

Kayaçların Esneklik Özelliklerinin Saptanması ve Buna Göre Kayaçların Mühendislik Açısından Dizelenmesi

Determination of Elastic Constants of Rock and Classification of
Intact and in-situ Rock

Metin ÖZDOĞAN *

ÖZET

Kayanın davranış özelliklerinin tam olarak saptanabilmesi için yerinde ve deneyinde yapılması gereken duruk ve devinik ölçümler anlatılmıştır. Duruk ve devinik esneme değişmezleri arasındaki farklılık ve bunların bağdaşımı tartışılmıştır. Ayrıca, sağlam kayacın ve kayaç kültesinin deneyevi ve yerinde ölçümlerine göre mühendislik açısından dizelenmesi verilmiştir.

ABSTRACT

For a complete evaluation of rock mass the essential in situ (field) and laboratory static and dynamic tests are given. The discrepancy between static and dynamic elasticity modulus and their correlation are discussed. Engineering classification of intact and in situ rock based on laboratory and field measurements are also presented.

(*) Maden Y. Mühendisi, Yurtören Ltd. Şti., Bağlayan Sok. 4/1 Küçükesat - Ankara.

1. GİRİŞ

Kaya Mekaniği kayaçların mekanik davranışlarını inceleyen kuramsal ve uygulamalı bir bilim dalı olup; kayacın fiziksel çevresi içinde karşı karşıya kaldığı kuvvetler ve gerilmelere karşı gösterdiği tepki ve davranışı inceler (1).

Kuramsal bir bilim dalı olarak, kayanın biçim değiştirmesi, yer kabuğunun kıvrımlanması, depremlerin oluş ve yayılması gibi olayları anlamamız ve kavramamıza yardım eder. Uygulamalı bir bilim dalı olarak, inşaat ve madencilik çalışmalarının gittikçe boyut ve sorumluluğu artan projelerinde ölçülebilen, sayısal, somut verileri sağlar. Yüksekliği 300 metreye yaklaşan barajlar, büyük yeraltı güç merkezleri, su atımı ve pis su yönlendirme dizgeleri, yeraltı sığınakları ve askeri kuruluşları, tüneller ve derin yeraltı maden açıklıkları bu işin önem ve boyutunu gösteren örneklerdir(1).

Birçok kaya mekaniği probleminde yereyden alınan sağlam kaya parçalarından elde edilen deney örneklerinin mühendislik özellikleri birinci derecede önem taşır. Diğer bazı kaya mekaniği çalışmalarında ise yersel yapı ve süreksizlikleri de içeren kaya kültesinin yerinde (in - situ) özellikleri ve davranışı önem kazanır.

Deneyinde denenen örneğin özellikleri, örneğin alındığı kayaç kültesinin özelliklerinden çok farklı olabilir.

2. KAYAÇLARIN DENEYEVİNDE İNCELENMESİ

Deneyevi ölçüm ve incelemeleri sağlam kayadan alınmış küçük deney örnekleri üzerinde yapılır. Bu deney örneklerinin alındığı kaya sağlam olmalı, süreksizlikler ve zayıflık düzlemleri içermemelidir.

2.1. Deneyevinde Duruk (Statik) Ölçümler

Kayaların deneyevinde saptanan duruk özellikleri; tek ve üç eksenli basınç dayanımı, esneklik katsayısı, poisson oranı, çekme dayanımı, burulma, kesme dayanımı, sertlik ve akmadır.

2.2. Deneyevinde Devinik (Dinamik) Ölçümler

Sağlam kayacın esneme değişmezleri (esneklik katsayıları) devinik ölçüm yöntemleriyle de saptanabilir. Deneyevinde kaya örneklerinin esneme (elastik) özellikleri darbe (pulse) ve eşitireşim (rezonans) tekniği olmak üzere başlıca iki yöntemle belirlenir. Darbe tekniğinde kısa süreli bir mekanik darbecik oluşturularak bu darbeciğin deney örneği içinde ilerleme hızı ölçülür. Eşitireşim tekniğinde ise deney örneğine yüksek frekanslı titreşimler verilip eşitireşim frekanslar saptanır.

2.3. Kayaçların Deneyevi Ölçümlerine Göre Mühendislik Dizelemesi

Kayaları deneyevinde saptanan özelliklerine göre, tek eksenli basınç direncine ve young esneklik katsayısına (elastisite modülüne) göre dizelemek olanaklıdır. Çizelge 1 ve 2 böyle bir dizelemeyi göstermektedir (1).

Kuarsit, diabaz ve bazalt gibi eşdaneli ve kenetlenmiş dokulu yüksek yoğunluklu kayaç türleri dizelemede A kümesine düşerler.

Derinlik kayaçlarının çoğunluğu, sağlam yapılı başkalaşım kayaçları, iyi dokulu kumtaşları, sert şeyller, kireçtaşlarının büyük çoğunluğu ve dolomitler B kümesine, yani sağlam kayaçlar dizesine girerler.

Çizelge 1—Kaya Örneklerinin Deneyevi Basınç Direncine Göre Mühendislik Dizelemesi.

Dize	Tanım	Tek Eksenli Basınç Direnci	
		(kg/cm ³)	(MPa)
A	Çok sağlam kayaç	> 2252	> 225,2
B	Sağlam kayaç	1127-2254	112,7-225,4
C	Orta sağlamlıkta kayaç	563-1127	56,3-112,7
D	Zayıf kayaç	282 - 563	28,2 - 56,3
E	Çok zayıf kayaç	< 282	< 28,2

Çizelge 2—Kaya Örneklerinin Deneyevi Modulus Oranına Göre Mühendislik Dizelemesi

Dize	Tanım	Modulus Oranı, E/a
H	Yüksek modulus oranlı kayaç	> 500
M	Orta modulus oranlı kayaç	200-500
L	Düşük modulus oranlı kayaç	< 200

C kümesi orta sağlamlıktaki kayaçları içerir; şeyllerin çoğu, gözenekli kumtaşı ve kireçtaşları, klorit, mika ve talk şistleri gibi çok yapraksı yapıda olan başkalaşım kayaçları bu kümeye girerler. Ankara andezitleri de bu dizeye girmektedir (4,5).

Zayıf ve düşük kayaçlar dizesi olan D ve E kümesine ise genellikle gözenekli ve düşük yoğunluklu kayaçlar girer. Bunlar; gevrek (kırılgan) kumtaşları, gözenekli tüfler, killi şeyller, hava ya da kimyasal etkilerle bozmuş, ayrılmış her yapıdaki kayaç türleridir.

3. KAYANIN YERİNDE İNCELENMESİ

3.1. Yerinde Ölçümlerin Gereği

Kayaçların deneyevi ve yerinde saptanan esneme (elastik) özellikleri arasında daima fark bulunmaktadır.

Bunun nedeni, kaya kültesinin dizgesel (sistematik) eklem takımları, katmanlaşma düzlemleri, yer kırık (fay) zonları gibi yersel süreksizlikler taşımasıdır. Eğer bu süreksizlikler bulunmasaydı kayaç kültesinden de, deneyevinde denenen kaya örnekleri gibi mekanik davranış ve özellikler göstermesi beklenebilirdi.

Ancak bu süreksizlikler, kayacın deneyevinde saptanan esneme değerlerinin düşmesine ve ana külteyi temsil etmemesine neden olmaktadır. Bu yüzden, son yıllarda kayanın yerinde özelliklerinin ölçülmesi gereğinin önemi anlaşılmıştır.

Yersel süreksizliklerin etkisi ve önemi, sözkonusu yapı ve özelliğine göre değişebilir. Söğeli mi, baraj temellerinde, büyük yeraltı yapı ve kazılarında gerilme çevresi çok geniş bir alandaki değişimleri kapsar; bu durumda eklem sıklığı ve konumu, yer kırıklarının etkisi gözönünde bulundurulmalıdır. Süreksizlik aralıkları mühendislik

yapısının boyutlarına oranla çok seyrek ise, örneğin bir yergevşetme deliğinin delinmesi ve masif sağlam kayaçta galeri açma makinesiyle bir tünelin açılması, bu kez kayacın mekanik davranışı, deneyevinde saptanmış özelliklere daha uygun olabilir.

Kayanın biçim değiştirme özelliğini yerinde ölçmenin iki ana yöntemi vardır; bunlar duruk (statik) ve devinik (dinamik) ölçüm yöntemleridir.

3.2. Kayacın Yerinde Duruk Ölçümü

Duruk yöntemlerde kaya yüzeyinin seçilen alanlarına (yerlerine) görece büyük duruk yükler uygulanır ve oluşan yer değiştirmeler ölçülür. Bu amaçla kullanılan aygıtlar hidrolik krikolar, yassı vrenler ve basınç hücreleridir. Bu teknikle alınan ölçümlerin eksik yanı, gerçek yapı tarafından kayaya uygulanan gerçek yüke oranla gerilme oluşturulan alanın ve yükleme süresinin çok küçük olması nedeniyle gerçek değerleri verememesidir. Bunun dışında deneme yordam ve işlemleri çok yorucu, karmaşık ve süre alıcıdır.

3.3. Kayacın Yerinde Devinik Ölçümü

Mühendisler devinik yöntemleri kayanın yerinde incelenmesinde çok sık kullanırlar. Bu yöntemlerle istenilen her yönde, tüm kayayı kapsayacak biçimde, hızlı ve kolay ölçümler almak olanaklıdır. Titreşik kırılma (seismic refraction) ölçümleriyle mühendislik projelerindeki toprak - zemin - kaya katman sınırları ucuzca saptanabilir. Bundan başka, belirlenen titreşik hızlardan ve kayaç yoğunluklarından incelenen ortamın yerindeki esneklik özellikleri hesaplanabilir. Çünkü, esneklik kuramı, kayaç içinde esnek (elastik) dalga yayılması problemlerine de duyarlı bir biçimde uygulanabilmektedir. Titreşik hızlardan bulunan Young modülü değeri genellikle tasarım değeri olarak kullanılamayacak kadar yüksek çıkmaktadır: Bu nedenle, duruk ve devinik esneklik katsayısı değerleri birlikte değerlendirilmeli, yorumlanmalı ve aralarında bağdaşım kurulmalıdır.

Esneklik kuramına göre enine dalga ilerleme hızı (V_s), boyuna dalga ilerleme hızı (V_p) ve yoğunluk bilindiğinde tüm esneme değerleri hesaplanabilir. V_p değeri, arazide kolay bir ölçümle saptanabilmektedir. Yüzeye yakın sığ bir delikte küçük bir patlatma yapılır ya da ağır bir çekiçle yere vurulur. Atım yapılan bu delikten belirli uzaklığa yerleştirilen bir dinleme aygıtına (geophone)

gelen ilk dalgacığın varış zamanı (travel time) ve patlatma uzaklığı (impact distance) arasında çizel (grafik) anlatım sağlanabilmesi bakımından genellikle birden fazla yer dinleme aygıtı kullanılır (3).

4. KAYAÇLARIN DURUK VE DEVİNİK ESNEME ÖZELLİKLERİ

4.1. Giriş

Deneyinde sağlam deney örnekleri üzerinde yapılan deneylerde bulunan esneklik katsayısı değerleri, genellikle yerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlardan daha yüksek çıkmaktadır.

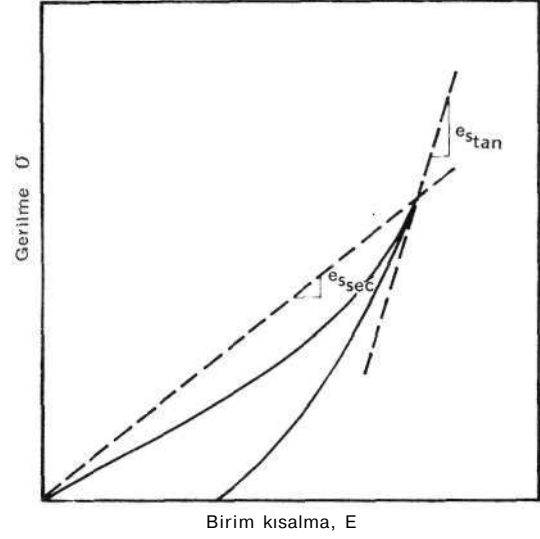
Ayrıca, deneyler sonucu hesaplanan duruk ve devinik esneklik katsayısı değerleri arasında da önemli ölçüde fark bulunması kayaçların her iki yöntemle de ölçülmesini gerekli kılmaktadır.

4.2. Duruk ve Devinik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Duruk ve devinik yöntemlerle elde edilen esneme özellikleri çeşitli araştırmacılarla bağdaştırılmaya çalışılmışsa da, henüz güvenilebilir bir bağdaşım (correlation) kurulamamıştır.

Serafim'e göre (1), yerindeki titreşik esneklik katsayısı ile yerindeki duruk deneylerde ölçülen yük boşaltma eğrisinin başlangıcındaki teğet esneklik katsayısı arasında benzerlik bulunmaktadır. Bu araştırmacı titreşik hızlardan hesaplanan yongun modülü, (E_d) değerinin yassıvren deneyi eğrisinden hesaplanan young modülü, (E_s) değerine karşılık geldiğini ileri sürmektedir (Şekil 1). Tasarımda kullanılan esneklik modülü (E_{ssec}) değerinden oldukça yüksektir.

Öte yandan Onodera (2), Serafim'in yaptığı gibi bir karşılaştırmayı yanlış bulmaktadır. Onodera'ya göre duruk ve devinik deneylerde etki alanı bakımından büyük farklılıklar bulunduğundan, böyle bir karşılaştırmada aslında kaya kültesinin değişik bölgeleri bağdaştırılmaya çalışılmaktadır. Bu araştırmacı, doğru bir karşılaştırmaların çok sayıda yerinde deney sonuçlarının incelenmesiyle yapılabileceğini ileri sürmektedir. Nitekim Onodera, yaptığı çalışmalar sonucu deneyevi ve yerinde ölçümlerden elde edilen duruk ve devinik esneklik katsayılarını inceleyerek aralarında ilişki kurmaya çalışmıştır (Şekil 2, 3, 4 ve 5). Şekil 3'te görülen noktalar, Şekil 2'deki noktalardan daha dağınıktır.

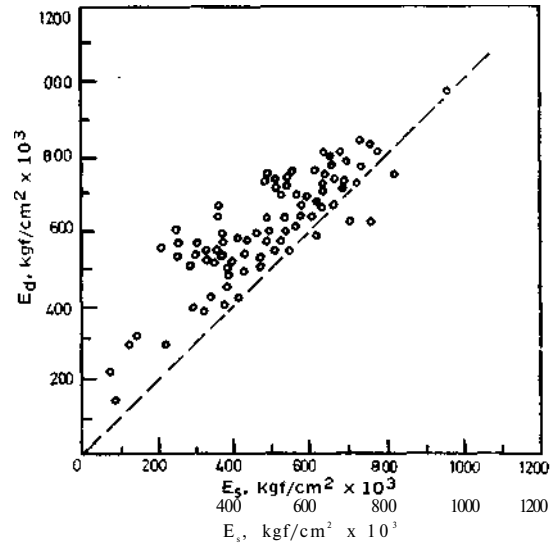


Şekil 1. Kayanın tipik bir birim basınç gerilmesi (stress) — birim kısalma (strain) ilişkisi (1)

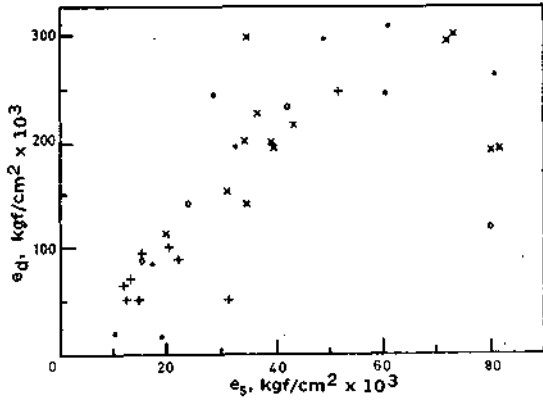
Çünkü, Şekil 3 süreksizlikler içeren kaya kültesinde yapılan ölçümleri, Şekil 2 ise deneyinde sağlam deney örnekleri ile elde edilen sonuçları göstermektedir.

Kaya mekaniği deneylerinde, duruk esneklik katsayısı ve devinik esneklik katsayısı oranı (E_d/E_s) değeri daima 1,0 'den küçüktür. Bu da devinik esneklik katsayısı değerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

E_d/E_s oranının değeri, kayaç kültesindeki süreksizlikler arttıkça daha da küçülmekte; yani devinik esneklik katsayısı (E_d), daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.



Şekil 2. Deneyinde saptanan devinik ve duruk esneklik katsayıları arasındaki ilişki (2).



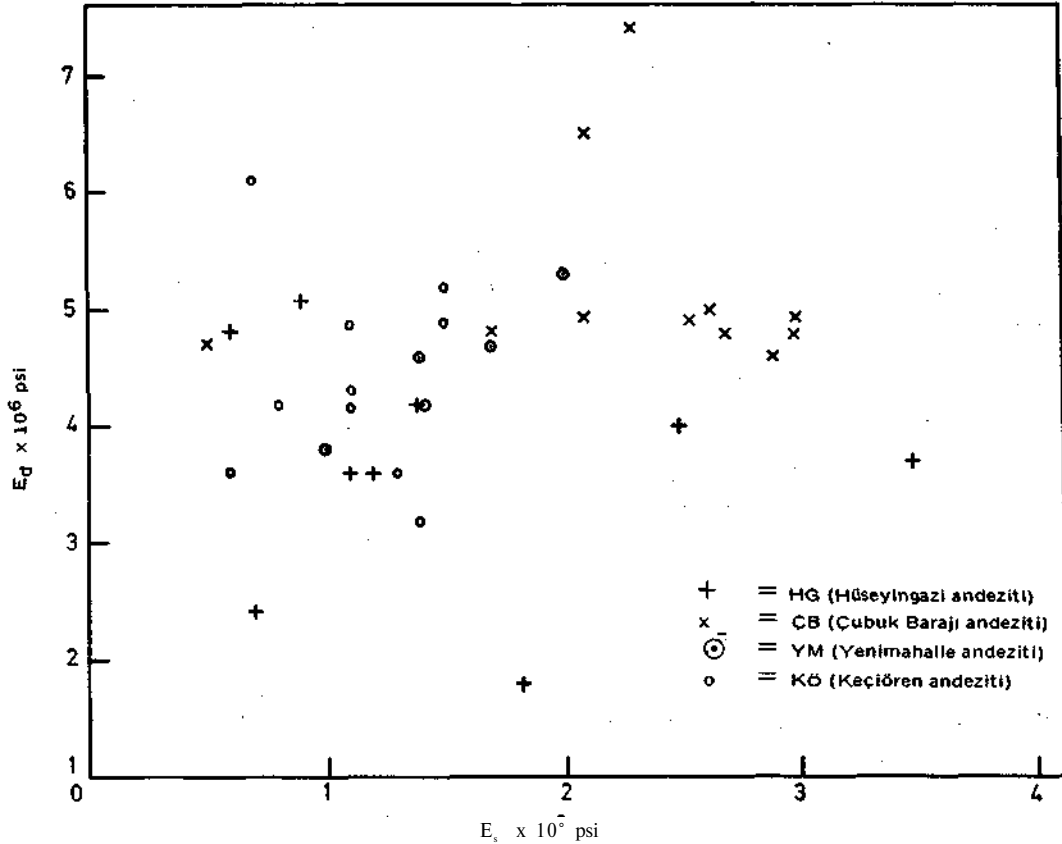
Şekil 3, Kayanın yerinde ölçümlerde saptanan devinik ve duruk esneklik katsayıları arasındaki ilişki (2).

Devinik ve duruk esneklik modülleri arasındaki fark, kayanın süreksizlik takımları sayısı arttıkça daha da büyümektedir. Devinik ve duruk esneklik değerleri arasında bir bağlantı kurabilmek için kayanın sağlamlığı hakkında sayısal veriler gereksinim vardır. Bunlar da RQD ve V_p / V_L gibi kayanın sağlamlık göstergeleridir; RQD yerdelgi (sondaj) karotlarına, V_p/V_L ise yerinde ve deneyevi titreşik hızlarının oranına dayanan kayac nitelik belirteçleridir.

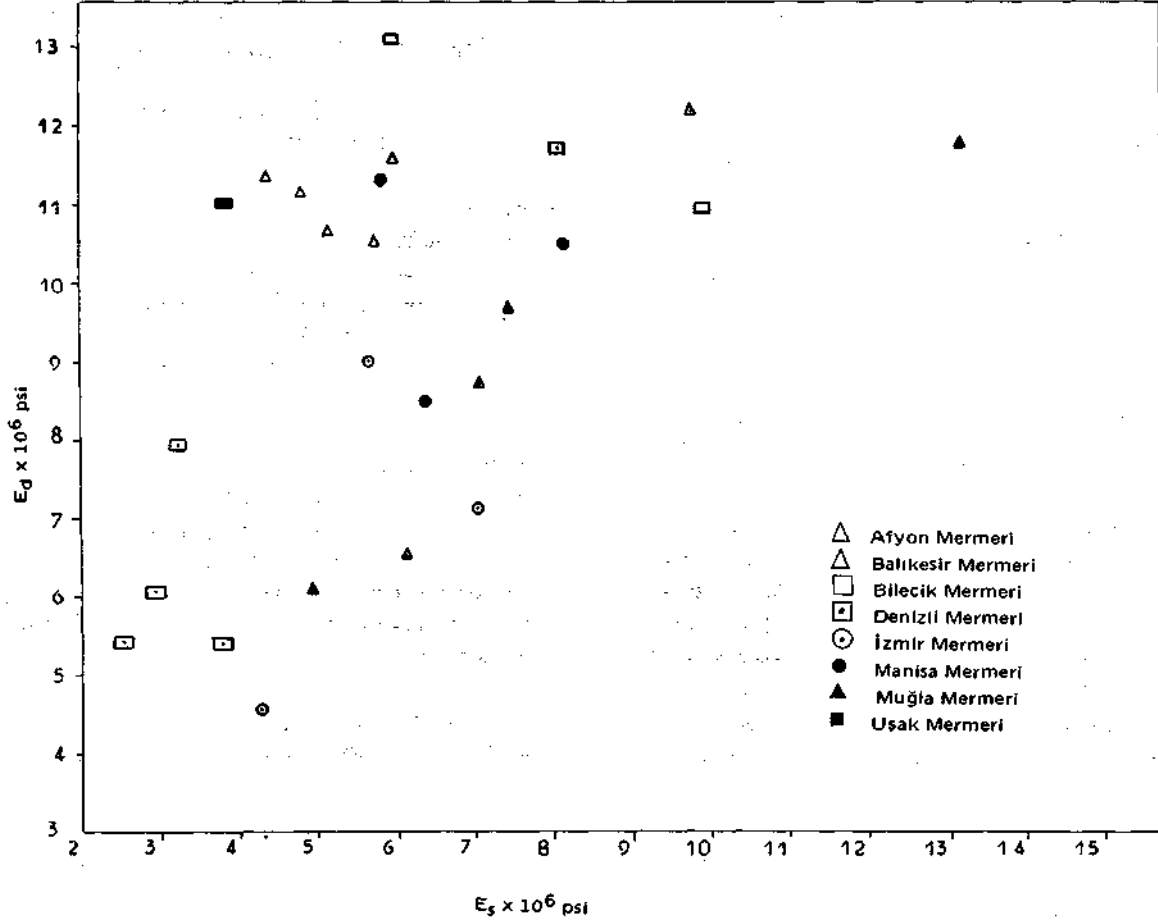
4.3. Duruk ve Devinik Esneme Özellikleri Arasındaki Ayrılığın Nedenleri

Bu konuya çeşitli açıklamalar getirilmeye çalışılmış olup, bunların başlıcaları şunlardır:

- Büyük süreksizlikler kayanın duruk biçim değiştirme (deformabilite) özelliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Küçük çatlaklar ve özellikle su içerenler ise kayanın devinik biçim değiştirme yeteneğini önemli ölçüde etkilemezler; çünkü devinik ölçümlerde parçacıkların çok küçük yer değiştirmeleri (displacement) sözkonusudur.
- Titreşik dalga hızları esnek birim boy değişimlerinden (elastic strain) etkilenmekte, ancak kalan biçim değiştirmelerden (plastic deformation) etkilenmemektedir. Buna karşın duruk deneylerde kalan biçim değiştirmeler kayanın esnekliğini etkileyerek esneklik katsayısı değerini düşürmektedir.
- Titreşik dalgalar su içeren ve içermeyen kayalar tarafından farklı hızlarda iletilirler. Oysa, duruk esneklik katsayısı için bu durum bu kadar önemli değildir.



Şekil 4—Ankara andezitlerinde deneyevi duruk ve devinik esneklik katsayıları arasındaki ilişki (5)



Şekil 5. Batı Anadolu mermerlerinde deneyevi duruk ve devinik esneklik katsayıları arasındaki ilişki (6).

— Titreştirici darbenin ortamın parçacıklarında oluşturduğu devinimler tümüyle esnekler; çünkü darbe çok kısa süreli olduğundan gerilme düzeyi çok düşüktür.

- Yerinde ölçülen duruk esneklik katsayısı, yerinde ölçülen devinik esneklik katsayısına göre kayanın çok sınırlı bir alanının yüklenmesiyle saptanmış olduğundan kayanın tümünü değil küçük bir kesiminin özelliğini yansıtmaktadır.

5. KAYACIN YERİNDE ÖLÇÜMLERE GÖRE MÜHENDİSLİK DİZELEMESİ

Yersel süreksizliklerin istatistiksel kayıtlarının tutulmasının ve bunların yerbilim haritalarına işlenmesinin önemi bilinmektedir. Ancak kayaçların birbirine, çatlak ve değişime uğrama durumuna göre dizelenmesinin, uygulamadaki yararının büyük olduğu kuşkusuzdur.

Böyle bir dizeleme, karot değerlendirmesine dayanan RQD ve titreşik hız ya da esneklik katsayısı oranlarına dayanan kayaç nitelik göstergeleri kavramlarıyla olanaklıdır.

5.1. Kayaç Kütleli Sağlamlık Ölçütü olarak RQD

RQD günümüzde kaya sağlamlığını tanımlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. RQD, yerdelgi (sondaj) kuyusunda kayacın düşey değişimlerini göstermektedir. RQD uyarlanmış karot verimine dayanmakta olup, kayaç kütleince içerilen süreksizlikleri, yumuşak ve değişime uğramış zonları dolaylı olarak gösterir.

RQD nasıl olsa yerdelgi yapılacak yerler için ucuz ve basit bir yöntem olup her mühendis tarafından uygulanabilir. Bu kolay yöntem kayaç kütlelerinin mühendislik açısından niteliği hakkında çok iyi fikir vermektedir (Çizelge 3).

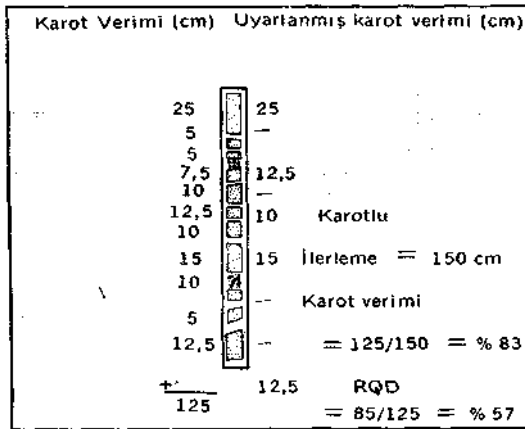
Çizelge 3—RQD Ölçütüne Göre Kayacın Sağlık Dizelemesi

RQD (%)	Kayaç Sağlamlığı
0 — 25	Çok zayıf kayaç
25-50	Zayıf kayaç
50-75	Orta sağlamlıkta kayaç
75-90	Sağlam kayaç
90-100	Çok sağlam kayaç

Uygulama sonuçları, kayaç nitelik göstergesi olarak RQD'nin genel karot verimi yaklaşımından daha güvenilir olduğunu göstermektedir. RQD yöntemi özellikle içpüskürük kayaç kültelerinde çok iyi sonuç vermektedir. Tortul ve yapraksı başkalaşım kayaçlarında RQD uygulaması mühendisin özel yorumunu gerektirmektedir.

RQD uygulamasında yerdelgi işlemi iyi izlenmeli ve NX çapında çift tüplü karot alıcılar kullanılmalıdır. Zayıf kayaçlar, eski yerdelgi makinaları karot alma tekniği ve yerdelgicinin niteliği, yeteneği karot verimini düşürebilmektedir.

Karot alma ya da çıkartma işlemi sırasında kırılan karotlar birbirine birleştirilerek tek bir parça olarak sayılır. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi 10 cm' den daha küçük parçalar RQD değerlendirmesinde gözönüne alınmaz.

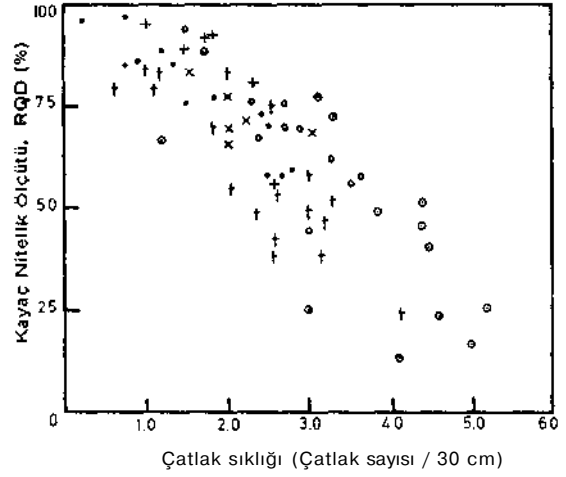


Şekil 6. Kayaç kültesi sağlamlık ölçütü olarak RQD(1).

5.2. Kayaç Kütleli Sağlık Ölçütü Olarak Çatlak Sıklığı

Bazı uygulamacılar kayaç kütleli nitelik belirteci olarak RQD yerine bu yöntemi yeğlemektedirler. Bu yaklaşım kayaç kütleli 30 cm başına

düşen doğal süreksizliklerin sayısına dayanmaktadır. Şekil 7'de görüldüğü gibi her iki kavram arasında iyi bir bağdaşım bulunmaktadır.



Şekil 7. Çatlak sıklığı ve RQD değerlerinin bağdaşımı (1).

5.3. Kayaç Kütleli Sağlık Ölçütü Olarak Esneklik Katsayısı Oranı

Kayaç kütleli bulunan süreksizliklerin etkisini saptayabilmenin bir yöntemi de yerinde ve deneyevi devinik esneklik katsayılarının karşılaştırılmasıdır.

Kudo (2) ise kayaç kütleli sağlamlık ölçütü olarak sağlamlık oranını önermektedir.

$$\text{Sağlamlık oranı} = \frac{e_d}{E_d}$$

e_d = Yerinde devinik esneklik katsayısı

E_d = Deneyevi devinik esneklik katsayısı

Uygulamacıların deney sonuçları ve gözlemleri her iki yaklaşımın da bağdaştığını göstermektedir (Çizelge 4).

5.4. Kayaç Kütleli Sağlık Ölçütü Olarak Titreşik Hız Oranı

Kayaç kütleli sağlamlık ölçütü olarak boyuna dalgaların (p - dalgaları) kayaç içinde ilerleme hızlarından yararlanmak olanaklıdır.

Deneyevi ve yerinde dalga yayılma hızları arasındaki farklılık, arazide varolan yapısal süreksiz-

Çizelge 4-Sağlamlık Oranı ve Çatlak Değişmesi Ölçütlerine Göre Kayaç Kültesi Nitelik Dizelemesi

Dize	Kayaç Kültesi Sağlamlığı	ed/Ed (Sağlamlık Oranı)	(Ed-ed)/Ed (Çatlak Değişmezi)
A	Çok Sağlam Kayaç	0,75-	0,25-
B	Sağlam Kayaç	0,50 - 0,75	0,25 - 0,50
C	Orta Sağlamlıkta Kayaç	0,35 - 0,50	0,50 - 0,65
D	Zayıf Kayaç	0,20 - 0,35	0,65 - 0,80
E	Çok Zayıf Kayaç	-0,20	0,80-

liklerden kaynaklanmaktadır. Bu bakımdan, hız oranı kaya sağlamlık göstergesi olarak kullanılabilir.

çatlak sıklığı değerleri de gözönüne alınarak tasarım için başlangıç verileri elde edilmiş olur.

Titreşik Hız Oranı $\frac{VF}{VL}$

KAYNAKLAR

V_p : Yerinde dalga ilerleme hızı

V_l : Deneyevinde dalga ilerleme hızı

Bu oran, çok örselenmemiş (masif ve eklemsiz) kayalarda " 1 " değerine yaklaşmakta; kayaç zayıfladıkça oranın değeri " 1 " sayısının altına düşmektedir.

6. SONUÇ

Kayaç kültesinin davranışı hakkında bilgi edinebilmek için önce yerinde duruk ve devinik ölçümler yapılır. Yerinde deneylerin yapıldığı kesimlerden alınan sağlam kayaç örnekleri duruk ve devinik olarak denir. Kayaç kültesinde sapnana süreksizlik dizgelerinin göstergesi olan RQD ve

1. STAGG, K.G. and Zienkiewicz, O.O., Rock Mechanics in Engineering Practice, New York, John Wiley, and Sons, 1968.
2. ONODERA, T.F., "Dynamic Investigation of Foundation Rocks In-situ", Proc. Symp., Rocak. Mech., 5th, Minnesota (Ed. C. Fairhurst), London, Pergamon Press, 1963.
3. NICHOLLS, H.R., "In-Situ Determination of the Dynamic Elastic Constants on Rock", Int. Symp. on Mining Research, Vol. IL (Ed. G.B. Clark), London, Pergamon Press, 1962.
4. NATHANIEL, I., Laboratory Determination of some Mechanical Properties of Ankara Andésite Ankara, Bilimde Uzmanlık Tezi, O.D.T.Ü., 1972.
5. ÖZDOĞAN, M., Laboratory Determination of Dynamic Elastic Constants of Ankara Andésite by Resonant Frequency Technique, Ankara, Bilimde Uzmanlık Tezi, O.D.T.Ü., 1973.
6. ÖZGENOĞLU, A., Laboratory Determination of Young's Modulus of Elasticity of Some Western Anatolian Marbles by Sonic Method, Ankara, Bilimde Uzmanlık Tezi, O.D.T.Ü., 1972.