilme - yamulmaya daha duyarlıdır.

15. Deprem sırasında yamulma 10^{-4} çevresinde, gerilme düşüşü levha içlerinde 30 - 50 bar, levha cephelerinde 100 bar çevresinde, deprem öncesi, başlangıç tektonik basıncı ise yaklaşık 0.2 - 2 kbar çevresindedir. Eğer yamulma hızının yılda $0.5 \cdot 10^{-6}$ olduğu varsayılırsa ve kırılmadan önce değişimin zaman ve yer içinde tekdüze olduğu düşünülürse yılbaşına beklenen öz direnç değişimi %0.005 ile %0.01 çevresindedir.

16. Bu durumda deprem ile beklenen öz direnç değişiminin % 1 i aşmayacağı düşünülürse, ölçüm duyarlılığının % 0.01 çevresinde olması gerekmektedir.

ÖNERİLER

1. Öz direnç, düşük basınçlarda büyük gerilme düşüşünden en çok etkilendiğinden, yer seçiminde öncelikle önceki depremlerden edinilen bilgilerden yararlanarak en çok gerilme düşüşü olan yerler belirlenmelidir. Kuzey Anadolu kırığı için bu değerler 25 - 35 bar çevresinde, batıda Big-1 yarımadası, doğuda Erzincan çevresidir (Ezen, 1981). Arap Kalkanı üzerinde Lice depreminde ise 88 bar çevresindedir (H.Eyidoğan, sözlü bilgi).

2. Ölçme düzeneğinin kurulacağı büyük gerilme düşüşlü yöreden çeşitli derinlik ve kayaç türlerinden alınan örnekler üzerinde gözeneklik ve gözenek türü gerilme - yamulma değişimi gibi özellikler deneylik ölçümleri ile belirlenmelidir.

3. Mutlak öz direnç ölçümleri için düzenek yöredeki derinlik ve başkalaşık kayaçları üzerine kurulmalıdır.

4. Göreceli ölçümler için ölçüm uçlarından biri düşük diğeri yüksek gerilme düşüşü bölgelerinde yer almalıdır.

5. İnceleme derinliği önceki depremlerin odak derinlikleri dolaylarında yoğunlaştırılmalı. Ancak bu derinliğe değin bir derinlik taraması yapılmalıdır.

6. İletken ortamlar etkin derinliği küçülteceğinden ve çevresel gürültüleri arttıracığından böyle yörelerden uzak durulmalıdır.

7. Aday çalışma yörelerinde önce derinliğine doğru akım öz direnç ve manyetotellirik yöntemleri kullanacak elektrik yapı kesiti çıkarılmalıdır. Çıkarılan yapı kesitinin

çeşitli derinliklerinde özdirençe beklenen değişimleri verecek yüzey ölçümlerinde beklenen görünür özdirenç değerleri saptanmalıdır.

8. Bölgenin sismotektonik yapısı çalışılmalıdır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Doktora Sonrası bursu ile Massachusetts Institute of Technology'de gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarım sırasında desteklerini gördüğüm Prof. Dr. Ted Madden ve Prof. Dr. M. Nafi Toksöz'e teşekkür ederim.

DEĞİNİLEN BİLGİLER

- Archie, G.E., 1982, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: Trans. AIME, 146, 54 - 61.
- Brace, W.F., Orange, A.S. and Madden, T.R., 1965, The effect of pressure on the electrical resistivity of water saturated crystalline rocks, Jour. Geophys. Res. 70, 5669 - 5678.
- Brace, W.F., Paulding B.W., Jr., and Scholz, C, 1966, Dilatancy in the fracture of Crystalline rocks, Jour. Geophys. Res., 71, 3939 - 3953.
- Brace, W.F., and Orange, A.S., 1968, Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding: J.G.R., 73 (4), 1433-1445.
- Brace, W.F., 1971, Resistivity of saturated crustal rocks to 40 km based on laboratory measurements; G.G. Heacock, ed. the structure and Physical Properties of the Earth's Crust.: AGU, Washington, D.C. Geophys. Monog. Ser. Vol. 14,
- Brace, W.F., 1974, Electrical resistivity of sandstone, Final report to Defense Nuclear Agency, contract no. DNA - 001 - 74 - C - 0057, 40 pages,
- Ezen, Ü., 1981, Kuzey Anadolu Fay Zonunda Deprem Kaynak parametrelerinin Manyitütle ilişkisi, Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, 32, 53 - 77.
- Fitterman, D., 1976, Theoretical resistivity variations along stressed strike-slip faults, Jour. Geophys. Res., 81, 4909-4915.
- Hadley, K., 1975, Dilatancy, further studies in crystalline rock, Ph. D Thesis, M.I.T.
- Madden, T.R., 1976, Near surface electrical properties as a guide to mechanical properties, Final report to Air Force research Lab; Contract no. F-19628 - 72 - C - 0182.
- Madden, T.R., 1976, Near surface electrical properties of rock; as a guide to mechanical properties. Final report to Air Force Research Lab: Contract no. P * 19628 - 76 - C - 0070.
- Madden, T.R., 1980, High sensitivity monitoring of resistivity and self potential variations in the Palmdale and Hollister areas for earthquake prediction studies; Sem. Ann. report, to U.S.G.S, Contract No. 14 - 08 - 0001 -16724, M.I.T., E.P.S., 15 pages (unpublished)
- Morrison, H.F., and Chang, M., 1977, High - accuracy determination of temporal variation of crustal resistivity: Geophys. Monog. 20, the Crust, A.G.U., 593-614.
- Morrison, H.F., Fernandez R. and Corwin, R.F., 1979, Earth resistivity, self potential variations, and earthquakes; a negative result for M: 4.0: Geophysical Research Letters, 6, 3., 139 -142.
- Quist, A.S., and Marshall, W.L., 1968, Electrical conductance of aqueous Sodium chloride solutions from 0 to 800° and at pressures to 4000 bars. Jour. Phys. Chem., 72, 684.
- Rikitake, T., 1975, Statistics of the earth's crust and probability of earthquake occurrence: Tectonophysics, 26,1-21.
- Scholz, C.H., Sykes, L.R. ve Aggarwal, Y.P. 1973, Earthquake prediction: A physical basis: Science, 181 (4102), 808 - 810.
- Yamazaki, Y, 1967, Electrical conductivity of strained rocks. The third paper. A resistivity variometer: Bull. Res. Inst, 45, 849 - 860.

Yazının geliş tarihi: Nisan 1982

Yayına verildiği tarih: Temmuz 1983