

Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımı ile Ultrasonik Dalga Hızı Arasındaki İlişkinin Değerlendirilmesi

Evaluation of the Relationship between Uniaxial Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity of Rocks

Kadir Karaman^{*1}, Ayhan Kesimal¹

¹*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon*

^{*}*Sorumlu Yazar: kadirkaraman@ktu.edu.tr*

Özet

Bu çalışmada, 29'u magmatik, 8'i metamorfik ve 10'u tortul olmak üzere 47 farklı kayaç türü üzerinde tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve ultrasonik P dalga hızı (UPV) deneyleri yapılmıştır. Ultrasonik dalga hızı deneyinden köken bazında (magmatik, metamorfik ve tortul) kayaçların tek eksenli basınç dayanımı tahminine yönelik istatistiksel eşitlikler belirlenmiştir. UPV deneyi kullanılarak magmatik kayaçların UCS tahmini, metamorfik ve tortul kayaçlara göre daha az güvenilir olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tek eksenli basınç dayanımı, ultrasonik dalga hızı

Abstract

In the current study uniaxial compressive strength (UCS) and ultrasonic P-wave velocity experiments were conducted on forty seven rock types, 29 of which were igneous, 8 were metamorphic, and 10 were sedimentary. Statistical equations have been determined for estimating the uniaxial compressive strength of rocks using ultrasonic pulse velocity test based on the rock origins (igneous, metamorphic and sedimentary). The ability to estimate the UCS of igneous rocks using the UPV test was less reliable than those of metamorphic and sedimentary rocks.

Keywords: Ultrasonic pulse velocity, uniaxial compressive strength

1. Giriş

Kayaçların en önemli mekanik parametrelerinden biri olan tek eksenli basınç dayanımı (UCS) maden, jeoloji, inşaat vb. mühendisler tarafından yerüstü ve yeraltı yapılarının tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Karaman ve ark., 2011). UCS, hem Uluslararası Kaya Mekanikliği Birliği (ISRM, 2007), hem de Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM, 1984) tarafından önerilen yöntemlere göre belirlenebilmektedir. Ancak, UCS deneyi için pahalı ekipmanlara ihtiyaç duyulması ve özellikle problemlili kaya kütlelerinden (bol çatlaklı, çok zayıf vb.) standartlara uygun ölçüde karot alınmaması gibi nedenlerle uygulamada güçlükler yaşanmaktadır (Ersoy ve Kanık 2012; Fener ve ark., 2005; Shalabi ve ark., 2007). Ultrasonik dalga hızı (UPV) deneyi hasarsız bir test yöntemi olup, hem laboratuvar hem de arazide kayaçların UCS değerlerini tahmin etmede yaygın olarak kullanılmaktadır (Altındağ, 2012; Karaman ve ark., 2010; Tuğrul ve Zarif, 1999; Yağız, 2011).

UPV deneyi kayaçların UCS değerlerini tahmin etmenin dışında; kayaçların ayrışma derecelerinin belirlenmesi (Karpuz ve Paşamehmetoğlu, 1997), kaya kütlelerinin elastik özelliklerinin tahmin edilmesi (Gladwin, 1982; Onodera, 1963) ve kazı çalışmalarında uygulanan patlatmaların kayaçlar üzerindeki etkilerinin belirlenmesi (Young ve ark., 1985) gibi farklı uygulamalarda kullanılmıştır. Bazı yazarlar yapı taşlarındaki ayrışma derinliğinin tahmininde UPV'yi kullanmışlardır (Christaras ve ark., 1997; Christaras, 2003). Bazı yazarlar kayaçlardaki porozite ve su içeriğinin ultrasonik hız üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Wyllie ve ark. (1956) kumtaşlarının, Thill ve Bur (1969) granodiyoritlerin ve Ramana ve Venkatanarayana (1973) Kolar (Hindistan) şehrindeki kayaçların su içeriğinin P dalga hızı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ayrıca bazı yazarlar (Kahraman, 2007; Karaman ve ark., 2010; Vasconcelos ve ark., 2008) kuru ve doymuş ultrasonik dalga hızları arasındaki ilişki ve değişimlerinin etkisi üzerinde çalışmışlardır. Karaman ve ark., (2010) ayrıca numune uzunluğunun kuru ve doymuş UPV üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kahraman (2002) izotropik kayaçlar için laboratuvarında uygulaması daha kolay olan dolaylı UPV deneyleri yaparak doğrudan yapılan deney sonuçları ile karşılaştırmış ve yüksek ilişkiler bulmuştur.

Literatürde UPV deneyinden UCS tahminine yönelik çok sayıda çalışma olmasına rağmen kayaçların jeolojik kökenlerine yönelik ayrı ayrı eşitliklerin geliştirildiği sınırlı sayıda çalışmaların olduğu anlaşılmaktadır (Altındağ, 2012; Babacan ve ark., 2012; Moh'd, 2009; Tuğrul ve Zarif, 1999; Vasconcelos ve ark. 2009; Yaşar ve Erdoğan, 2004). Tuğrul ve Zarif (1999) ve Vasconcelos ve ark. (2009) granitik kayaçlar için UPV ile UCS arasındaki ilişkiyi değerlendirmişlerdir. Yaşar ve Erdoğan (2004) karbonatlı kayaçlar için, Moh'd (2009) oolitle kireçtaşları için ve Babacan ve ark. (2012) ise bej kireçtaşları için UPV deneyinden UCS tahminine yönelik eşitlikler geliştirmişlerdir. Ayrıca, Altındağ (2012) tortul kayaçlar için UPV deneyinden UCS değerlerini tahmin etmeye yönelik basit regresyon analizleri yapmış ve UCS değerlerinin UPV deneylerinden tahmin edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca yazar, kayaçların UCS ve UPV arasındaki ilişkileri dikkate alındığında, istatistiksel analizlerde kayaçların jeolojik kökenlerine (magmatik, metamorfik ve tortul) göre ayrılması gerektiğini vurgulamıştır. Literatürden de anlaşılacağı gibi çalışmalar genellikle tortul ve az oranda magmatik kayaçlar üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, bazı yazarların (Altındağ, 2012) önerileri de dikkate alınarak kayaçları jeolojik kökenine göre ayırıp UPV deneyinden UCS değerlerinin tahminine yönelik eşitlikler geliştirmektir.

2. Örneklem ve Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada, 29 magmatik, 8 metamorfik ve 10 tortul olmak üzere toplam 47 farklı kayaç üzerinde çalışılmıştır. 37 farklı kayaç Trabzon Çambaşı tüneline (Çizelge 1) 5 farklı kayaç

(biyomikritik kireçtaşları ve kumlu kireçtaşı) Trabzon–Araçlı Taşönü kireçtaşı ocağından ve diğer kayaçlar ise Trabzon ve Giresun İllerindeki muhtelif taş ocaklarından temin edilmiştir. ISRM (2007) tarafından önerildiği gibi karot örneklerinin alınabilmesi için, arazide her blok örneğinin makroskopik incelemeleri yapılarak çatlak, kırık ve ayrışma gibi olumsuzluklar giderilmeye çalışılmıştır.

Laboratuvarda karot alma ve düzeltme makineleri deney örneklerinin hazırlanması için kullanılmıştır. UCS ve UPV deneyleri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır. Deneyler sağlam karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Zayıflık düzlemi veya içerdiği kırık zonlardan dolayı örnek yenildiğinde sonuçlar çıkarılarak ortalamaya dahil edilmemiştir. Deneylerde kullanılan kayaç isimleri ve ortalama değerler Çizelge 1’de yer almaktadır.

2.1 Tek Eksenli Basınç Dayanımı ve Ultrasonik Dalga Hızı Deneyleri

UCS deneylerinde boy/çap (L/D) oranı en az 2.5 olan NX (54.7 mm) çaplı karot örnekleri kullanılmıştır. Deneyler, 300 ton kapasiteli bilgisayar kontrollü pres ile yükleme hızı 0.5–1.0 MPa/s arasında olacak şekilde uygulanmıştır. Biyomikritik kireçtaşları için 10, diğer kayaçlar için 5 adet karot örneği her kaya türü için deneye tabi tutulmuştur.

Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinden önce aynı karotlar üzerinde UPV deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan karotların uçları zımpara ile parlatılmış ve jeofonların temas edeceği yüzeylerin düzgün olması sağlanmıştır. İnce bir vazelin tabaka jeofonların temas edeceği karotların uç kısımlarına iyi bir iletim sağlanması için sürülmüştür. Örnekten geçen ultrasonik P dalgası 0.1 mikro saniye (μ s) hassasiyetle okunmuştur. P dalga hızı verici ve alıcı arasındaki mesafenin (örnek boyu) geçiş süresine oranı ile elde edilmiştir.

Kayaç kodu	Örnek noktaları	Kayaç adı	Kaya sınıfı	UCS (MPa)	UPV (m/s)
1	Çambaşı Tünel-km-0+495.10	Bazalt	Magmatik	197	5855
2	Çambaşı Tünel- km-0+702.00	Metabazalt	Metamorfik	158	5009
3	Çambaşı Tünel- km-0+919.00	Metabazalt	Metamorfik	66	3944
4	Çambaşı Tünel- km-1+110.00	Metabazalt	Metamorfik	146	4864
5	Çambaşı Tünel- km-1+325.00	Metabazalt	Metamorfik	133	4800
6	Çambaşı Tünel- km-1+675.00	Bazalt	Magmatik	95	4467
7	Çambaşı Tünel- km-1+813.80	Bazalt	Magmatik	115.3	5239
8	Çambaşı Tünel- km-2+473.00	Bazalt	Magmatik	152.4	4605
9	Çambaşı Tünel- km-2+677.00	Metabazalt	Metamorfik	96	4172
10	Çambaşı Tünel- km-3+005.00	Metabazalt	Metamorfik	111	4389
11	Çambaşı Tünel- km-3+310.00	Metabazalt	Metamorfik	71	4223
12	Çambaşı Tünel- km-3+580.00	Metabazalt	Metamorfik	81	4325
13	Çambaşı Tünel- km-3+743.00	Bazalt	Magmatik	75	4576
14	Çambaşı Tünel- km-3+901.00	Bazalt+killi kireçtaşı	Magmatik	34	2985
15	Çambaşı Tünel- km-4+090.00	Dasit	Magmatik	61	4534
16	Çambaşı Tünel- km-4+300.00	Bazalt+dasit	Magmatik	87	5031
17	Çambaşı Tünel- km-4+427.00	Dasit	Magmatik	61	4129
18	Çambaşı Tünel- km-4+572.00	Dasit	Magmatik	72	4356
19	Çambaşı Tünel- km-4+772.00	Dasit	Magmatik	65.5	4226

Kayaç kodu	Örnek noktaları	Kayaç adı	Kaya sınıfı	UCS (MPa)	UPV (m/s)
20	Çambaşı Tünel- km-4+874.00	Dasit	Magmatik	56	4052
21	Çambaşı Tünel- km-4+950.00	Kireçtaşı	Tortul	117	4968
22	Çambaşı Tünel- km-5+052.00	Kireçtaşı	Tortul	92	4340
23	Çambaşı Tünel- km-5+235.00	Bazalt+dasit	Magmatik	100	5310
24	Çambaşı Tünel- km-5+350.00	Kireçtaşı	Tortul	91	4836
25	Çambaşı Tünel- km-5+545.30	Kireçtaşı	Tortul	75	3382
26	Çambaşı Tünel- km-5+690.00	Bazalt+dasit	Magmatik	77	4435
27	Çambaşı Tünel- km-5+857.50	Volkanik breş	Magmatik	41	4182
28	Çambaşı Tünel- km-6+005.00	Kireçtaşı	Tortul	120	5366
29	Çambaşı Tünel- km-6+171.00	Bazalt+dasit	Magmatik	94	3983
30	Çambaşı Tünel- km-6+300.00	Bazalt+dasit	Magmatik	125	4934
31	Çambaşı Tünel- km-6+400.00	Bazalt+dasit	Magmatik	68	3956
32	Çambaşı Tünel- km-6+403.00	Bazalt+dasit	Magmatik	66	3943
33	Çambaşı Tünel- km-6+560.00	Bazalt+dasit	Magmatik	107	5602
34	Çambaşı Tünel- km-6+725.00	Dasit	Magmatik	132	4968
35	Çambaşı Tünel- km-6+873.00	Dasit	Magmatik	87	4336
36	Çambaşı Tünel- km-6+994.00	Dasit	Magmatik	110	4648
37	Çambaşı Tünel- km-7+119.80	Dasit	Magmatik	90	4356
38	Trabzon	Andezit	Magmatik	173	5000
39	Trabzon	Silisli andezit	Magmatik	134.5	4716
40	Trabzon	Bazalt	Magmatik	86	4475
41	Giresun	Granit	Magmatik	215	6234
42	Trabzon	Dasit	Magmatik	111	4730
43	Trabzon	Biyomikritik kireçtaşı-1	Tortul	11.6	1993
44	Trabzon	Biyomikritik kireçtaşı-2	Tortul	18.9	1817
45	Trabzon	Biyomikritik kireçtaşı-3	Tortul	8.5	2009
46	Trabzon	Biyomikritik kireçtaşı-4	Tortul	7.7	1397
47	Trabzon	Kumlu kireçtaşı	Tortul	22.5	2731

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan kayaçlar ve ortalama deney sonuçları

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Kayaçların Dayanım ve Ultrasonik Dalga Hızı Sınıflamaları

Kayaçların UCS değerleri 7.7 ile 215 MPa arasında değişmektedir. Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen UCS dayanım sınıflamasına göre bu çalışmada kullanılan kayaçların dayanım sınıflaması değerlendirilmiştir (Çizelge 2). Çizelge 2; 4 farklı kategoriye göre (bütün kayaçlar, magmatik, metamorfik ve tortul kayaçlar) değerlendirilmiştir.

Çizelge 2'ye göre; bütün kaya sınıfını temsil eden kayaçların bu çalışmada kullanıldığı anlaşılmaktadır. Ancak kayaçların yaklaşık % 83'ü "orta dayanımlı" ve "yüksek dayanımlı" sınıfında yer almaktadır. "Çok düşük dayanımlı" kaya sınıfında yer alan kayaçları (Trabzon-Araklı Taşönü kireçtaşı ocağından alınan) tortul kayaçlar oluşturmaktadır. Ayrıca "düşük dayanımlı" kaya sınıfında sadece magmatik kökene ait kayaçlar bulunmaktadır. Örneklenen metamorfik kayaçlar "orta dayanımlı" ve "yüksek dayanımlı" sınıfında yer almaktadır.

Kaya sınıfı	UCS (MPa)	Bütün kayaçlar	Magmatik	Metamorfik	Tortul
Çok düşük dayanımlı	1 – 25	5 (%10.6)	–	–	5
Düşük dayanımlı	25 – 50	2 (%4.3)	2	–	–
Orta dayanımlı	50 – 100	22 (%46.8)	15	4	3
Yüksek dayanımlı	100 – 200	17 (%36.2)	11	4	2
Çok yüksek dayanımlı	> 200	1 (%2.1)	1	–	–
Toplam kayaç sayısı		47	29	8	10

Çizelge 2. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımına göre sınıflandırılması (Deere ve Miller, 1966)

Bu çalışmada ayrıca kayaçlar Anon (1979) tarafından önerilen ultrasonik dalga hızı sınıflamasına göre değerlendirilmiştir (Çizelge 3). Çizelge 3'e göre; kayaçların büyük çoğunluğunun (%76.5'inin) "yüksek hız" ve "çok yüksek hız" sınıfına dahil olduğu anlaşılmaktadır. Tek eksenli basınç dayanımı sınıflamasında olduğu gibi kayaçların tüm sınıfları temsil ettiği görülmüştür. "Çok düşük hız" sınıflamasında sadece tortul kayaçların bulunduğu çizelge 3'ten anlaşılmaktadır. Ancak, tek eksenli basınç dayanımı sınıflamasında kayaçların %46.8'i "orta dayanımlı" sınıflamasında yer alırken, ultrasonik dalga hızı sınıflamasında "orta hız" sınıflamasında kayaçların yalnızca %8.5'i yer almaktadır. Bu sınıflamalar farklı yazarlar tarafından önerildiğinden, önerilen sınıflamalarda yazarların kullandıkları kayaç türleri ve örnekleri aldıkları bölgeler farklı olmaktadır. Bu nedenle, tek eksenli basınç dayanımı ile ultrasonik dalga hızı sınıf aralıklarına ait tanımlamaların farklı çıktığı düşünülmektedir.

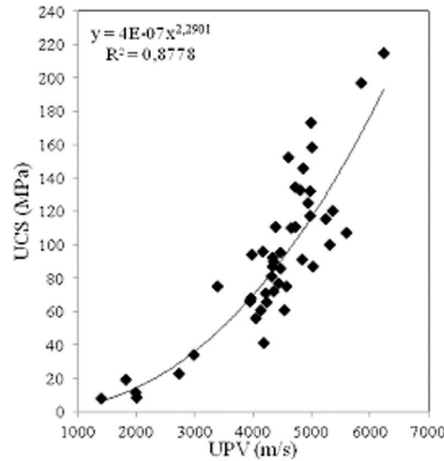
Sınıf	UPV (m/s)	Tanımlama	Bütün kayaçlar	Magmatik	Metamorfik	Tortul
1	<2500	Çok düşük hız	4 (%8.5)	–	–	4
2	2500 – 3500	Düşük hız	3 (%6.4)	1	–	2
3	3500 – 4000	Orta hız	4 (%8.5)	3	1	–
4	4000 – 5000	Yüksek hız	27 (%57.4)	18	6	3
5	>5000	Çok yüksek hız	9 (%19.1)	7	1	1
Toplam kayaç sayısı			47	29	8	10

Çizelge 3. Kayaçların ultrasonik dalga hızına göre sınıflandırılması (Anon, 1979)

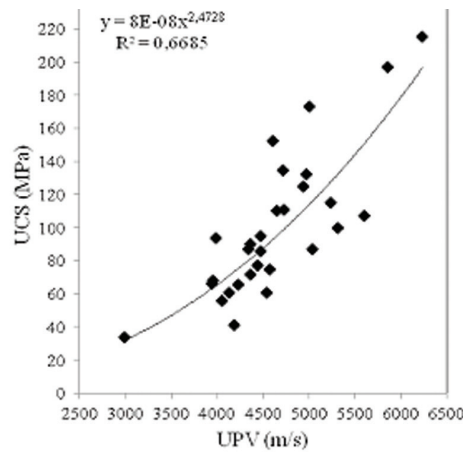
3.2 Verilerin İstatistiksel Analizleri

Her bir bağımsız değişken için basit regresyon analizleri yapılmıştır. Elde edilen ilişkiler arasında (üs, üstel, logaritmik ve doğrusal (lineer)) deneysel sonuçları en iyi temsil eden ilişki belirlenmiştir. İlişkinin kuvveti R^2 kullanılarak değerlendirilmiştir. İlk olarak, bütün kayaçların UCS değerleri ile UPV değerleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Daha sonra kayaçların jeolojik kökenine göre (magmatik, metamorfik ve tortul) ayrı ayrı UCS ile UPV arasında bir ilişki olup olmadığına bakılmıştır.

Tüm kayaç bazında yapılan basit regresyon analizine göre; UCS ile UPV arasında anlamlı doğrusal olmayan bir ilişki gözlenmiştir (Şekil 1). UCS ile UPV arasındaki ilişkinin kuvvetini ifade eden $R^2=0.8778$ olarak bulunmuştur. Magmatik kayaçlar için UCS ile UPV arasındaki ilişki anlamlı olmasına rağmen, determinasyon katsayısı ($R^2=0.6685$) tüm kayaçlar için bulunan determinasyon katsayısından daha düşük çıkmıştır (Şekil 2). Metamorfik ve tortul kayaçlarda UCS ile UPV arasında kuvvetli pozitif lineer ilişki gözlenmiş olup, determinasyon katsayıları sırasıyla $R^2=0.9076$ ve $R^2=0.9476$ olarak bulunmuştur (Şekil 3 ve Şekil 4). Metamorfik kayaçlarda dayanım arttıkça veya yüksek dayanımlı metamorfik kayaçlarda UPV ile UCS değerleri arasındaki ilişkinin arttığı anlaşılmaktadır. Diğer bir deyişle, yüksek dayanımlı metamorfik kayaçlarda UPV deneyinden UCS tahmininin daha güvenilir olduğu gözlenebilmektedir. Bununla beraber tortul kayaçların, UCS değerlerindeki UPV değerleri hafif saçınım göstermesine rağmen, en yüksek determinasyon katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Şekillerden (Şekil 1–4) görüldüğü gibi UCS değerleri arttıkça UPV değerleri de artış göstermiştir.

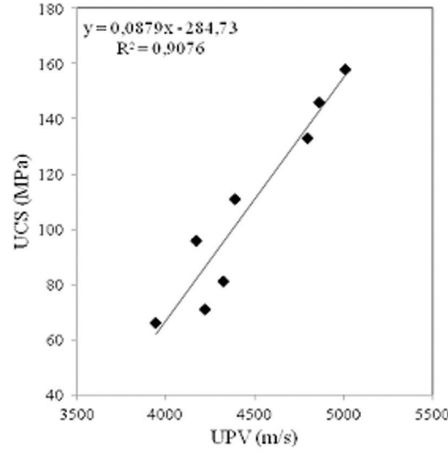


Şekil 1. Bütün kayaçlarda UCS ve UPV arasındaki ilişki

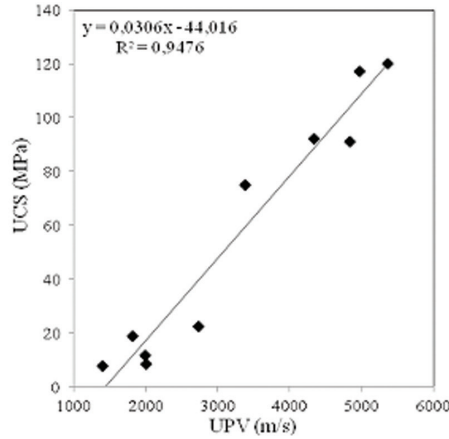


Şekil 2. Magmatik kayaçlarda UCS ve UPV arasındaki ilişki

Literatürde birçok yazar (Diamantis ve ark., 2009; Kahraman, 2001; Lama ve Vutukuri, 1978; Yagiz, 2011) ultrasonik dalga hızı ile kayaç özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemişler ve kayaç parametrelerinin dalga hızı ile yakından ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Kılıç ve Teymen (2008) ve Moh'd (2009) UCS ile UPV arasında doğrusal olmayan yüksek bir ilişki (sırasıyla; $R^2=0.94$ ve 0.83) bulmuşlardır. Kahraman (2001) UCS ve UPV arasında doğrusal olmayan bir ilişki bulmuş olup ($r=0.83$), dayanım arttıkça UPV değerlerinin daha fazla saçınım gösterdiğini ifade etmiştir. Yasar ve Erdoğan (2004) UCS ile UPV arasında doğrusal bir ilişki ($R^2=0.80$) bulmuşlardır. Ayrıca, Babacan ve ark. (2012) UCS ve UPV arasında doğrusal bir ilişki ($R^2=0.79$) bulmuşlardır. Bu çalışmada, UCS ve UPV arasında tüm kayaç bazında ve magmatik kökenli kayaçlarda doğrusal olmayan, metamorfik ve tortul kayaçlar da ise doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Bu çalışmadaki kayaç sayısı oldukça fazla olduğundan kayaçların kökenine yönelik ayrı ayrı UCS ile UPV arasındaki ilişkiler incelenebilmiştir.



Şekil 3. Metamorfik kayaçlarda UCS ve UPV arasındaki ilişki



Şekil 4. Tortul kayaçlarda UCS ve UPV arasındaki ilişki

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 29'u magmatik, 8'i metamorfik ve 10'u tortul olmak üzere 47 farklı kayaç türü için tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve ultrasonik P dalga hızı (UPV) deneyleri yapılmıştır. UCS ile UPV sınıflamalarına göre kayaçlar değerlendirilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımının tahminine yönelik basit regresyon analizleri yapılmıştır. Literatürde genellikle tek bir kökene veya tüm kayaçların jeolojik kökenlerini içerecek şekilde UPV'den UCS tahminine yönelik eşitlik geliştirilmektedir. Bu çalışmada, UPV'den UCS tahminine yönelik hem tüm kayaç

bazında hem de ayrı ayrı kayaçların jeolojik kökenine (magmatik, metamorfik ve tortul) yönelik regresyon analizleri yapılmıştır. Magmatik kayaçlarda daha az güvenilir olmasına rağmen, UPV değerlerinin metamorfik ve tortul kayaçlarda oldukça yüksek güvenilirlikle UCS'yi temsil ettiği görülmüştür.

Kaynaklar

- Altındağ, R., 2012. Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks. *The Southern Afr. Inst. Min. Metall.* 112, 229-237.
- Anon., 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1-rock and soil materials. *Bull. Int. Ass. Eng. Geo.* 19, pp. 364-371.
- ASTM., 1984. Standart test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. *Soil and rock, building Stone, annual book of ASTM standards 4.08.* ASTM, Philadelphia, Pennsylvania.
- Babacan, A.E., Ersoy, H., Gelişli, K., 2012. Kayaçların fiziksel, mekanik ve elastik özelliklerinin ultrasonik hız tekniği ve zaman-frekans analiziyle belirlenmesi: Bej kireçtaşları (KD Türkiye) üzerine örnek bir çalışma. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 36 (1), 63–73.
- Christaras, B., Mariolakos, I., Foundoulis, J., Athanasias, S., Dimitriou, A., 1997. Geotechnical input for the protection of some Macedonian Tombs in Northern Greece. *Proceedings of the 6th International Symposium Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Rhodes*, pp. 125–132.
- Christaras, B., 2003. P-wave velocity and quality of building materials. *Proceedings of the International Symposium Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul*, Yuzer, E., Ergin, H., and Tugrul, A. (eds.). pp. 295–300.
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. Engineering classifications and index properties of intact rock. *Technical report no. AFWL-TR 65-116*, University of Illinois: p. 300.
- Diamantis, K., Gartzos, E., Migiros, G., 2009. Study on uniaxial compressive strength, point load strength Index, dynamic and physical properties of serpentinites from central Greece: Test results and empirical relations. *Eng Geol.*, 108, 199–207.
- Ersoy, H., Kanik, D., 2012. Multicriteria decision-making analysis based methodology for predicting carbonate rocks' uniaxial compressive strength. *Earth Sci. Res. J.* 16 (1), 65–74.
- Fener, M., Kahraman, S., Bilgil, A., Günaydin, O., 2005. A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strength of rocks. *Rock Mech Rock Eng* 38 (4), 329–343.
- Gladwin, M.T., 1982. Ultrasonic stress monitoring in underground mining. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 19, 221–228.
- ISRM., 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, Hudson (Eds.), *Suggested methods prepared by the commission on testing methods*, International Society for Rock Mechanics. ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey. Pp. 628.
- Kahraman, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38, 981–994.
- Kahraman, S., 2002. Estimating the direct P-wave velocity value of intact rock from indirect laboratory measurements. *Int J Rock Mech Min Sci.*, 39, 101–104.
- Kahraman, S., 2007. The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonics*, Vol. 46, 341–348.
- Karaman, K., Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., 2010. Killi-karbonatlı kayaçlarda numune uzunluğunun ultrasonik P-dalga hızı üzerindeki etkisi. *Madencilik Dergisi*, 49 (4), 37-45.
- Karaman, K., Erçikdi, B., K., Cihangir, F., Kesimal, A., 2011. Kayaçların tek eksenli basınç

- dayanımı tahmininde Schmidt çekici sertlik tayini değerlendirme yöntemlerinin incelenmesi. 22. Dünya Madencilik Kongresi, Ankara, 87-94.
- Karpuz, C., Pasamehmetoglu, A.G., 1997. Field characterization of weathered Ankara andesites. Eng. Geol., p.17.
- Kılıç, A., Teymen, A., 2008. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. Bull. Eng. Geol. Environ., 67, 237-244.
- Lama, R.D., Vutukuri, V.S., 1978. Handbook on mechanical properties of rocks. Trans Tech Publications, Vol. 2, Clausthal, Germany.
- Moh'd, B.K., 2009. Compressive strength of vuggy oolitic limestones as a function of their porosity and sound propagation. Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences 2(1), 18–25.
- Onodera, T.F., 1963. Dynamic investigation of foundation rocks, In Situ. in: Proceedings of the 5th US Symposium on Rock Mechanics, pp. 517–533.
- Ramana, Y.V., Venkatanarayana, B., 1973. Laboratory studies on Kolar rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 10, 465–489.
- Shalabi, F.I., Cording, E.J., Al-Hattamleh, O.H., 2007. Estimation of rock engineering properties using hardness tests. Eng Geol 90, 138-147.
- Thill, R.E., Bur, T.R., 1969. An automated ultrasonic pulse measurement system. Geophysics. 34, 101–105.
- Tugrul, A., Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. Eng Geol., 51:303–317.
- Vasconcelos, G., Lourenco, P.B., Alves, C.A.S., Pamplona, J., 2008. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. Ultrasonics 48, 453-466.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., Gardner, L.W., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. Geophysics. 21, 41–70.
- Yagiz, S., 2011. P-wave velocity test for assessment of geotechnical properties of some rock materials. Bull Mater Sci., 34, 947–953.
- Yasar, E., Erdogan, Y., 2004. Correlating sound velocity with density, compressive strength and young modulus of carbonate rocks. Int J Rock Mech Min Sci., 41(5), 871–875.
- Young, R.P., Hill, T.T., Bryan I.R., Middleton, R., 1985. Seismic spectroscopy in Fracture characterization. Quart. J. Eng. Geol. 18, 459–479.