

TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMINI KULLANARAK KAYA MALZEMESİNİN ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN TAHMİNİ

PREDICTION OF INTACT ROCK'S ELASTICITY MODULUS BASED ON UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH

İbrahim OCAK

*İBB, İETT Genel Müdürlüğü, Raylı Sistemler Yapım Müdürlüğü, Karaköy-İSTANBUL
İ.Ü. Müh. Fak. Maden Müh. Böl., Misafir Öğr. Üyesi, 34320 Avcılar-İSTANBUL*

Yayına Geliş (Received): 25.06.08, Yayına Kabul (Accepted): 29.01.09

ÖZ: Elastisite modülü (E_i) tünel ve madencilik kazıları ile kaya şev stabilitesi analizi gibi pek çok mühendislik projesinin tasarımında kullanılan önemli bir parametredir. Elastisite modülünün doğrudan belirlenebilmesi güç olup, deney için yüksek kalitede karotlar gerekmektedir. Bu nedenle elastisite modülünün tayini için dolaylı yollara da başvurulmaktadır. Literatürde değişik istatistiksel yöntemleri kullanarak elastisite modülünün kestirimini amaçlayan bu yöntemlerin en önemli eksikliği az sayıda veriye dayanmalarındır. Bu çalışmada, İstanbul'daki metro kazıları kapsamında yapılan sondajlardan alınan karotlardan elde edilen 441 adet veri kullanılarak değişik litolojilerdeki kayaçların tek eksenli basınç dayanımları (UCS) ile elastisite modülü arasındaki ilişki araştırılmıştır. Sonuçta, tek eksenli basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında kuvvetli bir ilişki olduğu ve bu ilişkiye dayanılarak elastisite modülünün yaklaşık olarak tahmin edilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elastisite modülü, tek eksenli basınç dayanımı, regresyon.

ABSTRACT: The modulus of elasticity (E_i) is an important parameter which is used in the planning of several engineering projects such as tunneling, mining excavations and slope stability analysis. However, it is usually difficult to determine the modulus of elasticity directly and high-quality cores are necessary for the experimental studies. For this reason, indirect methods have been recommended for estimating the modulus of elasticity. The most significant deficiency of these methods aiming at estimate for the modulus of elasticity by using different statistical techniques is that some of them are based on insufficient data. In this study, the relationship between the uniaxial compressive strength (UCS) and the elasticity modulus of rocks in different lithologies was investigated by using 441 data obtained from the Istanbul metro excavations. As a result, a satisfactory relationship between the modulus of elasticity and the compressive strength was found and the modulus of elasticity could be estimated by using the proposed predictor equations.

Key Words: Modulus of elasticity, uniaxial compressive strength, regression.

GİRİŞ

Elastisite modülü, maden mühendisliği ve inşaat mühendisliği tasarımlarında birim hacim ağırlık, kohezyon, Poisson oranı ve içsel sürtünme açısı ile birlikte girdi olarak kullanılmaktadır. Bu parametrenin doğrudan belirlenmesi için standartlara göre yüksek

kalitede karot örnekleri gerekmektedir. Bazı kayaçlarda yüksek porozite, yüksek kil oranı, sık aralıklı süreksizliklerin varlığı ve sondajdan kaynaklanan nedenlerle yüksek kalitede karot alınması mümkün olamamaktadır. Bu nedenle deney yapımındaki güçlükler de dikkate alındığında, elastisite modülünün

dolaylı yollardan belirlenmesi yaygın olarak tercih edilmektedir.

Dolaylı yoldan elastisite modülünü belirlemeyi amaçlayan çalışmaların bir kısmında Schmidt çekici (Deere ve Miller, 1966; Aufmuth, 1973; Sachpazis, 1990; Xu vd., 1990) kullanılmıştır. Daha fazla sayıda araştırmacı (Wuerker, 1959; Dhir ve Sangha, 1972; Lama ve Vutukuri, 1978; Wilson, 1978; Dennis vd., 1982; Bell, 1983; Sachpazis, 1990; Rohde ve Feng, 1990; Arıoğlu vd., 1992; Tuğrul ve Zarif, 1999; Palchik, 1999; Lashkaripour ve Nakhaei, 2001; Sönmez vd., 2006; Ocak, 2006; Ocak, 2007; Ocak, 2008) bu kestirim için tek eksenli basınç dayanımını kullanmışlardır. Diğer bir grup araştırmacı ise (Sönmez vd., 2004a; Sönmez vd., 2004b) elastisite modülünün tahmini için tek eksenli basınç dayanımı ile birlikte birim hacim ağırlığını da kullanmışlardır.

İstatistiksel bir çalışmanın güvenilirliği kullanılan veri sayısına bağlıdır. Kullanılan veri sayısı ne kadar fazla ise ulaşılan değerler de o kadar güvenilir olmaktadır. Ancak yukarıda değinilen pek çok araştırmada, sınırlı sayıda verinin kullanılmış olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, toplam 441 adet veri kullanılmıştır. Bu veriler İstanbul Büyükşehir Belediyesince inşası devam etmekte olan Kadıköy-Kartal Metro Projesi ile 2. ve 3. aşama kazıları devam etmekte olan İstanbul Metrosu'ndan ve Ulaştırma Bakanlığı DLH Genel Müdürlüğüne kazı çalışmaları yürütülen Marmaray Projesi'nden alınmıştır. Farklı litolojiler hem ayrı ayrı, hem de birlikte

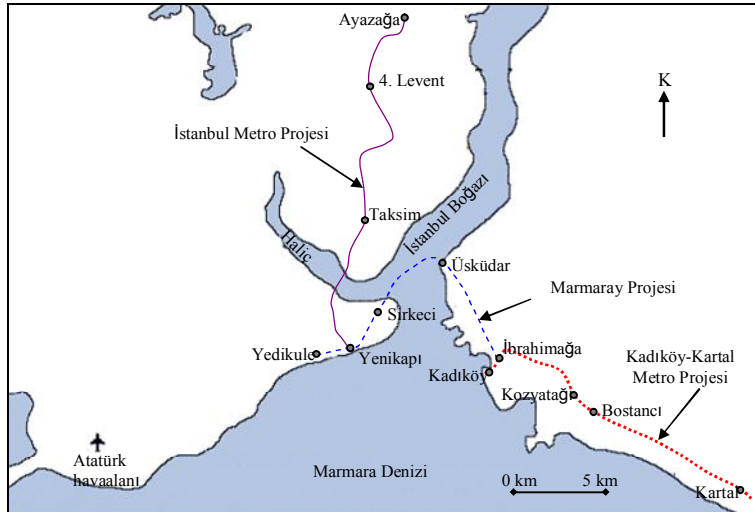
değerlendirilmiştir. Veriler aynı boyutlu karotlar üzerinde yapılan deneylere dayanmaktadır. Veriler her üç proje güzergahını kapsayan ve İstanbul kayaçlarının çoğunu içinde bulunduran formasyonları içermektedir.

ÇALIŞMA BÖLGESİNİN TANITIMI

Bu çalışmaya konu olan bölge İstanbul'da halen yapım çalışmaları devam etmekte olan üç adet metro güzergahını kapsamaktadır (Şekil 1). Bunlardan birincisi, Kadıköy-Kartal Metro Projesi güzergahıdır. Bu proje 22 km uzunluğunda olup E5'te Kartal köprüsünden başlayıp E5'in altından Acıbadem köprüsüne ve oradan da Kadıköy meydanına uzanmaktadır. İkincisi, Ayrılıkçeşme mevkiinden başlayıp tüp tünelle birlikte yaklaşık 13 km'lik bir güzergahı kapsayan ve Yenikapı'da biten Marmaray Projesi güzergahıdır. Üçüncüsü, Ayağa ile Yenikapı arasında çalışacak olan İstanbul Metrosu güzergahını kapsayan yaklaşık 16 km'lik kısımdır. Çalışma bölgesi, İstanbul'daki pek çok kayaç türünü kapsayan bir bölgedir. Dolayısıyla çalışma İstanbul kayaçlarını yansıtmaktadır.

KULLANILAN VERİ TABANININ ÖZELLİKLERİ

Kullanılan veri tabanı (İETT, 2005; STFA, 2005), İstanbul'da hala yapım çalışmaları devam eden üç adet büyük metro projesinden elde edilen ve 9 ayrı kayaktan oluşan bir veri bankasını kapsamaktadır.



Şekil 1: Çalışma bölgesinin genel görünümü.

Figure 1: General view of the study area.

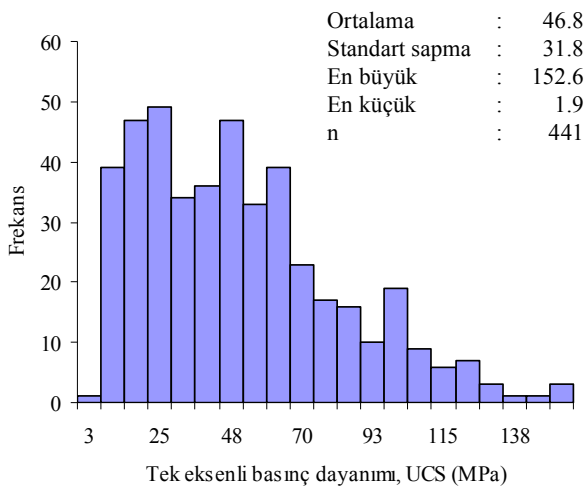
diyabaz, kıltaşı, kireçtaşı, konglemera, kumtaşı, silttaşı ve şeyldir. Kullanılan veri tabanı Kadıköy-Kartal Projesine ait 140 adet, Marmaray Projesine ait 230 adet ve İstanbul Metrosu Projesine ait 71 adet olmak üzere toplam 441 adet veri çiftinden oluşmuştur. Deneyler değişik özel ve resmi kuruluşlarca ISRM (ISRM, 1981) tarafından önerilen metotlara göre yapılmıştır. Kullanılan veri tabanını oluşturan kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin ortalama ve standart sapmaları Çizelge 1’de verilmiştir. Veri tabanını oluşturan kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ortalamaları 36,69 MPa ile

60,78 MPa arasında, elastisite modülleri ise 8,29 GPa ile 16,99 GPa arasında değişmektedir. Şekil 2 ve 3’deki veri dağılım grafikleri incelendiğinde kayaçların düşük dayanım orta sert ve sert kaya grubunda yığıldığı ve bu aralıkta elastisite modülünün 3 ile 15 GPa arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Veri tabanının Dere&Miller 1966 [1] tarafından önerilen modül oranı abağı üzerindeki dağılımı ise Şekil 4’te görülmektedir. Bir önceki cümlede Şekil 2 ve 3 için varılan yargıların Şekil 4’teki abak için de geçerli olduğu gözden kaçmayacaktır.

Çizelge 1: Çalışma bölgesindeki kayaçların UCS ve E_i değerleri (İETT, 2005; STFA, 2005).

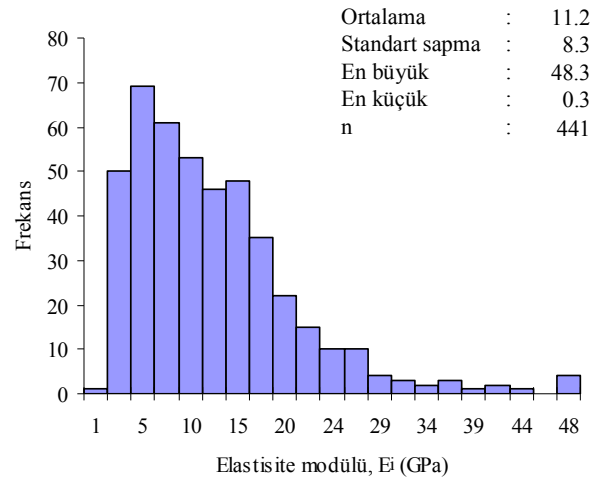
Table 1: Rocks’ UCS and E_i values of study area (IETT, 2005; STFA, 2005).

Kaya	Veri Sayısı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı, UCS (MPa)		Elastisite Modülü, E_i (GPa)	
		Ortalama	Stan. Sap.	Ortalama	Stan. Sap.
Andezit	14	44.21	34.25	9.63	4.72
Çamurtaşı	47	36.69	23.20	8.29	5.80
Diyabaz	13	54.35	34.07	11.48	6.68
Kıltaşı	40	39.30	33.26	10.09	10.35
Kireçtaşı	76	41.01	28.16	10.54	7.12
Konglemera	13	49.09	17.68	10.62	3.11
Kumtaşı	180	54.13	36.19	11.83	8.90
Silttaşı	12	60.78	25.21	16.99	10.72
Şeyl	46	39.31	19.72	12.86	8.76



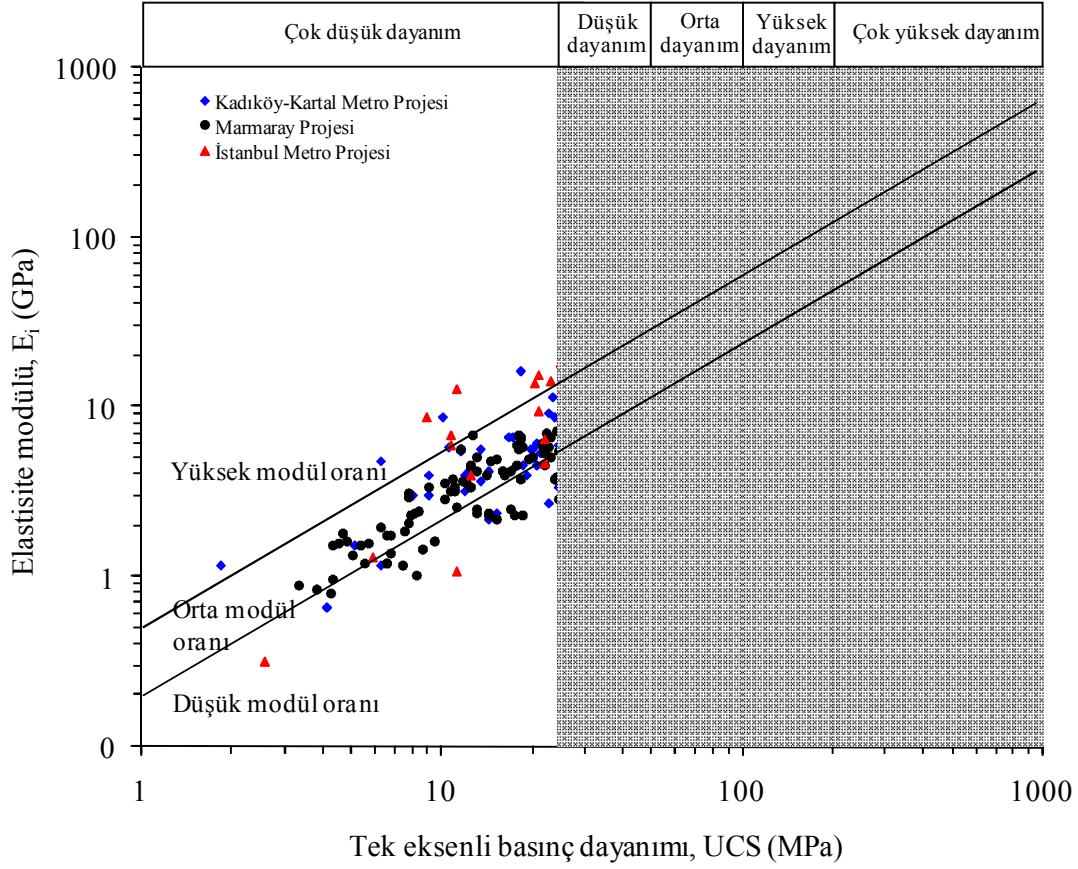
Şekil 2: UCS değerleri histogramı.

Figure 2: Histogram of UCS values.



Şekil 3: Elastisite modülü değerleri histogramı.

Figure 3: Histogram of E_i values.



Şekil 4: Verilerin Deer ve Miller (1966) tarafından önerilen modül oranı abağı üzerindeki dağılımı.
Figure 4: The distribution of the data on modulus graph suggested by Deer and Miller (1966).

TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI VE ELASTİSİTE MODÜLÜ ARASINDAKİ İLİŞKİ

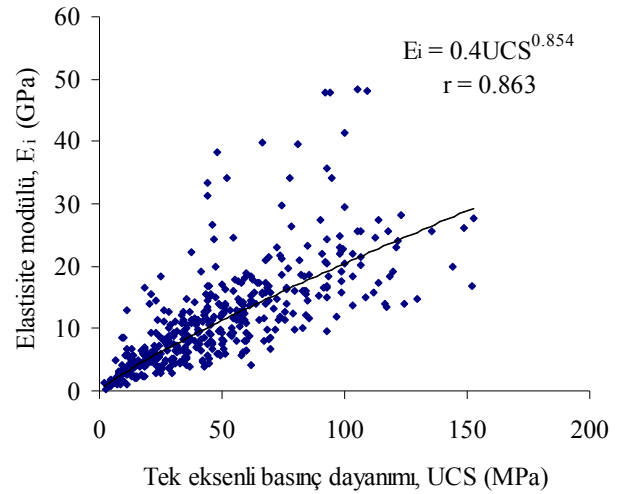
Veri tabanında kullanılan kayaç birimlerin tek eksenli basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişki hem litoloji bazında hem de litoloji dikkate alınmaksızın tümü birlikte araştırılmıştır. Araştırılan bu ilişkilerin anlamlılığı;

$$r(x,y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilen korelasyon katsayısı (r) bulunarak incelenmiştir.

Formasyon bazında araştırılan ilişkiler dokuz adet formasyon için grafik verilmesi yerine sadece Çizelge 2'de formülleri verilmiştir. Veri tabanındaki tüm kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişki ise Şekil 5'te verilmiştir. Burada, tek eksenli basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında eşitlik 2'deki gibi bir ilişki vardır.

$$E_i = 0.4UCS^{0.854} \quad (2)$$



Şekil 5: Tüm veri tabanına ait UCS ve E_i arasındaki ilişki.

Figure 5: Relationship between UCS and E_i for all data.

Çizelge 2’de ve (2) numaralı eşitlikte önerilen tüm ilişkiler t testine tabi tutulmuştur. Regresyon analizlerinde data sayısının 30 den az olması durumunda, bulunan korelasyonun anlamlımı yoksa tesadüfi mi olduğu t testleriyle analiz edilir (Konuk, 1999).

$$t_h = \left| \frac{r}{S_v} \right| \quad (3) \quad \text{ve} \quad S_v = \sqrt{\frac{1-r^2}{v}} \quad (4)$$

Burada;

t_h , test istatistiğini

S_v , r lerin dağılımının standart sapmasını

$v = n-2$

n, data sayısını göstermektedir. α güven seviyesi için

$t_h > t_{\alpha/2,v}$ ise bulunan r değeri anlamlı değilse anlamsız demektir (Konuk, 1999). $t_{\alpha/2}$ değerleri t tablosundan bulunmaktadı. Bulunan bu değerler Çizelge 2’de görülmektedir.

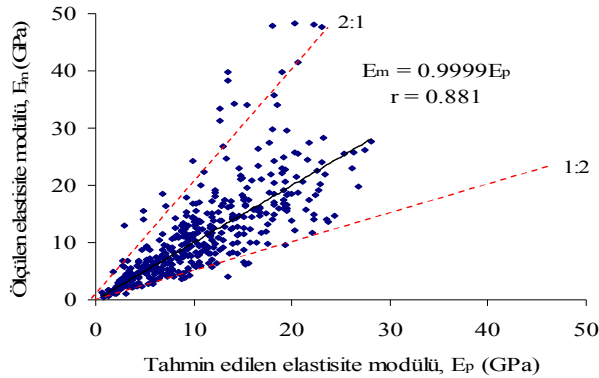
GÖRGÜL EŞİTLİKLERİN KESTİRİM PERFORMANSI

Bu bölümde, bu çalışmada tüm formasyonlar için önerilen (2) nolu eşitlik ile her bir formasyon için önerilen Çizelge 2’deki (5-13) nolu eşitliklerin kestirim performansı test edilmiştir.

Bu çalışmada önerilen eşitliklerden elde edilen tahmini elastisite modülü (E_p) ile ölçülen elastisite modülü (E_m) arasındaki ilişkinin anlamlılığının tespiti için önce çapraz kontrol grafikleri çizilmiştir. Gerek litolojiyi dikkate alarak önerilen (Eşitlik 5-13), gerekse tüm formasyonlar için önerilen eşitliklerden (Eşitlik 2) elde edilen çapraz kontrol grafiklerinde veri çiftlerinin çoğunlukla 2:1 ve 1:2 çizgileri arasında dağıldığı görülmüştür (Şekil 6-7).

Çizelge 2: Litoloji bazında UCS ile E_i arasındaki ilişki.**Table 2:** Relationship between UCS and E_i according to lithology.

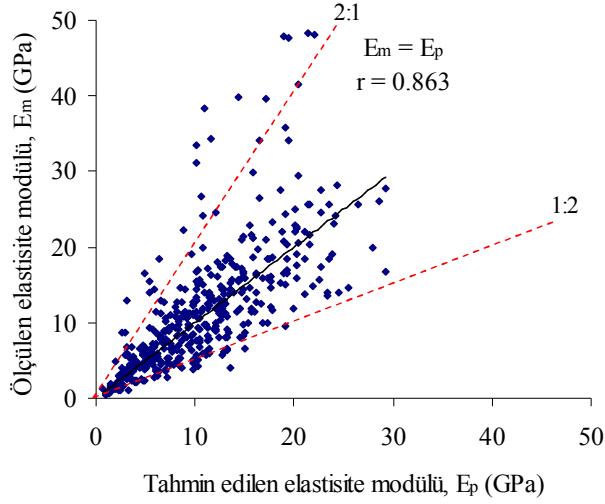
Kaya	Veri sayısı	Eşitlik No	r	t_h	$t_{\alpha/2,v}$	Güven sınırı, α (%)
Andezit	14	$E_i = 6.1956e^{0.0074UCS}$ (5)	0,519	2,10	1,782	90
Çamurtaşı	47	$E_i = 0.3436UCS^{0.8721}$ (6)	0,884	12,68	-	-
Diyabaz	13	$E_i = 0.1627UCS^{1.0588}$ (7)	0,942	9,31	2,201	95
Kiltaşı	40	$E_i = 0.3485UCS^{0.8866}$ (8)	0,837	9,43	-	-
Kireçtaşı	76	$E_i = 0.4153UCS^{0.8692}$ (9)	0,935	22,68	-	-
Konglemera	13	$E_i = 1.1329UCS^{0.5761}$ (10)	0,849	5,33	2,201	95
Kumtaşı	180	$E_i = 0.3341UCS^{0.8818}$ (11)	0,893	26,47	-	-
Silttaşı	12	$E_i = 6.7152e^{0.0131UCS}$ (12)	0,639	2,63	2,228	95
Şeyl	46	$E_i = 0.9598UCS^{0.6809}$ (13)	0,636	5,47	-	-

**Şekil 6:** Litolojik bazda E_p ile E_m arasındaki ilişki.**Figure 6:** Relationship between E_p and E_m according to lithology.

Ayrıca önerilen her iki kestirim modeli için eşitlik (14) ve (15)’te verilen RMSE (Root Mean Square Error) ve VAF (Variance Account For) indisleri bulunmuştur.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2} \quad (14)$$

$$VAF = \left(1 - \frac{\text{var}(y - y')}{\text{var}(y)}\right) \cdot 100 \quad (15)$$



Şekil 7: Tüm formasyonlar bazında E_p ile E_m arasındaki ilişki.

Figure 7: Relationship between E_p and E_m according to all formations.

Burada y ve y' ölçülen (E_m) ve tahmin edilen (E_p) elastisite modülü değerleri, N ise data sayısıdır. Mükemmel bir kestirim için RMSE 0 ve VAF 100 olmalıdır. Bu çalışmada önerilen iki adet modelin korelasyon katsayıları, RMSE ve VAF değerleri Çizelge 3'teki gibidir. Yapılan tüm performans analizleri, önerilen her iki kestirim modelinin de, bu tür çalışmalar için oldukça yeterli sayılabilecek bir kestirim kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir.

Çizelge 3: Önerilen iki adet modelin kestirim kapasitesi.

Table 3: Prediction capacity for suggested two models.

Model	r	RMSE	VAF
Litolojik bazda (Eşitlik 3-11)	0.881	5.48	57.5
Tüm formasyonlar bazında ($E_i = 0.4UCS^{0.854}$)	0.863	5.66	54.6

SONUÇLAR

- Bu çalışmada, tünel, temel ve her türlü kazının projelendirilmesinde ana girdilerden birisi olan ve normal yollardan tespiti yüksek kalitede karot örnekleri gerektirdiği için güç olan elastisite modülünün dolaylı olarak nasıl elde edilebileceği üzerinde durulmuştur. Çalışma sonucunda, kayacın tek eksenli basınç dayanımına dayanarak elastisite modülünün büyük bir yaklaşıklıkla kestirilebileceği görülmüştür.

- Bu çalışmada ulaşılan değerler, mekanik ve deformasyon özellikleri geniş bir aralıkta değişen farklı formasyonlara ait farklı kaya örneklerinden elde edilmiş geniş bir veri tabanının kullanılması ile elde edilmiştir.
- Çalışmada önerilen eşitliklere dayanarak, eğer kayacın tek eksenli basınç dayanımı biliniyorsa andezit ($r=0.52$), silttaşı ($r=0.64$) ve şeyl ($r=0.64$) için kısmi olarak, çamurtaşı ($r=0.88$), diyabaz ($r=0.94$), kiltası ($r=0.84$), kireçtaşı ($r=0.94$), konglemera ($r=0.85$), kumtaşı ($r=0.89$) için büyük bir yaklaşıklıkla elastisite modülü kestirimi yapılabilmektedir.

İstanbul'da yapılmış ve halen yapımı devam eden metro çalışmalarının çoğu bu çalışmaya da konu olan formasyonlar içerisinde yapılmaktadır. Dolayısıyla sonraki çalışmalarda, burada önerilen iki adet kestirim modelinden faydalanılması mümkün olabilecektir.

SUMMARY

The modulus of elasticity of rock material is an important rock property that is used as an input parameter in the design stage of engineering projects such as dam and tunnel constructions, mining excavations, and so forth. However, determination of the modulus of elasticity is sometimes difficult to obtain by laboratory tests because high-quality cores are required. For this reason, empirical methods for predicting the modulus of elasticity of rock material have been popular research topics in recently published literature. In this study, the relationships between the uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for different types of rocks were analyzed by using 441 data obtained from laboratory tests carried out on cores obtained from drill holes within three of Istanbul Metro lines. As a result, a satisfactory relationship between the modulus of elasticity and the compressive strength was found and the modulus of elasticity could be estimated by using the proposed predictor equations.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Arıoğlu, E., Tokgöz, N.,** 1992, Tortul Kayaçalarda Elastisite Modülü ile Basınç Dayanımı Arasında Çıkarılan Regresyon İfadeleri, Kaya Mekaniği Bülteni 7, 5-15.
- Aufmuth R.E.,** 1973, A systematic determination of engineering 20 criteria for rock" Bull. of Assoc. of Eng. Geol. 11, pp. 235-245.
- Bell, F.G.,** 1983, Engineering Properties of Soil and Rocks, London.

- Deere D.V., Miller R.L.**, 1966, Engineering Classification and Index Properties of Intact Rock, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana. pp. 90-101.
- Dennis, R. D., Horing, F.G., Hooker, E. V.**, 1982, Mechanical Properties of oil Shale and Overlying Strata, Naval Oil Shale Reserve, Anvil Points, Colo. Col., ISBM RI: 8608, pp. 1-43.
- Dhir, R.K., Sangha, C.M.**, 1972, Rock Strength” Colliery Guardian, pp. 525-256.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics)**, 1981, In: Brown E.T., editor. ISRM suggested method: rock characterization, testing and monitoring, London: Pergamon Pres, 211pp.
- İETT Genel Müdürlüğü**, 2005, İstanbul Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesi, Mühendislik Jeolojisi Raporu.
- Lashkaripour G.R., Nakhaei M.**, 2001, A Statistical Investigation on Mudrocks Characteristics, Rock Mechanics and Rock Engineering., pp. 131-136.
- Ocak, İ.**, 2006, Kadıköy-Kartal Metro güzergahındaki kayaçların basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişki, İstanbul Üniversitesi Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, Cilt 19, Sayı 2.
- Ocak, İ.**, 2007, Kayaçların Basınç Direnci ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişkinin Araştırılması, 20. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Ankara.
- Ocak, İ.**, 2008, Estimating the modulus of elasticity of the rock material from compressive strength and unit weight, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol 108, pp. 621-626.
- Konuk, A., Önder S.**, 1999, Maden İstatistiği, Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü ders kitabı, Eskişehir, 156 sayfa.
- Palchik V.**, 1999, Influence of Porosity and Elastic Modulus on Uniaxial Compressive Strength in Soft Brittle Porous Sandstones, Rock Mechanic and Rock Engineering 32 (4), pp. 303-309.
- Rohde, J., Feng, H.**, 1990, Analysis of the Variability of Unconfined Compression Tests of Rock, Rock Mechanic and Rock Engineering, 23, pp. 231 -236.
- Sachpazis C.I.**, 1990, Correlating Schmidt Hardness with Compressive Strength and Young’s Modulus of Carbonate Rocks”, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 42, pp. 75-83.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Kayabas, A. and Nefeslioglu, H.A.**, 2006, Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43 (2), 224-235.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Kasapoğlu, K.E., Tuncay, E., Zorlu, K.**, 2004a, An empirical equation for estimating elasticity modulus of intact rock, ROCKMEC’2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas-Turkey.
- Sönmez, H., Tuncay, E., Gökçeoğlu, C.**, 2004b, Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara Agglomerate, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41, pp. 717-729.
- STFA**, 2005, Marmaray Tube Tunnel Project, Final Geotechnical factual Report, Project No: 2003-08-75.
- Tuğrul A., Zarif I.H.**, 1999, Correlation of Mineralogical and Textural Characteristics with Engineering Properties of Selected Granitic Rock from Turkey, Engineering Geology, 51, pp. 303-317.
- Wilson, A.H.**, 1978, Stability of Underground Working in the Soft Rocks of Coal Measures, Ph.D. Thesis, University of Nottingham.
- Wuerker, R.G.**, 1959, The Shear Strength of Rocks, Mining Engineering, October, pp. 1022-1026.
- Lama, R. D., Vutukuri, V. S.**, 1978, Handbook and mechanical properties of rock, Trans. Tech. Publ.: Switzerland. Vol. 2, pp. 481.
- Xu S., Grasso, P., Mahtab A.**, 1990, Use of Schmidt Hammer for Estimating Mechanical Properties of Weak Rock, 6th International IAEG Congress. pp. 511-519.