



Araştırma Makalesi / Research Article

Kaya Modülleri Arasında Farklılıklar: Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman Barajlarından Örnek Çalışmalar

Differences Between Rock Modules: Case Studies From Deriner/Artvin and Ermenek/Karaman Dams

Ali KAYABAŞI^a 

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir, Türkiye

Geliş (Received): 05 Mart (March) 2019 / Düzeltme (Revised): 16 Nisan (April) 2019 / Kabul (Accepted): 22 Mayıs (May) 2019

ÖZ

Elastisite modülü ve deformasyon modülü kemer ve beton ağırlıklı baraj projelendirmelerin de girdi parametresi olarak kullanılır. Buna ilave olarak bu modüller kayaç ve kaya kütle sınıflamalarında da kullanılır. Deformasyon modülü ve elastisite modülü kavramları birbirinden farklı olmalarına rağmen uygulamada sıklıkla karıştırılmaktadır. Deformasyon ve elastisite modül değerleri arazi, laboratuvar deneyleri ve jeofizik yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bu çalışmada, Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman baraj yerlerinde yapılan dilatometre ve plaka yükleme deneyleri ve laboratuvar deneyleriyle belirlenen modül değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ayrıca literatürde karşılaşılan modül karşılaştırmaları da derlenmiştir. Kaya kütle dilatometre deneyi elastisite modülü (E_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi elastisite modülü (E_H), kaya malzemesi statik elastisite modülü (E_{LS}), kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}), kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi deformasyon modülü (D_H) gibi modül değerleri arasında regresyon analizleri yapılmıştır. Modül değerlerinin aralarında yapılan regresyon analizleriyle anlamlı yüksek determinasyon katsayılı görgül eşitlikler belirlenmiştir. Bununla birlikte veri sayısının azlığı ve kaya kütle ortamlarının farklı özellikleri olması nedeniyle bu görgül eşitlikler diğer projelerde kullanılmamalıdır veya çapraz adımlı sınamalar yaparak kullanılmalıdır.

Anahtar kelimeler: Deformasyon Modülü, Elastisite Modülü, Deriner Barajı, Ermenek Barajı, Yerinde Deney

ABSTRACT

Elasticity modulus and deformation modulus are used as an input parameter in arch and concrete dam projects. In addition, these modules are used for the classification of intact rock and rock masses. Although the deformation and elasticity modulus are different from each other, they are often confused in practice. These modules are determined by in-situ tests, laboratory tests and geophysical methods. In this study, the deformation and elasticity modulus determined by dilatometer tests and plate loading tests at Deriner /Artvin and Ermenek /Karaman dam sites and modules obtained by laboratory test results were correlated. The module correlations in literature were compiled as well. Rock mass elasticity modulus (E_D) of dilatometer test, rock mass deformation modulus (D_D) of dilatometer test, rock mass elasticity modulus (E_H) of plate loading test, rock mass deformation modulus (D_H) of plate loading test, intact rock static elasticity modulus (E_{LS}) of laboratory tests, intact rock dynamic elasticity modulus (E_{LD}) of laboratory tests are correlated with regression analysis. Empirical equations obtained by regression analysis performed between rock modulus revealed high determination coefficient. The empirical equations proposed in this study are developed with a number of limited number of data and every rock mass has specific properties. The equations determined in this study should not be used for other projects or a cross check should be performed.

Key words: Deformation Modulus, Elasticity Modulus, Deriner Dam, Ermenek Dam, In-situ Test

GİRİŞ

Bu çalışmada Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman baraj yerlerinde yapılan dilatometre ve plaka yükleme deneyleri gibi yerinde deneyler ile laboratuvarında belirlenen kaya malzemesi modül değerleri karşılaştırılmıştır. Değerlendirmeler sırasında uluslararası yayınlardan derlenen örnekler de sunulmuştur. Deney yöntemlerine göre kaya malzemesi ve kaya kütle modülleri farklılıklar göstermektedir. Bununla birlikte kaya malzemesi modülleri ve kaya kütle modülleri yanlış olarak birbirinin yerine kullanılabilir. Yerinde deneylerle belirlenen kaya kütle modülleri, kaya kütle deformasyon modülü ve kaya kütle elastisite modülü olarak, laboratuvar deneyleriyle belirlenen modüller ise kaya malzemesi statik elastisite modülü olarak bilinir. Bu çalışmada anlatım karmaşası olmaması için belirlendiği deneyin adı modül adı önüne yazılarak aşağıdaki gibi simgelenmiştir; kaya kütle dilatometre deneyi elastisite modülü (E_D), kaya

kütle plaka yükleme deneyi elastisite modülü (E_H), kaya malzemesi statik elastisite modülü (E_{LS}), kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}), kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi deformasyon modülü (D_H). Bu çalışma ile modül değerlerinin belirlendiği deney yöntemlerine göre birbirinden farklı değerler ve anlamlar sunduğuna dikkat çekilmeye de çalışılmıştır.

Deriner Barajı temelden 249 m gövde yüksekliği ile Türkiye'nin en yüksek, dünyanın 6. en yüksek barajıdır. Baraj tipi beton kemerdir. Deriner Barajı ve HES, Doğu Karadeniz Bölgesinde Çoruh Nehri üzerinde ve Artvin İl Merkezini Erzurum İl Merkezine bağlayan Devlet Karayolu üzerindeki köprü'nün 5 km membasındadır. Ermenek Barajı, temelden 218 metre yüksekliğiyle Deriner Barajı'nın ardından Türkiye'nin en yüksek ikinci barajı unvanını taşır. Ermenek Barajı ve HES, Karaman ilinde Ermenek ilçesinde Göksu Nehri üzerindedir (<http://www.dsi.gov.tr/projeler>), (Şekil 1).

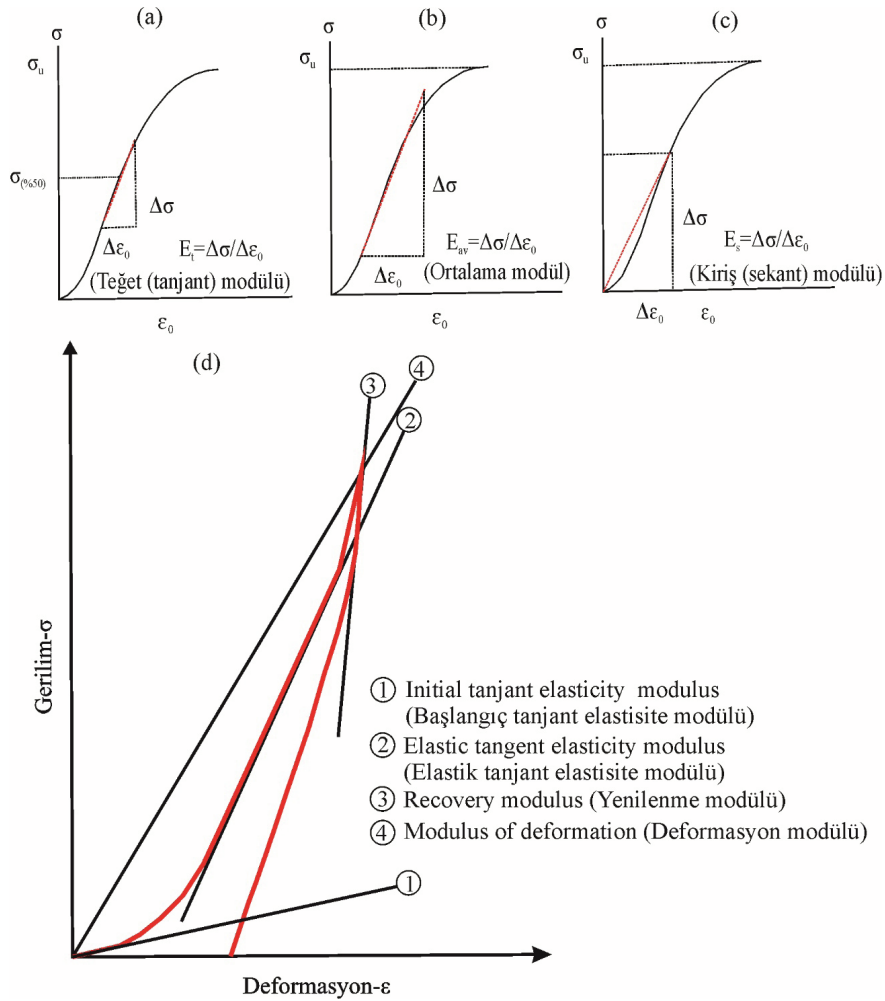


Şekil 1. Deriner ve Ermenek baraj yerleri lokasyon haritası.

Figure 1. Location map of Deriner and Ermenek dam sites.

Doğayı oluşturan her malzemenin yük altında kalması ve yükün kalkması, azalması koşullarında başlangıçtaki konumuna geri gelmesi sınırlarına bu malzeme için elastiklik sınırı adı verilir. Mühendislik uygulamalarında gerek kaya ve gerekse de zeminlerin elastiklik sınırlarının belirlenmesi önemli bir araştırma konusu olmuştur. Eksenel yükleme-deformasyon

eğrisinin doğrusal kısmının eğimine “Young modülü” diğer bir deyişle “elastisite modülü” adı verilir (ISRM, 1978). Laboratuvarında yapılabilen tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinde Young modülünün belirlenmesi değişik ölçüm yöntemleriyle, teğet (tanjant) modülü, kiriş (sekant) modülü ve ortalama modül gibi isimler almıştır (Şekil 2).



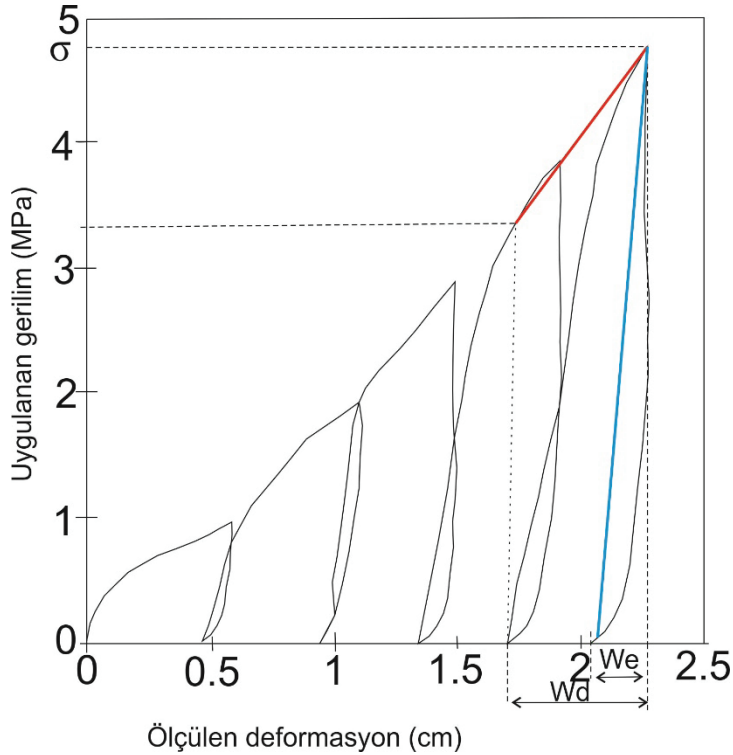
Şekil 2. Modüllerin belirlenmesi a) kaya malzemesi teğet (tanjant modülü) b) kaya malzemesi ortalama modül c) kaya malzemesi kiriş (sekant modülü) (ISRM, 1978) d) Kaya kütlelerinde tek eksenli yükleme-boşaltma döngüsünden belirlenen modüller (Hoek ve Diederichs, 2006).

Figure 2. Determination of modules a) tangent modulus of intact rock specimen, b) average modulus of intact rock specimen, c) secant modulus of intact rock specimen, (ISRM, 1978) d) rock mass modules from obtained from single loading-unloading cycle (Hoek and Diederichs, 2006).

Deneyler sırasında kaya kütle üzerine kısa sürede uygulanan gerilim-deformasyon değerleri, uzun süreli değişen/değişmeyen gerilim değerleri altında kalacak bir baraj yapısı için yeterli olmayacaktır. Bu nedenle kaya kütle için uzun süreli olarak proje yükleri altında bırakılarak deforme olmasının beklenmesi ve deformasyonların belirlenmesi olanağı, yerinde deneylerin avantajlarından birisidir.

Palmstrom ve Sigh (2001) yerinde deneylerden oluşturulan gerilim-deformasyon

modülü değerlerinin nasıl hesaplanacağını göstermiştir. Yükleme-boşaltma döngülerine çizilen teğetin eğimi deformasyon modülünü verirken, yükleme-boşaltma döngülerinin her birinin doğrusal kısımlarının eğimi elastisite modülü değerini vermektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, uygulanan gerilim aralığı değerinin, W_d deformasyon aralığı değerine oranı deformasyon modülünü verir. Uygulanan gerilim aralığı değerinin, W_e deformasyon aralığı değerine oranı ise elastisite modülüdür.



Şekil 3. Yükleme-boşaltma döngülerinden kaya kütle deformasyon modülünün ve elastisite modülünün belirlenmesi (Palmstrom ve Singh, 2001).

Figure 3. Rock mass deformation modulus and elasticity modulus determined by loading-unloading cycles (Palmstrom and Singh, 2001).

Laboratuvar ortamında sonik hız deneyi (ultrasonik dalga hızları kullanılarak dinamik elastisite modülünün tayini) yardımıyla kaya malzemesi dinamik modül değerleri belirlenebilmektedir. Kaya malzemesi modülleri E_{LD} ile E_{LS} 'nin karşılaştırılması ve aralarındaki farklılıklar pekçok araştırmanın konusu olmuştur (Al-Shayea, 2004; Ciccoti ve Mulargia, 2004; Song vd., 2004; Christaras vd., 1994; Gue'gen ve Palciauskas, 1994). Bozunma derecesinin artmasıyla, E_{LS} değerinin düşmesiyle, E_{LD} ve E_{LS} değerleri arasındaki farkın arttığı belirlenmiştir (Gue'gen ve Palciauskas, 1994; Al-Shayea, 2004).

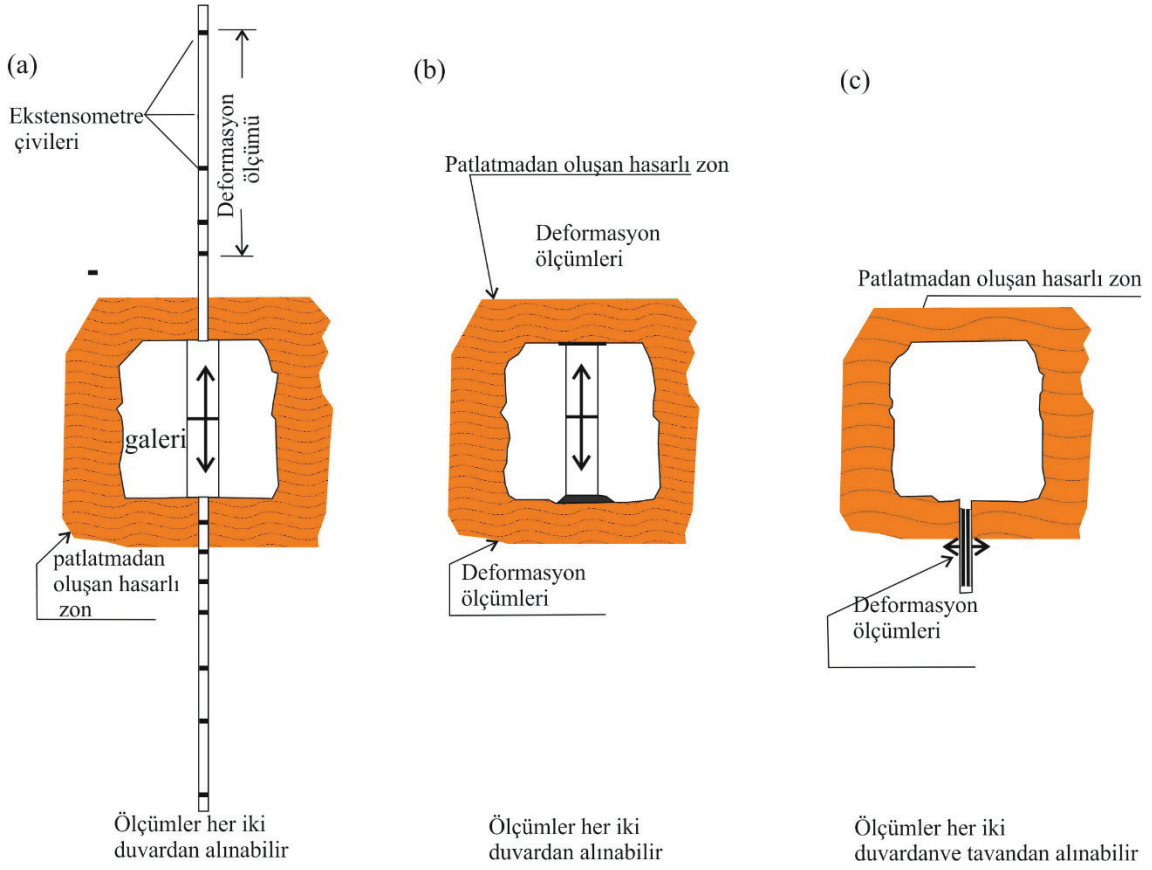
Sonik hız deneyinde AX çaplı (31 mm) ve daha büyük örnekler üzerinde V_p ve V_s yayılma hızları belirlendikten sonra aşağıdaki eşitlik kullanılarak dinamik young modülü (E_{LD}) belirlenir (ASTM D2845, 2008).

$$\text{Dinamik Young modülü (Pa): } E_{LD} = \rho V_s^2 \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

Kaya kütleleri üzerinde yapılan yapıların oluşturacağı yükün, kaya kütesinin elastik sınırları içerisinde olması önemlidir. Bu sınırlar üzerinde yapılan yüklemelerde yapılarda aşırı oturma ve taşıma gücü sorunları ortaya çıkar. Yapıların temelini oluşturan kaya kütlelerinin farklı modüllere sahip olması da yapıda farklı oturmalara ve deformasyonlara sebep olabilir. Özellikle kemer tipi barajlarda temel kaya kütesinin farklı modül değerlerine sahip olması, baraj gövdesi için risk oluşturmaktadır. Kaya kütesinin deformasyon modülü ile baraj gövdesinde kullanılan betonun elastisite modülü arasındaki oran, beton gövdede oluşacak gerilimlerin değerinde belirleyicidir. Beton deformasyon modülü ile kaya kütle deformasyon modülü oranının tüm baraj ekseni boyunca sabit

olması tercih edilir. Kullanılacak betonunun modül değeri ile temeli oluşturan kaya kütesinin modül değeri oranının 16 ve üstünde olması, barajın deformabilitesinin taban kaya kütle tarafından belirlendiğini göstermektedir. Bu oranın 4 ve altına düşmesi durumunda temel kayasının deformabilite üzerindeki etkisinin gittikçe azaldığı görülmüştür. Kullanılacak beton modül değeri ile yapı yükünü taşıyacak olan kaya kütle modül değeri arasındaki etkileşim sadece beton barajlar için değil diğer jeoteknik uygulamalarda da geçerlidir (örneğin köprü ayakları, yüksek binalar) (Wyllie, 1992).

Gerek laboratuvar ve gerekse yerinde deneylerinin yapılması ayrıntılı bir hassasiyet gerektirmektedir. Laboratuvar ve yerinde deneyleri ile kayaç ve kaya kütle özelliklerinin gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için yeterince tecrübeli teknisyen, cihazların standartlara göre üretilmesi, cihaz kalibrasyonlarının doğru yapılması, uygulanan deney programlarının ilgili standartlara uygun olarak yapılması gibi koşullar vardır. Bu koşulların yeterince sağlanamaması nedeniyle, mm ölçeğinde alınan deformasyonlardaki hatalar tüm sonuçları etkileyebilecektir. Yerinde deneylerin yapılacağı kaya ortamında yapılan patlatma işleminin kaya kütenin özelliklerine etkisi olmaktadır. Palmstrom ve Singh (2001) plaka kriko (PJT), plaka yükleme (PLT) ve Goodman kriko deneylerinin uygulanmasında patlatma kaynaklı dezavantajları çalışmışlardır (Şekil 4). Araştırmacılar galerilerde yapılan plaka yükleme deneyi verilerinin patlatma etkisi altında olduğunu ve düşük veriler belirlendiğini tespit etmiş, en sağlıklı ölçümün PJT ile extensometreler ile patlatmadan etkilenen seviyelerden alınmasını önermişlerdir.



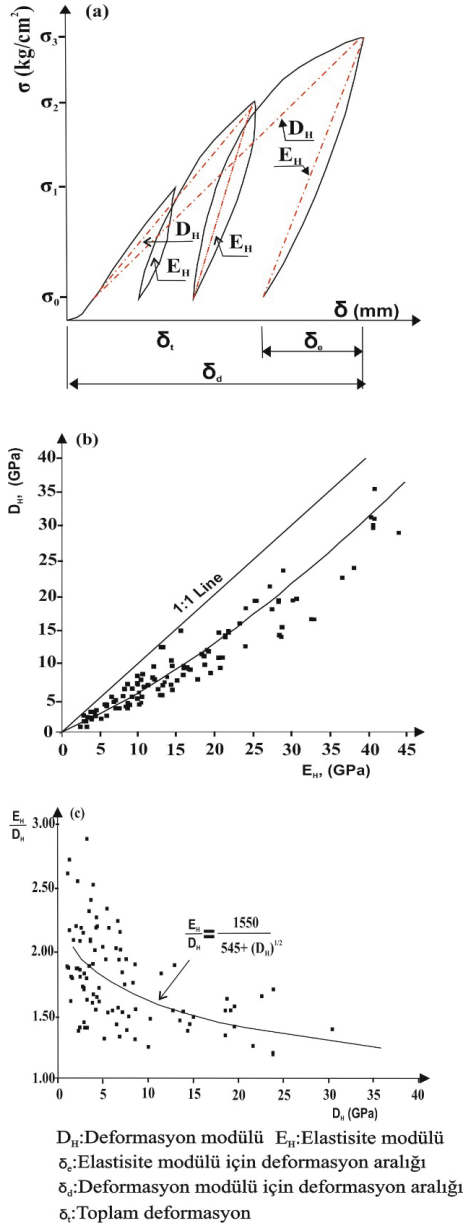
Şekil 4. a) Plaka Kriko Deneyi (PJT) b) Plaka Yükleme Deneyi (PLT) c) Goodman Kriko Deneyi .

Figure 4. a) Plate Jacking Test (PJT) b) Plate Loading Test (PLT) c) Goodman Jacking Test.

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Jeoteknik çalışmalardan belirlenen modüller arasındaki ilişkileri tespit etmek araştırmacıların üzerine düştüğü bir konu olmuştur. Kujundzic ve Grujic (1966)'da Yugoslavya'da kireçtaşlarında yapılan baraj etütlerinde belirlenen yerinde modül değerleri için genelleştirilmiş Eşitlik 2'yi önermişlerdir. Şekil 5a'da ise yerinde deformasyon modülü (D_H) ve yerinde elastisite modülü (E_H) değerlerinin belirlenişini

göstermişlerdir. Burada E_H boşaltma eğrilerinin eğiminden belirlenmiştir. Toplam deformasyon en yüksek yükleme seviyesinden belirlenmektedir. Gerilim seviyesine bağlı olarak D_H değeri değişebilirken E_H değeri sabit kabul edilebilir. Bu nedenle $E_H > D_H$ eşitsizliğinin farklılığı gerilim seviyesine bağlı olarak değişebilir. E_H ve D_H arasındaki farklılık Şekil 5b ve 5c'de net olarak görülmektedir. En geniş eşitsizlik aralığı 1.5 ile 2.5 arasında değişmektedir.



Şekil 5. a) Yugoslavya'da kireçtaşlarında yapılan örnek yükleme-boşaltma deneyi b) D_H - E_H modüllerinin karşılaştırılması c) E_H/D_H - D_H grafiği (Kujundzić ve Grujić, 1966).

Figure 5. a) A sample loading-unloading test performed on Yugoslavia limestones b) comparison of D_H - E_H modules c) E_H/D_H - D_H graph (Kujundzić and Grujić, 1966).

$$E_H \approx \frac{15.50 D_H}{6.45 \sqrt{D_H}} \quad (2)$$

Eşitlik 2'den görüleceği gibi D_H değerinin 5 ve 50 GPa arasında olması durumunda E_H değerinin 8.9 ve 57.5 GPa olduğunu görürüz. E_H ve D_H değerlerinin farklılığının küçük değerlerde daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kaya kütlelerinde var olan süreksizliklerin ve ayrışmanın yükleme ve boşaltma eğrilerine etkisinden kaynaklanmaktadır.

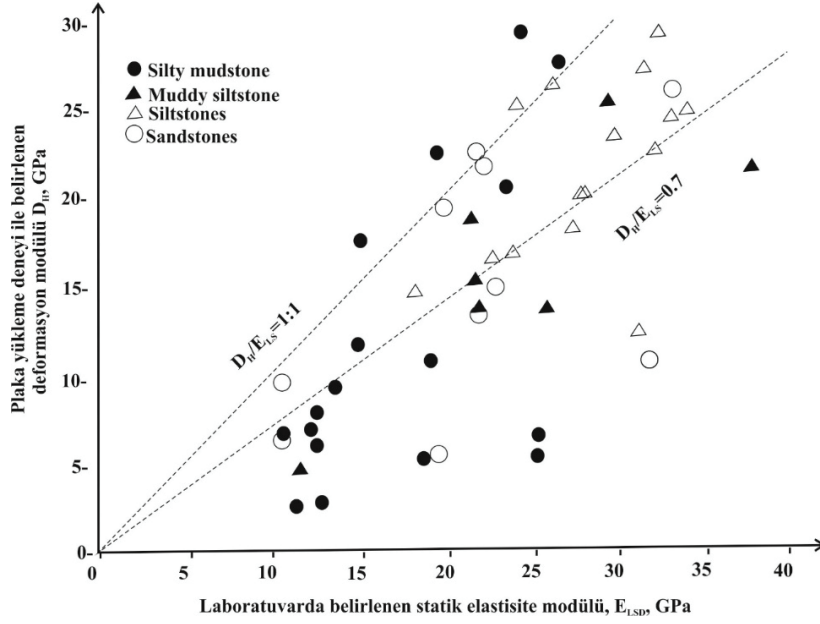
Bieniawski (1978) Güney Afrika Orange Nehri projelerinde yapılan plaka yükleme deneylerinden belirlenen D_H değerleri ile aynı seviyelerden alınan örneklerden laboratuvarında belirlenen E_{LS} değerlerini karşılaştırmıştır (Şekil 6). Dört ayrı kaya kütlelerinde yapılan yerinde deneyler ile laboratuvar deneylerinden belirlenen modül değerleri arasında anlamlı bir bağıntı belirlenmemiştir, E_{LS} modülleri plaka yükleme deneylerinden belirlenen D_H modüllerinden büyük olarak belirlenmiştir.

Kulhawy ve Goodman (1980)'de kaya kütle deformasyon modülünün belirlenmesine yönelik Eşitlik 3'ü önermiştir

$$D = j E_{LS} \quad (3)$$

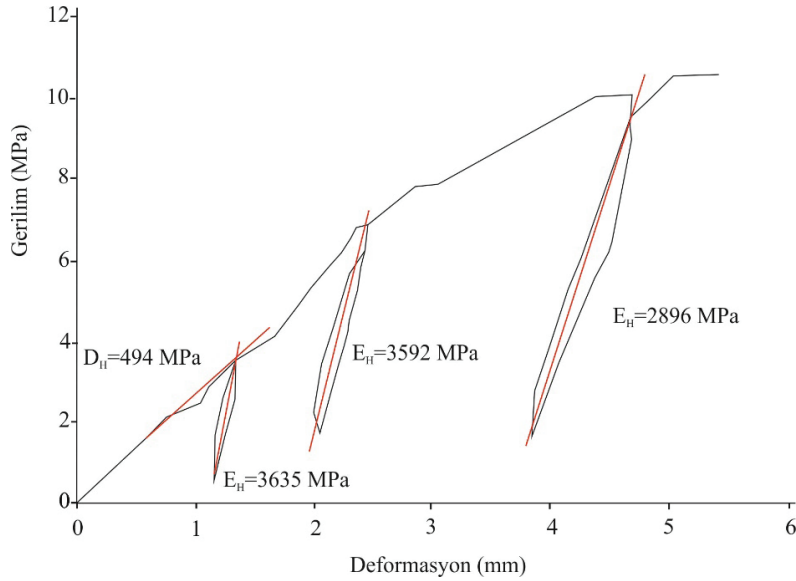
Burada D:kaya kütle deformasyon modülü, j:ortalama süreksizlik aralığı, E_{LS} : sağlam kaya elastisite modülünü ifade etmektedir.

Galera vd. (2005) Fransa'da Penthus tünelinin açıldığı şişt kaya kütlelerinde plaka yükleme deneyi yapmıştır. Çalışmalarından örnek olarak verdikleri plaka yükleme deneyi grafiğinde $E_H/D_H \approx 7$ değerine ulaşmaktadır (Şekil 7).



Şekil 6. Plaka yükleme deneyi ile belirlenen deformasyon modülü (D_H) ile laboratuvarında belirlenen statik elastisite modülünün (E_{LS}) karşılaştırılması (Bieniawski, 1978).

Figure 6. Comparison of the deformation modulus (D_H) determined by plate loading test and the static elasticity modulus (E_{LS}) determined by laboratory tests (Bieniawski, 1978).



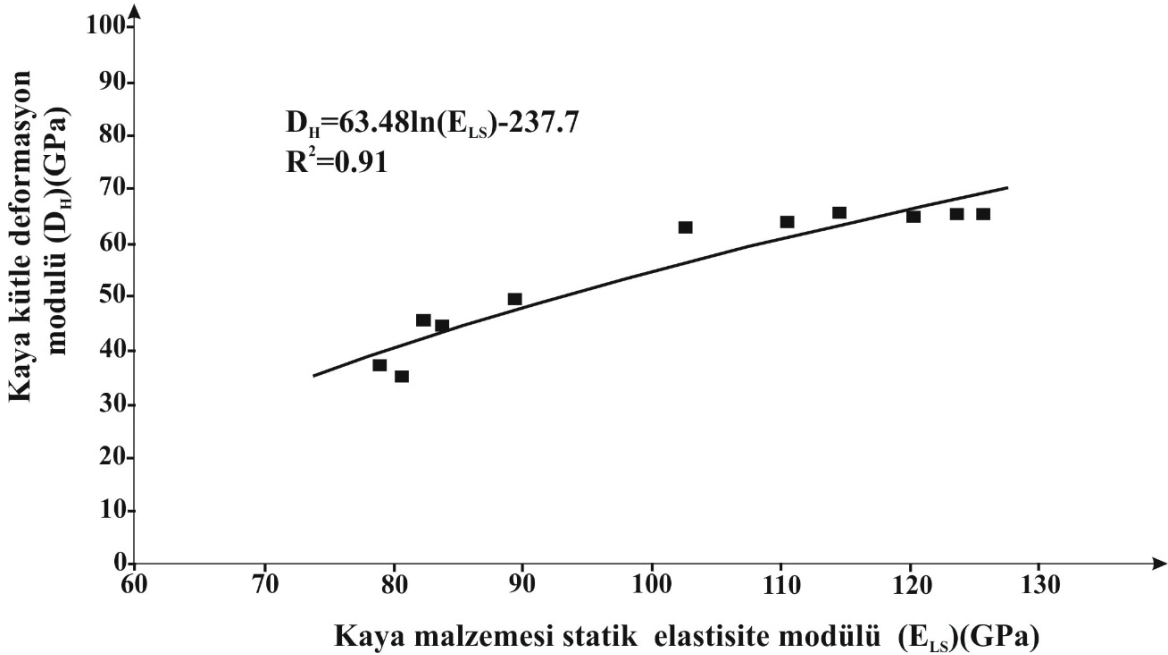
Şekil 7. Penthus tünelinin (Fransa) açıldığı şistlerde yapılan bir plaka yükleme deneyi grafiği (Galera vd., 2005).

Figure 7. A plate loading test graph carried out on schist rock mass of Penthus tunnel (France) (Galera et al., 2005).

Munir (2006), Pakistan'daki Indus nehri üzerinde Khyber Pakhtunkhwa bölgesinde projelendirilen Basha barajı etütlerinde yaptığı doktora tezi çalışmalarında kaya sınıflama sistemleri ile deformasyon modüllerini karşılaştırmıştır. Baraj yeri mafik intrüsiyonlardan dioritlerden oluşmaktadır. Diorit kaya kütlesi açık renkli, çok yüksek dayanımlı ve masiftir. Bu tez çalışmasında Basha baraj sahasında plaka yükleme deneylerinden belirlenen yerinde deformasyon modülleri (D_H) ile yerinde deneylerin yapıldığı litolojilerden alınan kayaç örneklerinden laboratuvarında belirlenen elastisite modülleri (E_{LS}) karşılaştırılmıştır. E_{LS} değerleri ile D_H arasındaki ortalama modül oranı 0.55

olarak belirlenmiştir. E_{LS} değeri devamlı olarak D_H değerinden yüksek çıkmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi E_{LS} - D_H arasında logaritmik bir ilişki ile determinasyon katsayısı $R^2=0.91$ olarak belirlenmiştir.

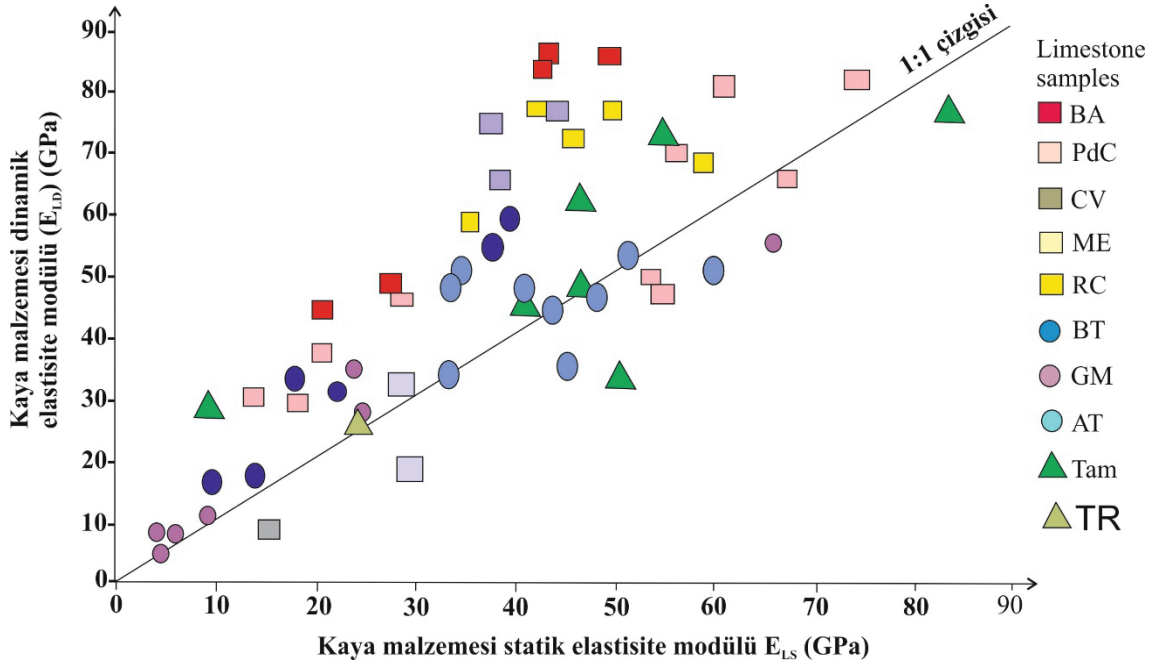
Martínez vd. (2012) bozunmuş ve bozunmamış on ayrı kireçtaşında kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}) ve kaya malzemesi elastisite modüllerini (E_{LS}) belirlemişlerdir. Şekil 9'da E_{LD} ile E_{LS} değerlerinin karşılaştırma grafiği verilmiştir. Her iki değer arasında zayıf bir ilişki vardır. 1:1 çizgisi E_{LD}/E_{LS} değerinin 1 olduğu konumu ifade eder.



Şekil 8. Kaya kütle deformasyon modülü (D_H)-kaya malzemesi statik elastisite modülü (E_{LS}) arasında yapılan regresyon analizi grafiği (Munir, 2006).

Figure 8. The regression analysis graph of the rock mass deformation modulus (D_H) and the intact rock elasticity modulus (E_{LS}) (Munir, 2006).

Kayabaşı



Şekil 9. Kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}) kaya malzemesi ile statik elastisite modülü (E_{LS}) arasında yapılan regresyon analizi grafiği (Martínez vd., 2012).

Figure 9. The regression analysis graph between the intact rock dynamic modulus (E_{LD}) and the intact rock static elasticity modulus (E_{LS}) (Martínez et al., 2012).

$$E_{LD} = \rho_{bulk} V_p^2 \frac{(1 - 2\gamma)(1 + \gamma)}{(1 - \gamma)} \quad (4)$$

Araştırmacılar E_{LD} değerini Eşitlik 4'ten belirlemiştir. Burada ρ = bulk yoğunluk, V_p = P dalgası hızı, ν : poisson oranıdır.

$$E_{LS} = \frac{1}{K} \rho_{bulk} V_p^2 \frac{(1 - 2\gamma)(1 + \gamma)}{(1 - \gamma)} \quad (5)$$

$E_{LD}/E_{LS}=K$ katsayısı ile tanımlanması durumunda olarak ifade edilmiştir. $K>1$ olması durumunda E_{LD} değeri gerçek değerinden fazla tahmin edilirken, $K<1$ olması durumunda E_{LD} gerçek değerinden az tahmin edilir. Bu çalışmada K katsayısı 0.5 ile 2.1 arasında belirlenmiştir. Ciccotti ve Mulargia (2004) K katsayısının 1-1.3

arasında belirlerken, Al-Shayea (2004) ise K katsayısını 0.85-1.86 arasında olmasını ifade etmişlerdir.

Brotons vd. (2014) değişik sıcaklıkta ısıtılan sedimanter kayaların dinamik ve statik modülleri arasında iki analitik görgül ilişki geliştirmişlerdir. Araştırmacılar aynı zamanda bu konuda daha önce önerilen görgül eşitliklerin performansını da test etmişlerdir. Geliştirilen bu görgül eşitlikler ile İspanya'nın Alicante şehrindeki bulunan tarihi binaların yapımında kullanılan San Juliáns taşlarının dinamik elastisite modülü değerinden statik elastisite modülü değerini tahmin etmişlerdir. Bu yöntemle tarihi yapılardan karot almayarak, yapılara zarar vermemişlerdir. Araştırmacılar, K katsayısının (E_{LD}/E_{LS}) yüksek modüllü kayalarda bire yaklaştığını ifade etmiştir. Düşük

modüllü kayalarda K katsayısının birden fazla olabileceğini bunun nedeninin ise statik elastisite modülünün hacim, oryantasyon ve çatlakların dağılımından etkilendiğini, dinamik elastisite modülünün bu tür fiziksel özelliklere karşı düşük hassasiyette olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

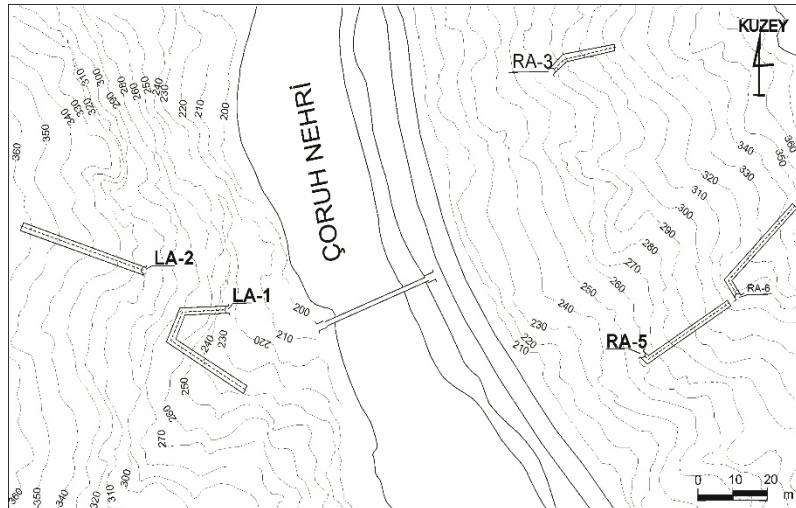
DERİNER/ARTVİN VE ERMENEK/ KARAMAN BARAJ YERLERİNDEN ÖRNEKLER

Deriner (Artvin) Barajı Plaka Yükleme Deneyi Çalışmaları

Deriner Barajı ve çevresi gri, pembemsi kuvarsdioritlerden oluşur. ISRM (1981)'e göre süreksizlik aralığı orta ve geniştir. Süreksizlik açıklıkları ise kapalı veya kısmen açıktır. Süreksizlik açıklıklarında kuvars dolgu vardır. Süreksizlik yüzeyleri genelde pürüzlü ve az ayrılmıştır. Deriner Barajı araştırmalarında

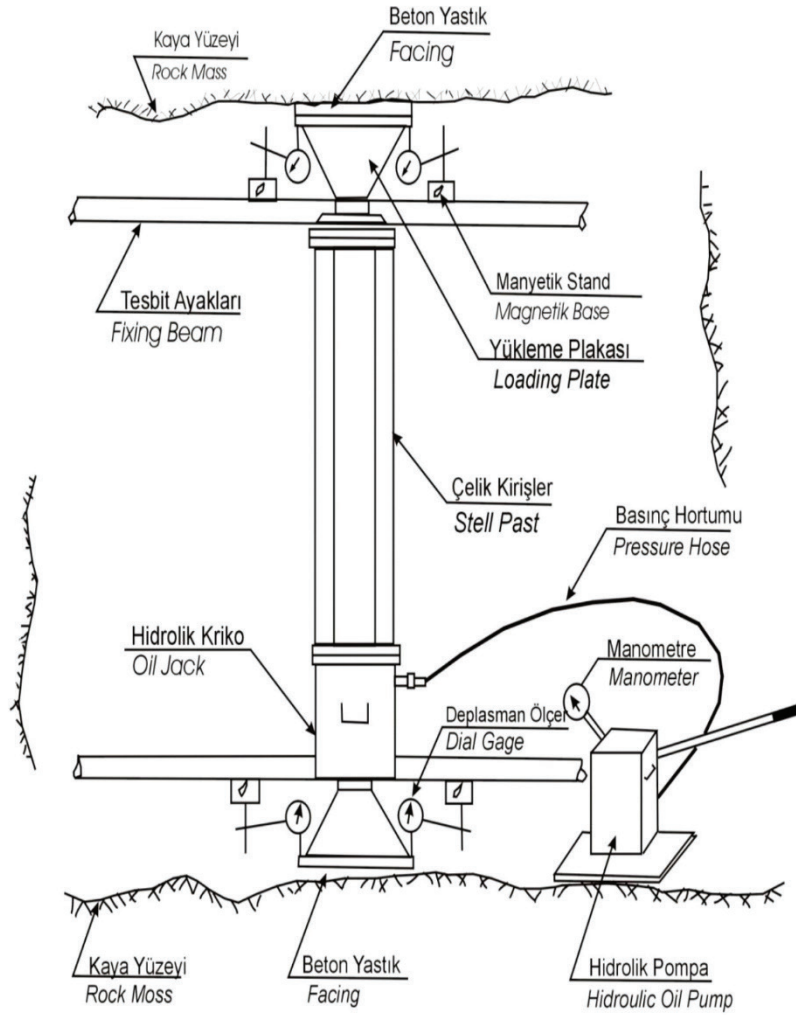
açılan galerilerde 48 adet galeri içi plaka yükleme deneyi (Narin vd., 1986) ve bu galeriler içinde açılan sondaj kuyularında 23 adet Oyo 200 dilatometresi deneyi yapılmıştır (Kaya ve Kayabaşı, 1992), (Şekil 10).

Plaka yükleme deneyi, ortalama kesitli galeriler içerisinde anizotropi etkisini azaltmak için deney galerisinin eksenine paralel ya da dik olacak şekilde yatay ve düşey yönde yükleme uygulanarak yapılmıştır (ASTM D4394, 2017). Bu çalışmada deneyde uygulanan yükler "MPa" ve oluşan deformasyonlar "mm" cinsinden belirlenmiştir. Yükleme sırasında, 0.5 MPa'lık bir yükleme 1 dakika süresince verilmiş ve bunu takip eden süre sonunda okumalar alınmıştır. Aynı şekilde 2 dakikalık zaman sürecinde yük düşürülerek okuma yapılmıştır. Maksimum gerilim 6.5 MPa olarak alınmıştır. Deneyler yatay ve düşey yönlü yapılmıştır. Deformasyon ölçümleri her plaka çevresindeki 3 adet deformasyon göstergesi tarafından alınmıştır (Şekil 11).



Şekil 10. Deriner (Artvin) barajı yerinde galeri lokasyon haritası.

Figure 10. Location map of galleries at the Deriner (Artvin) dam site.

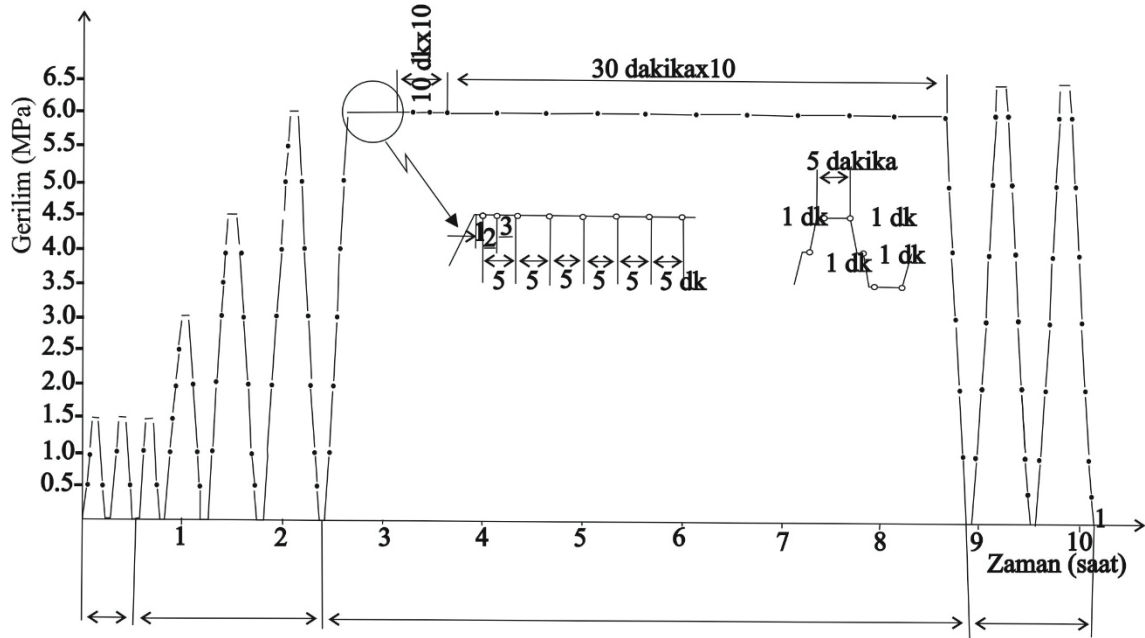


Şekil 11. Düşey yönlü plaka yükleme deneyi şematik görünümü (EİE-122, 1992).

Figure 11. Schematic view of vertical plate loading test (EİE-122, 1992).

Galeri içerisinde plaka yükleme deneyi için değişik deney programları vardır. Yükleme-

zaman uygulamaları zemine bir program dahilinde uygulanmıştır (Şekil 12).

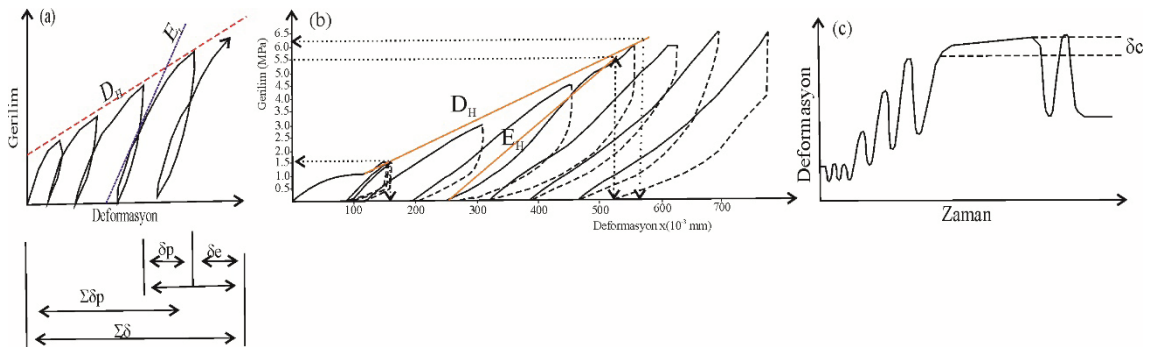


Şekil 12. Plaka yükleme deneyi için gerilim-zaman programı (Narin vd., 1986).

Figure 12. Stress-time program for plate loading test (Narin et al., 1986).

Deney sonunda oluşan deformasyon-basınç ve zaman-deformasyon grafikleri üzerinden şematik olarak da gösterilen toplam deformasyon (δ), elastik deformasyon (δ_e), plastik deformasyon (δ_p), kümülatif toplam deformasyon ($\Sigma\delta$),

kümülatif plastik deformasyon ($\Sigma\delta_p$) ve akma deformasyonu (δ_c), deformasyon modülü (D_H), tanjant elastisite modülü (E_t) ve sekant elastisite modülü (E_s) hesaplanır (Şekil 13).



Şekil 13. Plaka yükleme deneyi a) gerilim-deformasyon grafiği b) örnek deneyde deformasyon modülü ve elastisite modülünün belirlenmesi c) deney programına göre uygulanmış deformasyon-zaman grafiği (Narin vd., 1986).

Figure 13. Plate loading test a) stress-deformation graph b) determination of deformation modulus and elasticity modulus from a sample test c) deformation-time graph applied according to test programme (Narin et al., 1986).

Kayabaşı

Şekil 13 b'de örnek bir plaka yükleme deneyinden elastisite modülü ile deformasyon modülü belirlenmesine yönelik teğet eğrilerle aşağıdaki işlemlerle elastisite modülü ve deformasyon modülü belirlenir.

$$E_H = \pi a (1 - \gamma^2) / 2 \cdot (\Delta \sigma / \Delta \delta_{et}) = (3.14 \times 17.75 \times (1 - 0.25^2) / 2) \times (5.5 / (536 - 246)) = 4.85 \text{ GPa} \quad (6)$$

$$D_H = \pi a (1 - \gamma^2) / 2 \cdot (\Delta \sigma / \Delta \delta_d) = (3.14 \times 17.75 \times (1 - 0.25^2) / 2) \times (4.5 / (561 - 162)) = 2.88 \text{ GPa} \quad (7)$$

Yukarıdaki eşitliklerde

a = Yükleme plakası yarı çapı (17.75 cm)

γ = Poisson oranı (Bu oran laboratuvar deneyleri ile bulunabileceği gibi kabule dayalı da olabilir : ($\gamma=0.25$)

$\Delta \sigma$ = Basınç artış farkı (MPa)

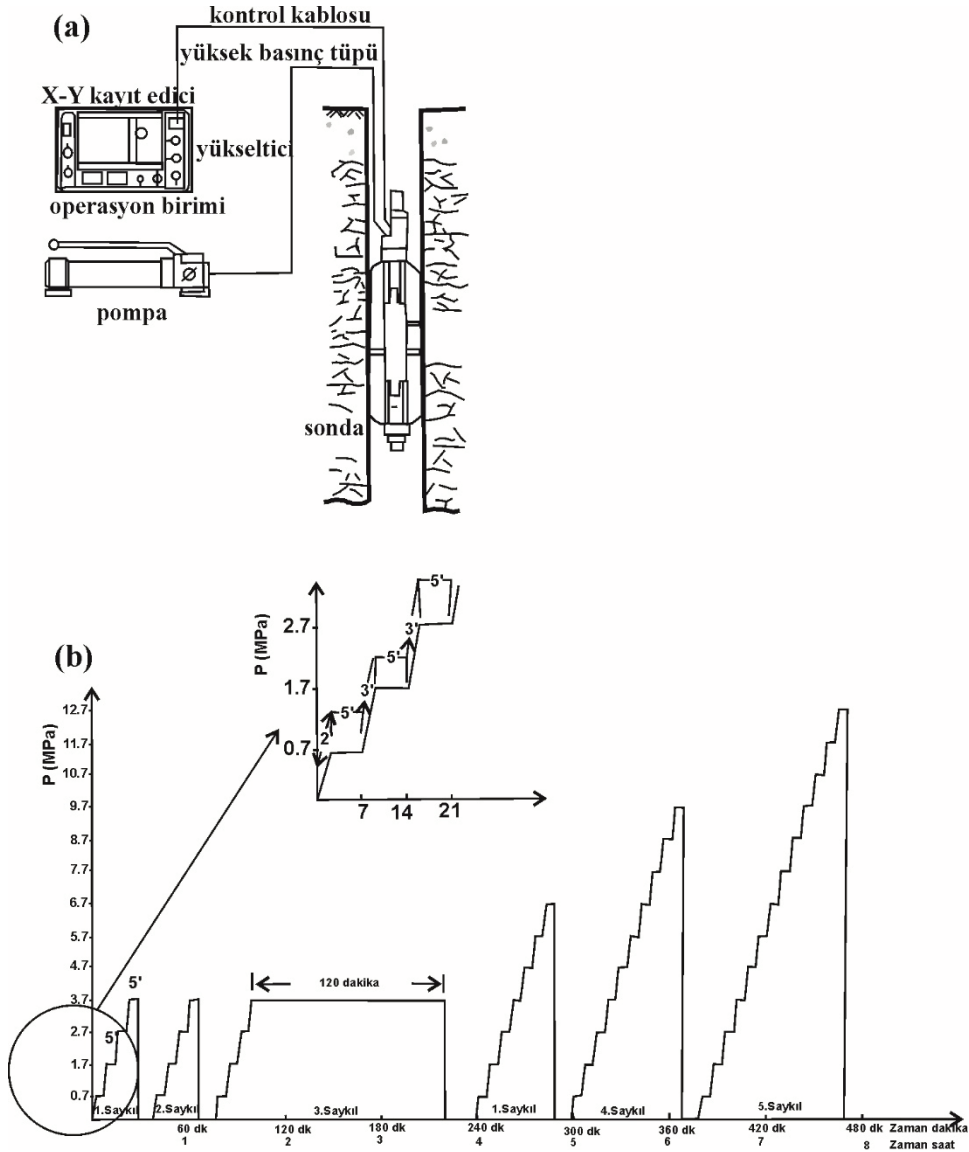
$\Delta \delta_{et}, \Delta \delta_d$ = Basınç artış farkına bağlı deformasyon artış farkları (mm)

Oyo 200 Dilatometresi (Elastmeter 200) deneyi, baraj, tünel, köprü ayağı gibi yapıların temelini oluşturan kaya kütlelerinin elastik modüllerinin (E, D), akma dayanımının (P_y), kırılma dayanımının (P_{max}), zemin sabitinin (k) ve deformasyon özelliklerini belirlemede kullanılır. Oyo 200 Dilatometre deneyi Elektrik İşleri Etüt İdaresinin hazırladığı deney normuna göre yapılmıştır (EİE-124, 1992; ASTM 477, 1970). Deney kuyu içinde sondanın basınç yüklenmesiyle yapılır (Şekil 14). Yükleme hızı uygulamada 0.1-1 MPa/cm/dakika arasında

değerler olarak alınmaktadır. Genel bir kural olarak zayıf kayalar daha yavaş, sağlam kayalar daha hızlı yüklenebilir. Şekil 14'de görüleceği gibi üç kez 3.4 MPa yükleme yapılmış, üçüncü yükleme sonunda iki saat bekleme yapıldıktan sonra yük boşaltılmış sonra 6.4 MPa, 9.4 MPa ve 12.4 MPa yükleme ve boşaltma yapılarak deneye son verilmiştir. Deneyin her yükleme için 2 dakika süre sonrasında yüklemeye 5 dakika beklenecek deformasyon kayıtları alınmıştır.

Deriner Baraj Yeri Modül Değerlendirmeleri

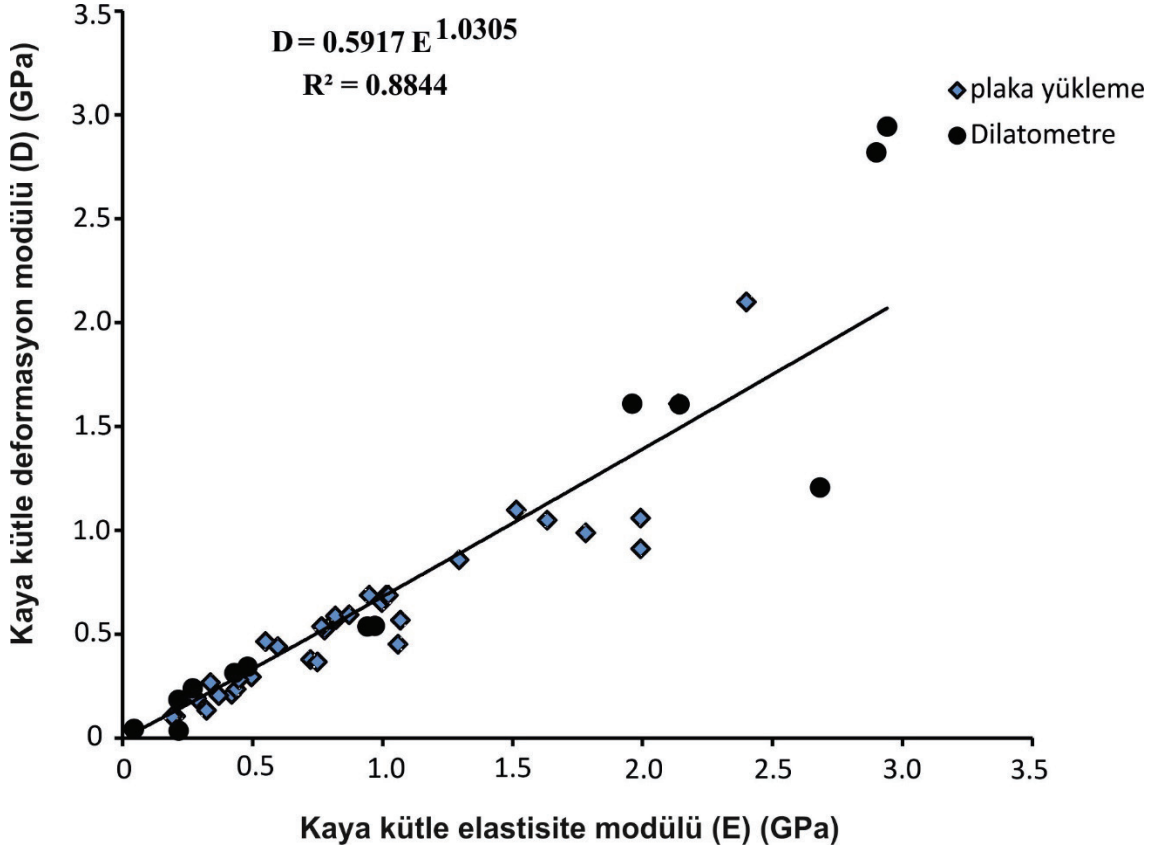
Galeri içi plaka yükleme deneyleri ve galeri içlerinde yapılan dilatometre deneyleri sonuçları değerlendirilmiştir. Bu yükleme deneylerinden belirlenen deformasyon modülleri ile elastisite modülleri arasında yapılan regresyon analizinde üs fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.88 belirlenmiştir (Şekil 15). Örnekeyecek olursak Elastisite modülü (E)=0.5 MPa olması durumunda, deformasyon modülü (D)=0.3 MPa olacaktır. E ve D modül değerlerinin küçük değerlerde birbirlerine oransal olarak yakın olduğu fakat her iki değer yüksekliğinde durumlarında saçılmaların arttığı gözlenmektedir. Kaya kütledeki süreksizliklerin kapanması ve kaya kütlelerinin dayanımının litolojik dayanıma bağlı kaldığı durumda tek bir döngüdeki düşük deformasyon aralığı E modül değerini yüksek belirlerken, birkaç döngü eğiminden belirlenen D modül değerinin daha düşük olmasına neden olacaktır. Bu farklılık, yüksek gerilimlerde belirlenen E modül ve D modül değerlerinde daha fazla belirgindir.



Şekil 14. a) Dilatometre deneyi cihazları şematik görünümü, b) Deriner baraj yeri dilatometre deneyi yükleme programı.

Figure 14. a) Schematic view of dilatometer test equipment, b) loading programme of dilatometer test applied at Deriner dam site.

Kayabaşı



Şekil 15. Kaya kütle elastisite modülü (E) ve Kaya kütle deformasyon modülü (D) arasındaki eşitliği gösteren grafik.

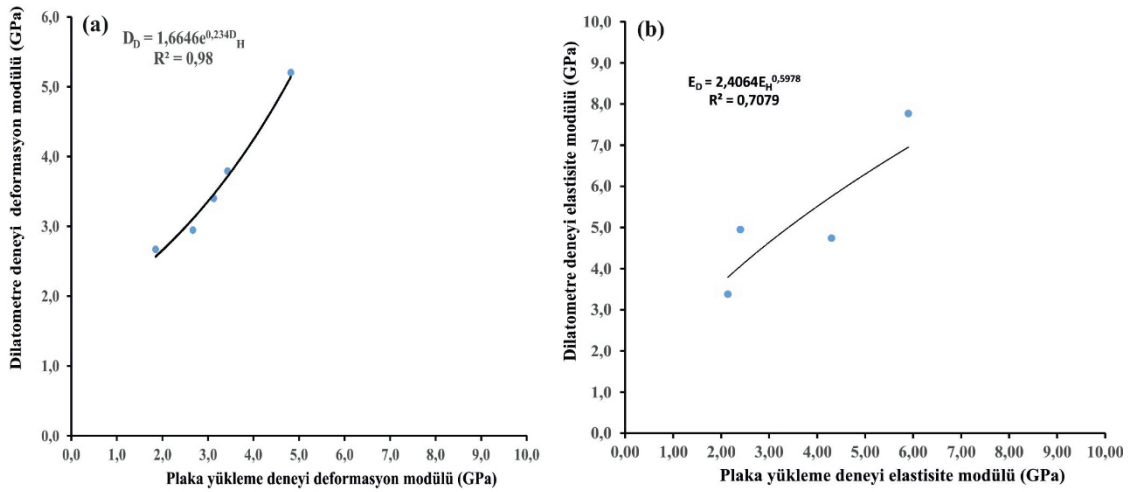
Figure 15. Graph showing the relation between rock mass elasticity modulus (E) and rock mass deformation modulus (D).

Deney lokasyonları birbirine çok yakın 6 adet plaka yükleme deneyi ve dilatometre deneyi belirlenmiş ve bu deneylerden hesaplanan modüller arasında regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 16). Bu analizde kullanılan veri sayısının az olmasının nedeni plaka yükleme ve dilatometre deneylerinin yapıldığı lokasyonların çok yakın olmasının şartının aranmasıdır. Deney lokasyonları arasındaki mesafe olarak fazla olması, deneyin yapıldığı yön farklılığı, kaya kütle anizotropisi gibi faktörler sonucu etkileyecektir. Şekil 16a'da plaka yükleme deneyi deformasyon modülleri ile dilatometre deneylerinden belirlenen deformasyon modülleri arasında

yapılan regresyon analizinde üstel fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.98 belirlenmiştir. Determinasyon katsayısının yüksek olması, her iki deneyde de belirlenen modül değerlerinin birbirinden çok farklılıklar göstermediği görülmektedir. Şekil 16a'da görüleceği gibi 5 adet veri karşılaştırılmıştır. Çizelge 1'de verilmiş olan SK 9E deneyinden belirlenen modül değerleri ($D_D=12.07$ GPa ve $D_H=1.91$ GPa) uyumluluk göstermediği için regresyon analizine alınmamıştır. Şekil 16b'de ise plaka yükleme deneyi elastisite modülleri ile dilatometre deneylerinden belirlenen elastisite modülleri arasında yapılan regresyon analizinde

üs fonksiyonu ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.71 belirlenmiştir. Şekil 16b'de görüleceği gibi 4 adet veri karşılaştırılmıştır. Çizelge 1'de verilmiş olan SK 9E deneyinden belirlenen modül değerleri (E_D =26.83 GPa ve E_H =5.83 GPa) ile SK-12 deneyinden belirlenen modül değerleri (E_D =4.80 GPa ve E_H =0.82 GPa) değerleri uyumluluk göstermediği için regresyon analizine alınmamıştır. SK 9E ve SK-12 kuyularının olduğu galeri bölümünün açımı sırasında patlatmadan daha çok hasar aldığı ve elastisite modüllerinin daha çok saçılım yapması, verilerin daha net farklılık göstermesinden elastisite modülünün, deformasyon modülüne göre daha hassas olduğunu söyleyebiliriz. Bunun nedeni ise elastisite modülünün tek bir döngüden belirlenirken, deformasyon modülünün birkaç döngüden belirlenmesidir.

Deriner Baraj yerinden alınan örneklerden laboratuvarında belirlenen E_{LD} ve E_{LS} modüllerinin regresyon analizi sonucu Şekil 17a'da verilmiştir. Logaritmik fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.52 belirlenmiştir. Regresyon analizi eşitliğinden de görüleceği gibi E_{LD} değerleri devamlı olarak E_{LS} değerlerinden fazla çıkmaktadır. E_{LS} değerinin 20 olması durumunda E_{LD} değeri 36 olmaktadır. K değeri (E_{LD}/E_{LS})=1.8 olur. E_{LS} değerinin 50 olması durumunda E_{LD} değeri 56.87 olmaktadır. K değeri (E_{LD}/E_{LS})=1.14 olur. E_{LD} ve E_{LS} değerlerinin artışıyla K değerinin 1'e yaklaşmasını kayca malzemede bozunma derecesinin azalmasından kaynaklanmakta olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 16. a) Plaka yükleme deneyi deformasyon modülü ile dilatometre deneyi deformasyon modülünün karşılaştırılması b) Plaka yükleme deneyi elastisite modülü ile dilatometre deneyi elastisite modülünün karşılaştırılması.

Figure 16. a) Correlation of plate loading test deformation modulus and dilatometere test deformation modulus b) Correlation of plate loading test elasticity modulus and dilatometere test elasticity modulus.

Kayabaşı

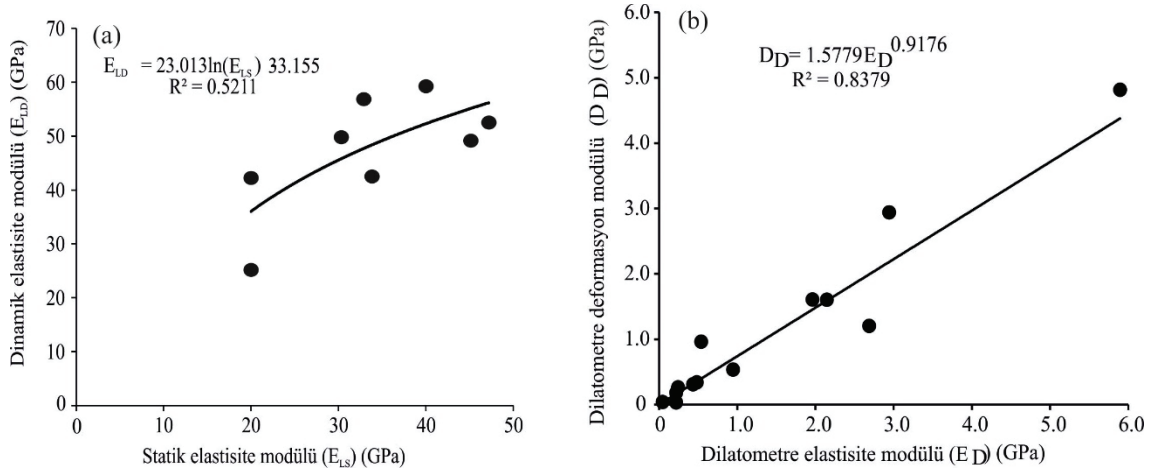
Çizelge 1. Deriner baraj yerinde farklı deneylerle belirlenen modüller.

Table 1. Modules determined by means of different tests at Deriner dam site.

Kuyu no	Galeri	Deney zonu (m arası)	Litoloji	Elastisite modülü (GPa)				Deformasyon modülü (GPa)	
				E_D	E_H	E_{LS}	E_{LD}	D_D	D_H
	LA-1								
SK-1	7.30 m düşey	2-3	Kuvars diyorit	2.40	4.95			2.67	2.96
SK-2	24.20 düşey	2-3	Diyabaz	5.90	7.77	47.19	52.54	48.20	52.02
SK-2E	24.20 m sağ-yatay	7-8	Kuvars diyorit	19.60		40.00	59.27	16.10	
SK-3E	45.00 m Sağ yatay	7-8	Diyabaz	9.42		33.83	42.52	53.80	
SK-6	21.50 m düşey	2-3	Kuvarslı diyorit	53.60		20.00	25.16	9.65	
	LA-4								
SK-7	46.00 m düşey	7-8	Fay zonu	4.30		47.78	44.00		
SK-7A	45.50 m So-yatay	7-8	Fay Zonu	2.15		61.39	49.16	0.36	
SK-9	21.70 m düşey	2-3	Kuvars diyorit	2.14	3.38			1.85	2.67
	RA-3								
SK-9E	24.20 Sol-yatay	2-3	Kuvars diyorit	26.83	5.93	20.00	42.22	12.07	1.91
	RA-5								
SK-11E	45.00 sağ-yatay	7-8	Kuvars diyorit	21.43		3.00	49.82	16.07	
SK-12	51.70 düşey	2-3	Kuvars diyorit	4.80	0.82		3.60	3.43	3.79
SK-12	51.70 düşey	7-8	Kuvars diyorit	29.41		3.29	56.87	29.44	
SK-12E	54.30 sağ-yatay	2-3	Kuvars diyorit	4.30	4.74			3.13	3.40

Şekil 17b'de ise Deriner Baraj yerinde yapılan dilatometre deneylerinden belirlenen kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D) ile kaya kütle dilatometre elastisite modülü (E_D) değerleri arasında yapılan regresyon analizi sonucu verilmiştir. Üs fonksiyon ile en yüksek

determinasyon katsayısı (R^2)=0.84 belirlenmiştir. Kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D) kaya kütle dilatometre elastisite modülü (E_D) arasındaki farkın düşük değerlerde kapandığı, yüksek değerlerde ise farkın açıldığı görülmektedir.



Şekil 17. a) Kaya malzemesi statik elastisite modülü ile kaya malzemesi dinamik elastisite modülü arasında yapılan regresyon analizi grafiği b) dilatometre elastisite modülü ile deformasyon modülü arasında yapılan regresyon analizi grafiği.

Figure 17. a) regression analysis graph between static elasticity and dynamic elasticity modulus b) regression analysis graph between dilatometer elasticity modulus and dilatometer deformation modulus.

Ermenek (Karaman) Barajı Dilatometre Deneyi Çalışmaları

Ermenek Barajı için Erikli deresi civarında yapılması projelendirilen yeraltı santrali temel sahasında SK-126 (50 m), SK-127 (80 m) ve SK-131 (70 m) kuyuları açılmıştır. (Kaya ve Kayabaşı, 1998). Bu kuyulardan üçünde toplam 20 adet dilatometre deneyi yapılmıştır (Şekil 18).

Dilatometre deneyleri üç kez 3.4 MPa, üç kez 6.4 MPa ve üç kez 9.4 MPa yükleme boşaltma döngüleri halinde yapılmıştır. Her yükleme 2 dakikalık yükleme ve 3 dakikalık bekleme süreciyle yapılmıştır (Şekil 19).

Dilatometre eğrileri üzerinde eğim ölçümleri yapılarak deformasyon modülü ve elastisite modülü Eşitlik 6 ile belirlenir.

$$E_D \text{ veya } D_D = (1 + \mu)r_m \frac{\Delta P}{\Delta r} \quad (6)$$

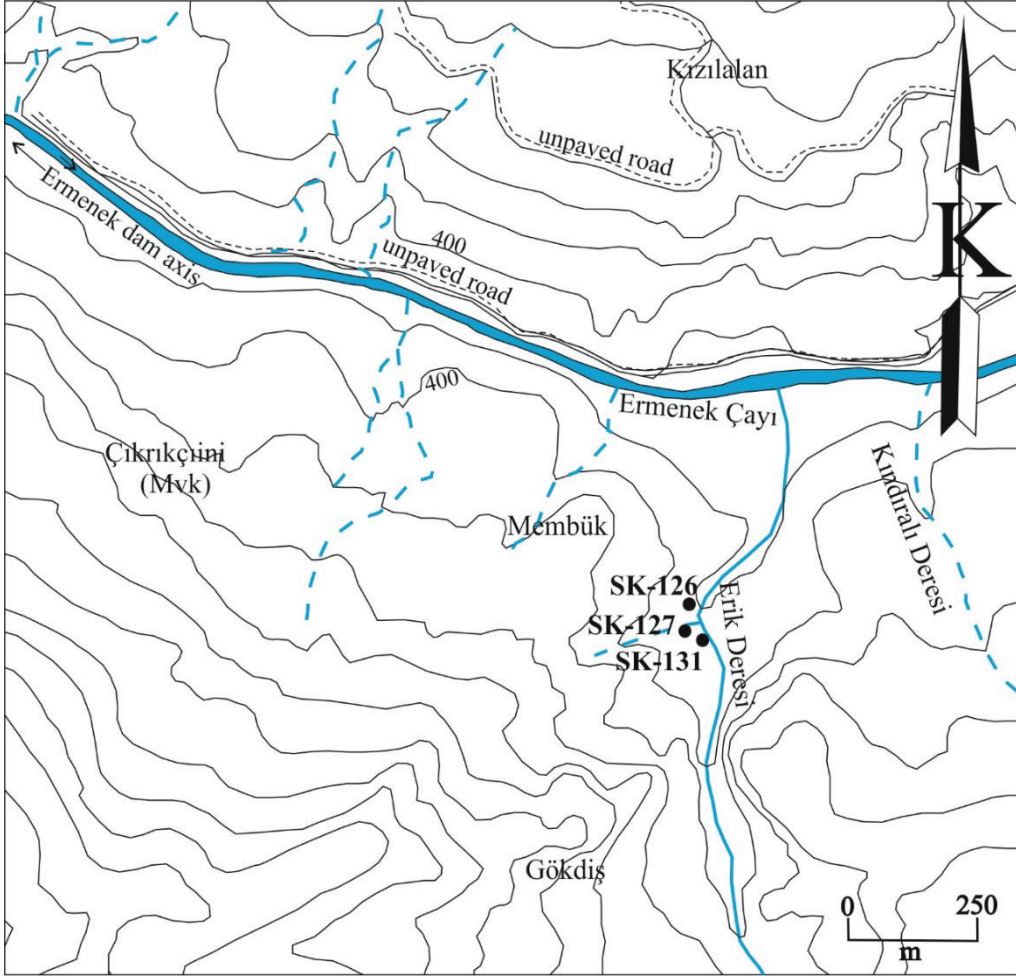
Burada

r =kuyu çapı

r_m =kuyu yarıçapı+ $\Delta r/2$

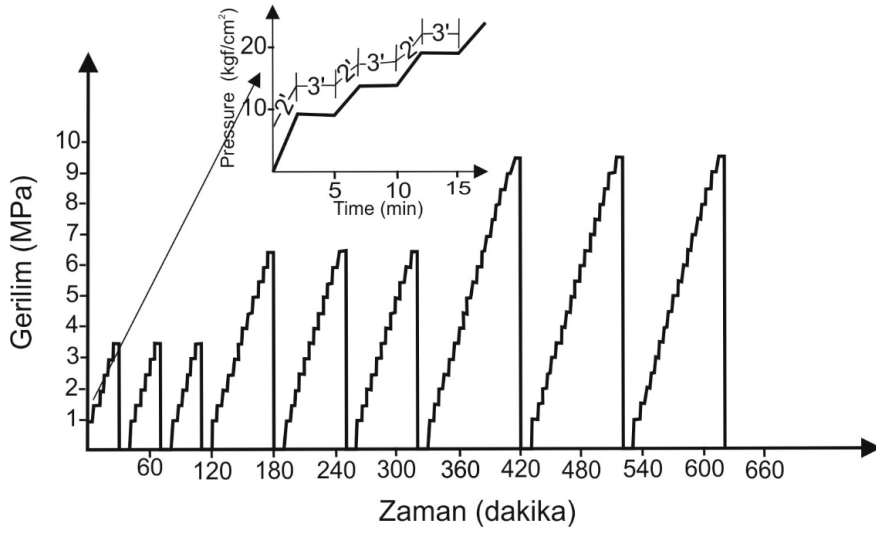
μ =Poisson oranı

Şekil 20'de SK-126 nolu kuyunun 18.30-19.30 metrelerinde yapılan dilatometre deneyi grafiği ve teğet modül çizgileri görülmektedir. Çizelge 2'de ise deney verilerinin değerlendirilmiş sonuçları verilmektedir. Deformasyon modülü değerleri, elastisite modüllerinden fazla çıkmaktadır ve hesaplandığı yükleme ve boşaltma eğrilerine göre değerleri değişmektedir.



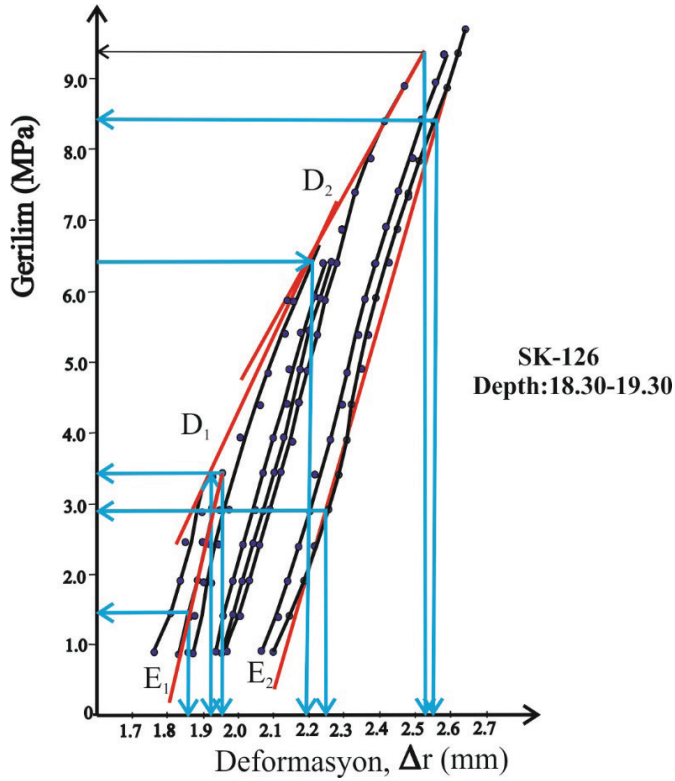
Şekil 18. Ermenek (Karaman) Barajı santral yeri sondaj kuyusu lokasyon haritası.

Figure 18. Powerhouse borehole location map of Ermenek dam (Karaman).



Şekil 19. Ermenek (Karaman) Barajı santral yeri dilatometre deneyi programı.

Figure 19. Ermenek dam site dilatometer test programme.



Şekil 20. SK-126 kuyusunda yapılan dilatometre deneyi grafiği.

Figure 20. Dilatometer test graph performed in borehole SK-126.

Kayabaşı

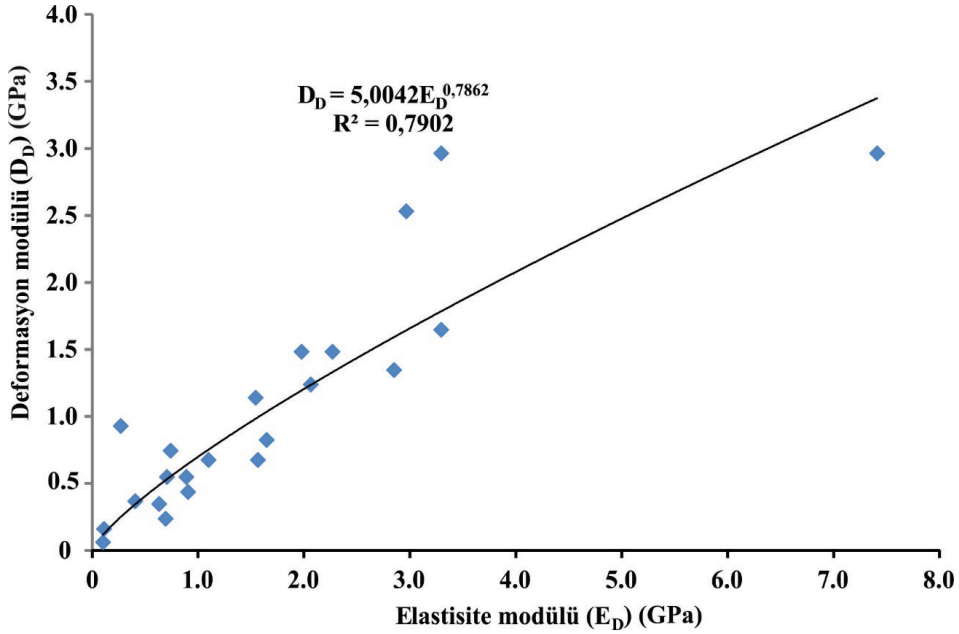
Çizelge 2. Ermenek Barajı santral yeri dilatometre deneyi örnek deney verisi.

Table 2. Dilatometer test sample data from Ermenek dam powerhouse site.

Kuyu no	Derinlik	P_1 (MPa)	P_2 (MPa)	r_1	r_2	Δp (cm)	Δr (cm)	rm (cm)	Modül (MPa)
SK-126	18.30- 19.30	1.4	3.4	0.187	0.198	20	0.011	3.80	$E_1=8.981$
		2.9	8.4	0.225	0.255	55	0.035	3.80	$E_2=9.056$
		3.4	6.4	0.192	0.219	30	0.027	3.80	$D_1=5.489$
		6.4	9.4	0.219	0.253	30	0.034	3.80	$D_2=4.358$

Ermenek Barajı santral yeri dilatometre deneylerinden belirlenen deformasyon modülleri ile elastisite modülleri arasında yapılan regresyon analizinde üs fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.79 belirlenmiştir (Şekil 21). Örnekleyecek olursak $E_D=0.5 \text{ kg/cm}^2$ olması durumunda $D_D=0.310 \text{ MPa}$ olacaktır. D_D ve E_D değerlerinin küçük değerlerde birbirlerine oransal olarak yakın olduğu fakat her iki değer in yükselmesi durumunda saçılmaların daha fazla olduğu görülmüştür.

Çizelge 3'te kaya malzemesinde ve kaya kütlelerinde yapılan deneylerden belirlenen modüller arasında gerçekleştirilen regresyon analizleri sonuçları ve belirlenen görgül eşitlikler verilmiştir. En yüksek determinasyon katsayısı ($R^2=0.98$) Deriner Barajı eksen yerinde galeri içlerinde yapılan dilatometre deneyinden belirlenen deformasyon modülü ile plaka yükleme deneylerinden bulunan deformasyon modüllerinin karşılaştırılması sonucunda üstel fonksiyonla belirlenmiştir.



Şekil 21. Dilatometre deneyinden belirlenen D_D ile E_D değerleri arasında yapılan regresyon analizi grafiği.

Figure 21. The regression analysis graph of D_D and E_D determined by dilatometer tests.

Çizelge 3. Bu çalışmada belirlenen görgül eşitlikler.

Table 3. Empirical equations determined in this study.

Parametre	lokasyon	Deney adı	Görgül eşitlik	Determinasyon katsayısı (R ²)
D _H , E _H	Deriner Barajı	Plaka yükleme deneyi, Dilatometre deneyi	$D_H=0.5917(E_H)^{1.0305}$	0.88
D _D , D _H	Deriner Barajı	Dilatometre deneyi	$D_D=1.6646e^{0.2340(D_H)}$	0.98
E _H , E _D	Deriner Barajı	Dilatometre ve plaka Yükleme deneyi	$E_H=2.4064D_H^{0.5978}$	0.71
E _{LD} , E _{LS}	Deriner Barajı	Statik elastisite modülü ve dinamik elastisite modülü tayini	$E_{LD}=23.013\ln(E_{LS})-33.155$	0.52
D _D , E _D	Deriner Barajı	Dilatometre deneyi	$D_D=1.5779(E_D)^{0.9176}$	0.84
D _D , E _D	Ermenek Barajı	Dilatometre deneyi	$D_D=5.0042(E_D)^{0.7862}$	0.79

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Deriner Barajı/Artvin ve Ermenek Barajı/Karaman'da yapılan yerinde deneylerden belirlenen kaya kütle modülleri ve laboratuvar deneylerinden belirlenen dinamik ve statik modül değerleri tanımlanmıştır. Deney yöntemlerine göre modüller birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Bununla birlikte, projeler hazırlanırken modüller yanlış olarak birbirinin yerine kullanılabilir. Kaya kütle deformasyon modülü ve kaya kütle elastisite modülü yerinde deneylerle belirlenirken, kaya malzemesi statik elastisite modülü ve kaya malzemesi dinamik elastisite modülü ise laboratuvar deneyleriyle belirlenir. Laboratuvarda belirlenen kaya malzemesi statik elastisite modülü kaya malzemesi dayanımının karşılaştırılmasıyla, kaya malzemesinin sınıflandırılması yapılmaktadır (Deere ve Miller, 1966). Kaya malzemesinin kaya kütleyici tam olarak tanımlayıcı olmaması, yerinde deneylerin yapılmasına yol açmıştır. Deformasyon modülü terimi yük deformasyon eğrisinin elastik ve kalıcı deformasyon her iki kısmı da kapsar iken

elastisite modülü terimi elastik sınırları kapsar (Goodman, 1989). Kaya kütle deformasyon modülü değerleri projelendirmelerde yapı ile temel etkileşimlerinin belirlenmesinde girdi parametresi olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada anlatım karmaşası olmaması için belirlendiği deneyin adı modül adı önüne yazılarak simgelenme yapılarak, kaya kütle dilatometre deneyi elastisite modülü (E_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi elastisite modülü (E_H), kaya malzemesi statik elastisite modülü (E_{LS}), kaya malzemesi dinamik elastisite modülü (E_{LD}), kaya kütle dilatometre deformasyon modülü (D_D), kaya kütle plaka yükleme deneyi deformasyon modülü (D_H) şeklinde ifade edilmiştir. Modüller arasında regresyon analizleri yapılarak korelasyon katsayıları ve aralarındaki fonksiyonel ilişkiler belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında Deriner barajında açılan galerilerde yapılan dilatometre ve plaka yükleme deneylerinden birbirine yakın olan deneylerden E_D, E_H, D_D, D_H değerleri ile bu deneylerin lokasyonlarında alınan kaya malzemelerinden laboratuvarda belirlenen E_{LS} ve

E_{LD} değerleri ile Ermenek Barajı/Karamanda yer altı santrali temel etüdü için yapılan dilatometre deneylerinden belirlenen D_D ve E_D değerleri derlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında tüm kaya modülleri arasında basit regresyon analizleri yapılmıştır. Deriner Baraj'ında yapılan plaka yükleme ve dilatometre deneylerinden belirlenen deformasyon modülü ve elastisite modülü değerleri arasında üs fonksiyon ile $R^2=0.88$ determinasyon katsayısı belirlenmiştir. Elastisite modülü ve Deformasyon modülü değerlerinin küçük değerlerde birbirlerine oransal olarak yakın olduğu fakat her iki değerün yükselmesi durumunda saçılmaların arttığı belirlenmiştir. Kujundzic ve Grujic (1966)'da E_H ve D_H değerlerinin farklılığının küçük değerlerde daha fazla olduğunu ifadesi bu çalışmada gerçekleşmemiştir. Galera vd. (2005) in önerdiği $E_H/D_H \approx 7$ değerine bu çalışmada ulaşılammıştır. Bu çalışmada $E/D=1.46$ değeri bulunmuştur.

Deriner barajı araştırma galerilerinde aynı yüzeyde yapılan 6 adet deneyin D_D ve E_H deney verileriyle yapılan regresyon analizinde üstel fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.98 belirlenmiştir. SK 9E deneyinden belirlenen modül değerleri ($D_D=12.07$ GPa ve $D_H=1.91$ GPa) uyumluluk göstermediği için regresyon analizine alınmamıştır. Aynı şekilde E_D-E_H değerleri arasında yapılan regresyon analizinde üssel fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.71 belirlenmiştir. Bu analizde 4 adet veri karşılaştırılmıştır. SK 9E deneyinden belirlenen modül değerleri ($E_D=26.83$ GPa ve $E_H=5.83$ GPa) ile SK-12 deneyinden belirlenen modül değerleri ($E_D=4.80$ GPa ve $E_H=0.82$ GPa) değerleri uyumluluk göstermediği için regresyon analizine alınmamıştır. SK 9E ve SK-12 kuyuların açıldığı yüzeylerin galeri açımı sırasında patlatmadan etkilendiği belirlenmiştir.

Aynı yüzeylerde elastisite modüllerinin daha çok saçılım yapması, elastisite modülünün, deformasyon modülüne göre daha hassas olduğunu göstermektedir.

Deriner Baraj yerinden alınan örneklerden laboratuvarında belirlenen E_{LD} ve E_{LS} modüllerinin regresyon analizi sonucu logaritmik fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.52 olarak belirlenmiştir. $K (E_{LD}/E_{LS})$ değerinin modül değerlerinin artışıyla birlikte 1 değerine yaklaşmasının nedenini bozunma derecesinin azalmasından kaynaklandığını söyleyebiliriz.

Deriner Baraj yerindeki galerilerde yapılan deneylerde belirlenen D_D modül değerleri ile E_D modülü değerleri arasında yapılan regresyon analizi sonucunda üs fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.84 belirlenmiştir. D_D değerleri ile E_D değerleri arasındaki farkın düşük değerlerde kapandığı, yüksek değerlerde ise farkın açıldığı belirlenmiştir.

Ermenek Barajı santral yeri dilatometre deneylerinden belirlenen D_D değerleri ile E_D değerleri arasında yapılan regresyon analizinde üssel fonksiyon ile en yüksek determinasyon katsayısı (R^2)=0.79 belirlenmiştir. D_D ve E_D değerlerinin küçük değerlerde birbirlerine oransal olarak yakın olduğu fakat her iki değerün yükselmesi durumunda saçılmaların daha fazlaştığı belirlenmiştir.

Kaya kütle dinamik elastisite modülü verisi olmadığı için bu çalışmalarda değerlendirmeye alınmamıştır.

Modül değerlerinin birbirinden farklı değerler olduğu, birbirlerinin yerine kullanılmasının proje için sakıncalar oluşturacağı bu çalışma ile ortaya konulmaya çalışılmıştır. Gerek veri azlığı ve gerekse her kaya kütle ortamının kendine ait farklı koşullar içinden bulunmasından dolayı bu çalışmada

bulunan görgül eşitliklerin başka projelerde kullanılmamalı veya çapraz adımlı sınamalar yaparak kullanılmalıdır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmada, Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin projelendirdiği Aşağı Çoru Havzası HES Projelerinden birisi olan Deriner Barajı ile Ermenek barajı (Karaman) projelerinde yapılan yerinde deney verileri kullanılmıştır. 2012 yılında KHK ile kapatılan Güzide kurum Elektrik İşleri Etüt İdaresine, bu çalışmaların yapılmasını sağlamasından dolayı yazar minnetle teşekkür eder. Yazar, çalışmalarından faydalanılması nedeniyle mesai arkadaşları jeoloji mühendisleri Osman Narin'e, Osman Ceylan'a, Bayram Uysal'a, Ali Kaya'ya, Necmettin Gürsoy'a, Sadık Açı'n'a ve Nilgün Pehlivan'a ayrıca teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Al-Shayea, N.A., 2004. Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock. *Engineering Geology*, 74:139–156.
- ASTM 477, 1970. Determination of in-situ Modulus of Deformation of rock.
- ASTM D4394, 2017. Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Rigid Plate Loading Method, ASTM International, West Conshohocken, www.astm.org.
- ASTM D2845, 2008. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock (Withdrawn 2017), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Bieniawski, Z.T., 1978. Determining Rock Mass deformability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*.15, pp. 237-247. Pergamon Press. Printed in Great Britain.

- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A., 2014. Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julian's stone. *Bulletin of Engineering Geology Environment*, 73 (3), doi 10.1007/s10064-014-0583-y.
- Christaras, B., Auger, F., Mosse, E., 1994. Determination of the modulus of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Material Structure*, 27:222–228.
- Ciccotti, M., Mulargia, F., 2004. Differences between static and dynamic elastic moduli of a typical seismogenic rock. *Geophys Journal Int.*, 157:474–477.
- Gue'guen, Y., Palciauskas, V., 1994. *Introduction to the physics of rocks*. Princeton University Press, New Jersey, p 294.
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. "Engineering Classification And Index Properties For Intact Rock", Tech.Rept. No AFWL-65-116, Air Force Base, New Mexico.
- EİE-081, 1992. Ultrasonik yöntemle karot numunelerinin boyuna ve enine elastik dalga hızlarının ölçülmesi ve dinamik elastik parametrelerinin hesaplanması. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Mühendislik Hizmetleri Normları, Ankara.
- EİE-122, 1992. Plaka Yükleme Deneyi Normu. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Mühendislik Hizmetleri Normları, Ankara.
- EİE-124, 1992. Oyo 200 Dilatometre Deneyi Normu. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Mühendislik Hizmetleri Normları, Ankara.
- Galera, M.J., Alvarez, M., Bieniawski, Z.T., 2005. Evaluation of the deformation modulus of rock masses: comparison of the pressuremeter and dilatometer tests with RMR prediction. *ISP5-PRESSIO International Symposium*.
- Hoek, E., Diederichs, M.S., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43. 203-215.

- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, <http://www.dsi.gov.tr/projeler>, (Ziyaret Tarihi 25 Mart 2019).
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanics, 2nd ed., Wiley, New York, 562 p.
- ISRM, 1978. ISRM suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 16,135-140.
- ISRM, 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. E.T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, 211 pp.
- ISRM, 1998. Suggested methods for seismic testing within and between boreholes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 25: 447-472.
- Kaya, A., Kayabaşı A., 1992. Aşağı Çoruh Havzası Deriner Barajı Elastimeter 200 Deney Sonuç raporu. EİEİ Genel Müdürlüğü. Kaya ve Zemin Mekaniği Şubesi Müdürlüğü (Basılmamış).
- Kaya, A., Kayabaşı A., 1998. Ermenek HES Santral Yeri Dilatometre Deney Sonuç raporu. Jeoloji ve Sondaj Dairesi Başkanlığı, Kaya ve Zemin Mekaniği Şubesi Müdürlüğü, EİEİ Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kujundzić, B., Grujić, N., 1966. Correlation between static and dynamic investigations of rock mass "in situ". Proceedings of 1st ISRM Congress, Lisbon. 1: 565-570. LNEC.
- Kulhawy, F. H., Goodman, R., 1980. Design of foundations on discontinuous rock. Proc. Int. Conf. Struct. Found. Rock. Ed. Balkema, 209-220.
- Martinez-Martinez, J., Benavente, D., Garcí'a-del-Cura, M.A., 2012. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 71: 263-268.
- Munir, K., 2006. Development of correlation between rock classification system and modulus of deformation. PhD Thesis-Civil-02, Department of Civil Engineering University of Engineering And Technology, Lahore-PAKISTAN.
- Narin, O., Ceylan, O., Uysal, B., 1986. Aşağı Çoruh Havzası Deriner Baraj Yeri Hidrolik Kriko Yükleme Deneyleri Elastisite Raporu. EİEİ Genel Müdürlüğü, Yayın No:86-65. Ankara.
- Palmstrom, A., Singh, R., 2001. The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 115 - 131.
- Wyllie, D. C., 1992. Foundations on Rock. Principal, Golder Associates, consulting Engineers Vancouver, Canada.