

Kayaların tek eksenli basınç dayanımının geniş bir veritabanına ait P-dalga hızı değerleriyle tahmin edilmesi

Estimating the uniaxial compressive strength of rocks using P-wave velocity values from a large database

Hakan ERSOY¹ , Muhammet Oğuz SÜNNETCİ*¹ , Murat KARAHAN² , Arzu FIRAT ERSOY¹ 

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, 61300, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 23.04.2025

• Kabul tarihi / Accepted: 23.08.2025

Öz

Bu çalışma, kayaların tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) ile boyuna dalga hızı (V_p) arasındaki istatistiksel ilişkiyi değerlendirmekte ve σ_{ci} 'nin tahminine yönelik olarak geniş bir veritabanına dayanan bir tahmin modeli geliştirmeyi amaçlamaktadır. σ_{ci} , jeoteknik ve mühendislik uygulamalarında temel bir parametre olmasına karşın standartlara uygun örnekler üzerinde deneysel olarak belirlenmesi zaman alıcı olmaktadır. Buna karşın, boyuna dalga hızı ölçümleri nispeten hızlı, tahribatsız ve pratik bir yöntem olarak öne çıkmakta, dolayısıyla dayanım tahmini açısından cazip bir alternatif sunmaktadır. Çalışma kapsamında, 70 farklı litolojiye ait 467 adet örnek üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler, literatürde yer alan 740 örnekle birleştirilmiş ve toplamda 1207 örnekten oluşan geniş bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti üzerinden gerçekleştirilen basit regresyon analizleri sonucunda en yüksek korelasyon katsayısı eksponansiyel modelde elde edilmiştir ($R^2 = 0.72$). Ancak uygulama kolaylığı ve benzer doğruluk düzeyi nedeniyle doğrusal regresyon modelinin ($\sigma_{ci} = 0.032V_p - 52$) pratikte uygulanması önerilmiştir. Tahmin modeli üzerinde gerçekleştirilen t-testleriyle hem modelde kullanılan bağımsız değişkenlerin hem de modelin kendisinin %95 anlamlılık düzeyinde ($p < 0.05$) istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, V_p değeri 6000 m/s'nin üzerinde olan örneklerin çoğunlukla 100 MPa'nın üzerinde σ_{ci} değerine, 3000 m/s altındaki örneklerin ise 75 MPa altında σ_{ci} değerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, V_p verilerine dayalı tahmin modelleri, özellikle laboratuvar deneylerinden önce σ_{ci} 'nin hızlı bir şekilde kestirilmesi konusunda oldukça faydalı olabilmektedir.

Anahtar kelimeler: İstatistiksel analiz, P-dalga hızı, Regresyon analizi, Tahmin modeli, Tek eksenli basınç dayanımı

Abstract

This study evaluates the statistical relationship between the uniaxial compressive strength (σ_{ci}) of rocks and the P-wave velocity (V_p) and aims to develop a prediction model based on a large database for the estimation of σ_{ci} . Although σ_{ci} is a fundamental parameter in geotechnical and engineering applications, its experimental determination on samples complying with standards is time-consuming. On the other hand, P-wave velocity measurements stand out as a relatively fast, non-destructive and practical method, thus offering an attractive alternative in terms of strength estimation. Within the scope of the study, the data obtained from laboratory tests on 467 samples belonging to 70 different lithologies were combined with 740 samples in the literature and a large data set consisting of a total of 1207 samples was created. As a result of simple regression analyses performed on this data set, the highest correlation coefficient was obtained in the exponential model ($R^2 = 0.72$). However, due to its ease of application and similar accuracy level, the linear regression model ($\sigma_{ci} = 0.032V_p - 52$) was recommended for practical application ($R^2 = 0.70$). With the t-tests performed on the prediction model, it was determined that both the independent variables used in the model and the model itself were statistically significant at the 95% significance level ($p < 0.05$). The results show that samples with a V_p value above 6000 m/s mostly have a σ_{ci} value above 100 MPa, while samples below 3000 m/s mostly have a σ_{ci} value below 75 MPa. In this context, prediction models based on V_p data can be quite useful in the rapid estimation of σ_{ci} , especially before laboratory experiments.

Keywords: Statistical analysis, P-wave velocity, Regression analysis, Prediction model, Uniaxial compressive strength

*Muhammet Oğuz SÜNNETCİ; moguzsunnetci@ktu.edu.tr

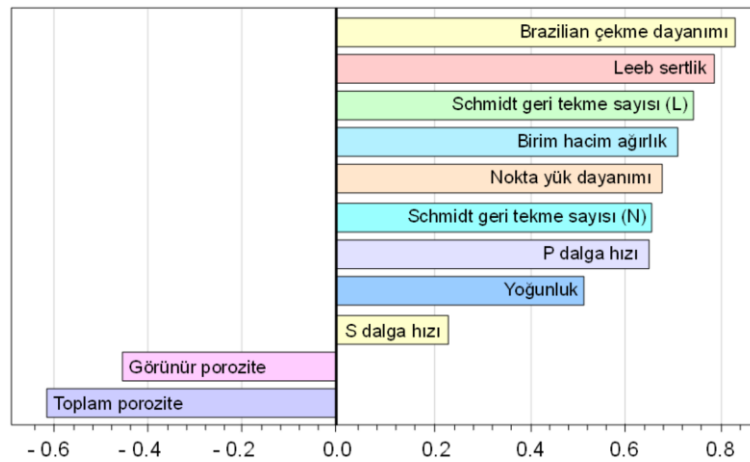
1. Giriş

1. Introduction

Tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}), kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde, kaya kütle sınıflama sistemlerinde, kaya kütle stabilite ve taşıma gücü analizlerinde en çok kullanılan girdi parametrelerinden biridir. Ayrıca, doğal yapı taşlarının değerlendirilmesinde, istinat yapısı ve tahkimat tasarımında, uygun dolgu malzemesi seçiminde de sıklıkla kullanılmaktadır.

Deneyin laboratuvar ortamında uygulanmasının zorunlu olması, standartlara uygun örnek hazırlamadaki zorluklar ve tüm deney prosedürünün zaman alıcı olması gibi nedenlerden dolayı araştırmacılar σ_{ci} tahmininde basit indeks deneylerden elde edilen verilerin kullanımına yönelik birçok çalışma yapmıştır. Özellikle 2000’li yılların öncesinde genel eğilim Schmidt çekici geri tepme sayısı ve nokta yük dayanımı değerleri kullanılarak basit regresyon eşitlikleriyle σ_{ci} tahmini üzerine olurken (Deere & Miller, 1966; Bieniawski, 1975; Irfan & Dearman, 1978; Sheorey & Kulhawy, 1984; ISRM, 1985; Ulusay vd., 1994; Gökçeoğlu, 1996; Kahraman, 1996; Tuğrul & Zarif, 1999; Kahraman, 2001), 2000’li yılların başlarından itibaren boyuna dalga hızı ve Leeb sertlik değeri kullanılarak yapılan tahmin çalışmaları artmıştır (Tuğrul & Zarif, 1999; Kahraman, 2001; Çobanoğlu & Çelik, 2008; Kılıç & Teymen, 2008; Sharma & Singh, 2008; Diamantis vd., 2009; Moradian & Behnia, 2009; Kurtuluş vd., 2012; Khandelwal, 2013; Armaghani vd., 2016; Çelik vd., 2020; Benavente vd., 2021; Ulusay vd., 2025). Birim hacim ağırlık, porozite, dolaylı çekme dayanımı değerleri ile σ_{ci} arasındaki istatistiksel ilişkilere yönelik çalışmalar ise yaygın kullanım alanı bulamadığı için literatürde çok fazla yer almamıştır (Kidybinski, 1980; Liang vd., 2016; Altındağ & Güney, 2010; Farah, 2011; Kahraman vd., 2012; Nazir vd., 2013).

Literatürde σ_{ci} ile basit indeks deney sonuçları arasındaki ilişkilerin araştırıldığı birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda genel olarak indirekt çekme dayanımı, Leeb sertliği, Schmidt geri tepme sayısı, nokta yük dayanımı, ultrasonik dalga hızı gibi değerlerle yoğunluk, birim hacim ağırlık, porozite gibi basit indeks deney sonuçları kullanılmıştır (Şekil 1). Şekil 1’de σ_{ci} ile diğer parametreler arasındaki en yüksek regresyon katsayısı değerinin Brazilian çekme dayanımı, Schmidt geri tepme sayısı ve Leeb sertlik değerleri kullanılarak yapılan tahminlerden elde edildiği görülmektedir (Wang vd., 2021). Bu ilişkilere ait regresyon katsayısı değerleri 0.75’in üstündedir. Boyuna dalga hızı ve toplam porozite değeri ile yapılan tahminlerde korelasyon katsayısı ortalaması 0.6’dan biraz yüksek, yoğunluk, birim hacim ağırlık, görünür porozite gibi basit indeks deney verileri kullanılarak yapılan tahminlerde ise bu değer 0.5’in altındadır.



Şekil 1. Tek eksenli basınç dayanımı ile diğer parametreler arasındaki korelasyon katsayısı (yatay eksen) değerleri (Wang vd. 2021’den değiştirilerek).

Figure 1. Coefficient of correlation values (horizontal axis) between uniaxial compressive strength and other parameters (modified from Wang et al., 2021).

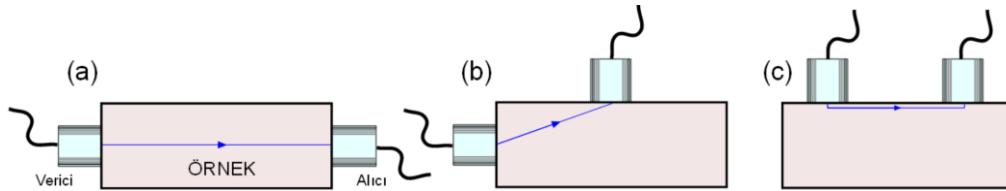
Bu çalışma kapsamında tek eksenli basınç dayanımı tahmininde en çok kullanılan parametrelerden biri olan boyuna dalga hızı değeri dikkate alınmış, bu kapsamda literatürde geçmişten günümüze kadar yapılan tahmin çalışmaları değerlendirilmiş, tüm bu çalışmalara ek olarak laboratuvarla farklı litolojik özelliklere sahip karot örnekleri üzerinde yapılan deney sonuçları kullanılarak geniş bir veri seti yardımıyla σ_{ci} ve boyuna dalga hızı ilişkisi basit regresyon analizleri uygulanarak irdelenmiştir.

Günümüzde, tek eksenli basınç dayanımı deneyinin hemen hemen tüm ticari ve akademik laboratuvarlarda uygulanan rutin ve hızlı bir deney olması, tahmin çalışmalarının hızını azaltmıştır. Ancak bazı mühendislik uygulamalarında kaya malzeme dayanımının belirlenmesi mümkün olmayabilir ve bu nedenle dayanım tahmininde indirekt yöntemlerin kullanılması zorunluluğu ortaya çıkabilir. Özellikle;

- (i) uygulamanın her aşamasında tek eksenli basınç dayanımının belirlenmesine ihtiyaç duyulması ve bunun zaman ve mekân açısından mümkün olmaması durumunda (örneğin her ano kazısı sonrası tünel aynasında kaya kütle sınıflama sistemlerine göre puanlama yapılırken),
- (ii) deney için örnek temin etmenin mümkün olmadığı durumlarda (örneğin tarihi yapılarda),
- (iii) düşük dayanımlı veya lamine kayaçlarda standartlara uygun örnek temin edilememesi durumunda
- (iv) acil çözüm gerektiren bir mühendislik uygulamasının olması durumunda pratik ve hızlı olması açısından indirekt yöntemler dayanım tahmininde tercih edilebilir.

Yukarıda açıklanan koşullar mevcut olsa da günümüzde araştırmacılar genel olarak basit tahmin eşitlikleri geliştirmek yerine literatürde yaygın kullanılan eşitlikleri değerlendirme (Wang vd., 2019; Rahman & Sarkar, 2021; Liu vd., 2022) veya bilgisayar destekli uygulamalar ile tahmin gerçekleştirme eğilimindedir (Armaghani vd., 2016; Headari vd., 2018; Rahman & Sarkar, 2021; Asteris vd., 2024). Ancak burada doğru tahmin modelini belirlemek kadar, kullanışlı, pratik ve hızlı bir yöntemin geliştirilmesi de büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle özellikle derin öğrenme, bulanık mantık, fuzzy lojik vb. bilgisayar uygulamaları ile yapılan tahminlerde doğruluk artsa da bu çalışmaların pratik uygulamalarda yeri yoktur. Bununla birlikte indirekt çekme deneyinde silindirik örnek ihtiyacı olduğu için bu deneyin de σ_{ci} 'nin tahmininde kullanımı çok pratik değildir.

Ultrasonik dalga hızı ise mineralojik bileşim, doku, mikro çatlak oranı, ayrışma derecesi ve boşluk oranı gibi birçok parametreyle ilişkili olması, pratik ve tahribatsız bir deney ile belirlenebilmesi ve litolojiden bağımsız bir parametre olması nedeniyle, kayaların dayanım özelliklerini tahmin etmek amacıyla birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır. ASTM (2008) tarafından standardize edilen deneyde, alıcı ve vericinin malzeme üzerindeki temas yüzeylerinin karşılıklı olması gerekir. Bu nedenle deney çoğu zaman yine laboratuvar ortamında ve silindirik/küp gibi şekilli örnekler üzerinde uygulanmaktadır. Bu prosedür, dayanım tahmininde ultrasonik ölçümleri pratik olmaktan uzaklaştırmaktadır. Ancak bu deney bilindiğinin aksine laboratuvarda uygulanabildiği gibi arazi ortamında da rahatlıkla uygulanabilmektedir. Şekil 2'de alıcı ve vericinin farklı konumlarına göre uygulanan 3 farklı konfigürasyon görülmektedir. Bunlar (1) direkt teknik (Şekil 1b), (2) yarı direkt teknik (Şekil 1c) ve (3) dolaylı tekniktir (Şekil 1d) (Ersoy vd., 2019).



Şekil 2. Alıcı ve vericinin konumuna göre ultrasonik hız ölçüm teknikleri (a: direkt, b: yarı direkt, c: dolaylı teknik) (Ersoy vd., 2019).

Figure 2. P-wave velocity measurement techniques according to the location of the receiver and transmitter (a: direct, b: semi-direct, c: indirect technique) (Ersoy vd., 2019).

Farklı tekniklerden elde edilen boyuna dalga hızı değerlerinin farklı olacağı düşünülebilir. Ancak yapılan çalışmalarda, ultrasonik hızın örnek geometrisinden etkilenmediğini, yarı direkt ve dolaylı ölçümlerde ölçüm mesafesinin 20 cm'den fazla olması durumunda her üç teknikten elde edilen dalga hızı değerlerinin eşit olduğunu belirlenmiştir (Malhotra & Carino, 2004; Ersoy vd., 2019). Bu sonuç arazi ortamında farklı ölçüm teknikleriyle belirlenebilen ultrasonik dalga hızının belli sınır koşullarında tek eksenli basınç dayanımı tahmininde çok pratik bir yaklaşım olduğunu net olarak göstermektedir.

Literatürde ultrasonik ölçümlerden elde edilen boyuna dalga hızı değerleri kullanılarak tek eksenli basınç dayanımının tahminine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmaların çoğu, bir veya birkaç litolojiden elde edilen eşitlikleri yansıtsa da birçok farklı litolojinin de birlikte değerlendirildiği çalışmalarda mevcuttur. Tablo 2'de σ_{ci} 'nin tahmininde 5 ve daha fazla litolojide kayaç grubu için basit regresyon analizleri ile üretilen eşitliklere ait özet bilgiler verilmiştir. Tablo 2 değerlendirildiğinde en yüksek regresyon katsayısı değerlerinin

genel olarak doğrusal ilişkilerde elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte en düşük regresyon katsayıları ise eksponansiyel eşitliklerde görülmüştür.

Tablo 1. Tek eksenli basınç dayanımı ile boyuna dalga hızı arasındaki ilişkiyi 5 ve daha fazla litoloji ile yansıtan basit regresyon eşitlikleri.

Table 1. Simple regression equations reflecting the relationship between uniaxial compressive strength and P-wave velocity with 5 and more lithologies.

Araştırmacı	Örnek grubu	Denklem	Eşitlik	R ²	V _p aralığı	σ _{ci} aralığı
Sharma & Singh (2008)	7	Doğrusal	$\sigma_{ci} = 0.0642 V_p - 117.99$	0.90	1845-3026	5-72
Khandelwal & Singh (2009)	12		$\sigma_{ci} = 0.1333 V_p - 227.19$	0.96	1741-2116	9-58
Sarkar vd. (2012)	10		$\sigma_{ci} = 0.039 V_p - 50.01$	0.93	1468-5013	21-165
Khandelwal (2013)	12		$\sigma_{ci} = 0.033 V_p - 34.83$	0.87	1682-4657	33-133
Selçuk & Nar (2016)	8		$\sigma_{ci} = 22.189 V_p - 30.32$	-	1720-5170	2-138
Sharma vd. (2017)	6		$\sigma_{ci} = 0.0389 V_p - 50.00$	0.93	1845-3026	5-72
Kahraman (2001)	6	Üstel	$\sigma_{ci} = 9.95 V_p^{1.21}$	0.83	1000-6300	11-149
Kılıç & Teymen (2008)	10		$\sigma_{ci} = 2.304 V_p^{2.4315}$	0.94	1470-6750	7-239
Yağız (2011)	5		$\sigma_{ci} = 0.258 V_p^{3.543}$	0.92	3800-5600	32-114
Altındağ (2012)	7		$\sigma_{ci} = 12.743 V_p^{1.194}$	0.79	1000-6750	3-173
Karakul & Ulusay (2013)	13		$\sigma_{ci} = 7.182 V_p^{1.6}$	0.78	740-6160	5-114
Sharma vd. (2017)	6		$\sigma_{ci} = 8 \times 10^{-6} V_p^{1.977}$	0.84	1845-3026	5-72
Teymen & Mengüç (2020)	11		$\sigma_{ci} = 6.75 V_p^{1.68}$	0.70	1550-6660	14-192
Moradian & Behnia (2009)	64	Eksponansiyel	$\sigma_{ci} = 165.05 e^{4.452 / (V_p)}$	0.70	1826-6539	11-143
Sharma vd. (2017)	6		$\sigma_{ci} = 8.76 e^{0.0006(V_p)}$	0.82	1845-3026	5-72
Rahman & Sarkar (2021)	12		$\sigma_{ci} = 8.1469 e^{0.00045(V_p)}$	0.57	1100-6700	5-290

2. Malzeme ve yöntem

2. Material and method

Çalışmada kullanılan örnekler, Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarı'nda 2015-2025 yılları arasında çeşitli amaçlarla deneye tabi tutulan farklı litolojideki örneklerden oluşmaktadır. Söz konusu litolojiler arasında ignimbirit, tüf, diyabaz, bazalt, andezit, bazanit, dasit, spilit, mitritik ve sparitik kireçtaşı, traverten, mermer, granofir, dolerit, trakiandezit ve gabro bulunmaktadır. Tüm örnekler bloklardan NX çaplı elmas uçlu laboratuvar tipi karotiyer kullanılarak alınmıştır. ISRM önerileri dikkate alınarak boy/çap oranları 2.5-3 arasında değişen silindirik örnekler hazırlanmıştır. Tüm örneklerin alt ve üst yüzeyleri tungsten karbid törpüleme bıçağına sahip yarı-otomatik karot düzeltme makinesi ile düzeltilmiştir. Örnekler deneye tabi tutulmadan önce 24 saat süreyle 105°C'lik etüvde kurutulmuş ve oda şartlarında soğumaya bırakılmıştır.

2015-2025 yılları arasında 70 farklı kaya grubuna ait 467 örnek üzerinde ultrasonik hız deneyleri uygulanmış, daha sonra örnekler tek eksenli basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Tek eksenli basınç dayanımı ve P-dalga hızı deneyleri ISRM tarafından önerilen yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Ulusay & Hudson, 2007; Aydın, 2014). Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinde yükleme hızları 0.1-0.3 kN/sn arasında, yükleme süresi 5-10 dk arasında olacak şekilde uygulanmıştır. P-dalga hızı deneyleri Proceq Pundit Plus laboratuvar tip ölçüm cihazı ile 54 kHz frekans değerine sahip alıcı-verici ikilisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler silindirik örneklerin uzun eksenine paralel olacak şekilde yapılmıştır. Sinyal kalitesini en yüksek seviyede tutabilmek amacıyla örnek yüzeyiyle alıcı-verici arasına su bazlı bağlayıcı jel sürülmüştür.

Çalışmada literatür verilerine de yer verilmiştir. Literatür verileri alınırken çalışmada kullanılan örneklerin silindirik şekilli olmasına ve aynı örneklere ait tek eksenli basınç dayanımı verilerinin de verilmiş olmasına dikkat edilmiştir.

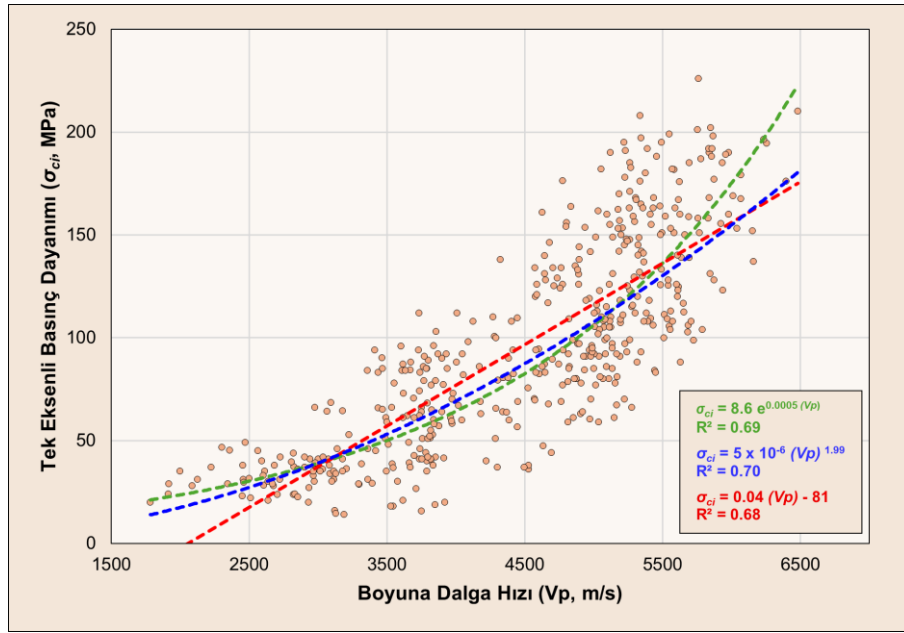
3. Tek eksenli basınç dayanımı tahmininde P-dalga hızı kullanımı

3. Using P-wave velocity to estimate uniaxial compressive strength

3.1. Deney verilerinin değerlendirilmesi

3.1. Evaluation of the test data

Tüm veriler kullanılarak hazırlanan $\sigma_{ci} - V_p$ grafiği ve farklı regresyon eğrilerine ait eşitlikler Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1 değerlendirildiğinde dağılımın $R^2 = 0.70$ regresyon katsayısı ile temsil edilen üstel bir dağılım olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalardan (467 adet) elde edilen veriler kullanılarak hazırlanan tek eksenli basınç dayanımı – boyuna dalga hızı grafiği ve σ_{ci} tahmin eşitlikleri

Figure 4. Uniaxial compressive strength – P-wave velocity graph and σ_{ci} estimation equations prepared using the data obtained from the experimental studies (467 points) conducted within the scope of this study.

Çalışmada ayrıca elde edilen veri seti ile literatürde mevcut 27 farklı kayaç grubunu temsil eden toplam 740 adet örneğe ait veri seti birlikte değerlendirilmiş, 100’e yakın farklı kayaç grubundaki toplam 1207 adet örneğe ait veri seti kullanılarak $\sigma_{ci} - V_p$ grafiği hazırlanmıştır (Şekil 5). Kullanılan veri seti aralıkları Tablo 2’de verilmiştir. Yapılan analizler sonrasında en yüksek regresyon katsayısı değerinin ($R^2 = 0.72$) eksponansiyel eşitlikte olduğu görülmektedir (Tablo 3). Grafikte genel olarak boyuna dalga hızı değerinin 6000 m/s’den yüksek olan örneklerin tek eksenli basınç dayanımlarının 100 MPa’ın üzerinde, 3000 m/s’den küçük olan örneklerin tek eksenli basınç dayanımlarının 75 MPa’ın altında olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Çalışma kapsamında kullanılan verilerin maksimum, minimum ve ortalama değerleri.

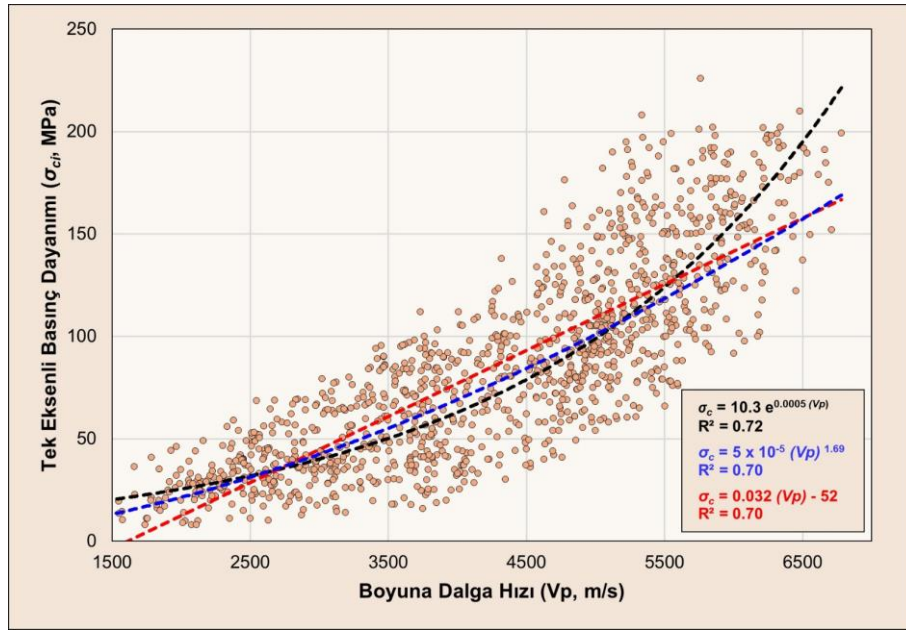
Table 2. Maximum, minimum, and mean values of the data used in the study.

Veri kaynağı	Örnek grubu	Örnek sayısı	V_p (m/s)			σ_{ci} (MPa)		
			Mak.	Min.	Ort.	Mak.	Min.	Ort.
Literatür verisi	27	740	6781	1145	4132	202	8	79
Bu çalışma	70	467	6481	1784	4476	226	14	96
Tüm veriler	97	1207	6781	1145	4265	226	8	86

Tablo 3. 100’e yakın farklı kayaç grubundaki toplam 1207 adet örneğe ait veri seti kullanılarak önerilen σ_{ci} tahminine yönelik regresyon eşitlikleri.

Table 3. Regression equations for estimating σ_{ci} proposed using a data set of 1207 samples in nearly 100 different rock groups.

Eşitlik	Eşitlik türü	R^2
$\sigma_{ci} = 10.03 e^{0.0004 (V_p)}$	Eksponansiyel	0.72
$\sigma_{ci} = 5 \times 10^{-5} (V_p)^{1.69}$	Üstel	0.70
$\sigma_{ci} = 0.032 (V_p) - 52$	Doğrusal	0.70



Şekil 5. 100'e yakın farklı kayaç grubundaki toplam 1207 adet örneğe ait veri seti kullanılarak hazırlanan tek eksenli basınç dayanımı – boyuna dalga hızı grafiği ve σ_{ci} tahmin eşitlikleri.

Figure 5. Uniaxial compressive strength – P-wave velocity graph and σ_{ci} estimation equations prepared using a data set of 1207 samples in total from nearly 100 different rock groups.

Tablo 3 ve Şekil 5'ten de görülebileceği gibi lineer, üstel ve eksponansiyel eşitliklerin regresyon katsayıları hemen hemen aynıdır. Bu nedenle, uygulanması üstel ve eksponansiyel eşitliklere göre çok daha kolay olan lineer eşitliğin kullanılması bu çalışma kapsamında önerilmektedir.

3.2. İstatistiksel analizler

3.2. Statistical analyses

Önerilen bir regresyon eşitliğinin regresyon katsayısı ne kadar yüksek olursa olsun eşitliğin ve eşitlikte kullanılan bağımsız değişkenlerin istatistiksel anlamlılığının test edilmesi şarttır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında önerilen lineer regresyon eşitliğinin istatistiksel anlamlılığını test etmek amacıyla IBM® SPSS v23.0 yazılımı kullanılarak t-testleri gerçekleştirilmiştir. t-testlerinde aynı zamanda sabit ve bağımsız (VP) değişkenin anlamlılığı da test edilmiş, böylece önerilen eşitliğin güvenilirliği araştırılmıştır. Tüm testler $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Önerilen lineer regresyon eşitliğine ve bağımsız değişkenlere ait anlamlılık parametreleri.

Table 4. Significance parameters of the proposed linear regression equation and independent variables.

Model	Standardize olmayan katsayılar		t	Anlamlılık (Sig.)	R	R ²	Anlamlılık (Sig.)
	B	Standart hata					
Sabit	-51,988	2,781	-18,695	0,000	0,829	0,688	0,000
V _P	0,032	0,001	51,517	0,000			

Tablo 4 incelendiğinde eşitlikte kullanılan sabit ve bağımsız değişkenin ve bu parametrelerle kurulan regresyon eşitliğinin $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı (Sig.<0,05) olduğu görülmektedir.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu çalışmada kayaçların boyuna dalga hızı değerleri ile tek eksenli basınç dayanımları arasındaki istatistiksel ilişkiler basit regresyon analizleri ile değerlendirilmiş, literatürdeki deneysel çalışmalardan elde edilen

sonuçlar ile çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar birlikte yorumlanarak çok geniş bir veri seti yardımıyla tek eksenli basınç dayanımının tahminine yönelik eşitlikler üretilmiştir.

Çalışma kapsamında 70 farklı kaya grubuna ait 467 örnek kullanılmıştır. Buna ek olarak, literatürde V_p değerleri kullanılarak yapılan σ_{ci} tahminine yönelik çalışmalar içerisinde veri seti net olan ve farklı kayaç gruplarını kapsayan çalışmalar dikkate alınmış, bu kapsamda 27 farklı kayaç grubuna ait toplam 740 deney sonucu çalışmaya dahil edilmiştir. Sonuç olarak 100'e yakın farklı kayaç grubunu temsil eden toplam 1207 örneğe ait V_p değerleri kullanılarak σ_{ci} değeri tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde tartışılmıştır.

(1) Yapılan istatistiksel analizlerde en yüksek regresyon katsayısının eksponansiyel eşitlikle sağlandığı görülmüştür (Tablo 3). Üstel ve doğrusal eşitliklerden elde edilen regresyon katsayısı değerleri ise daha küçüktür. Literatürde ise genel olarak doğrusal regresyon ilişkilerinde en yüksek regresyon katsayısı değerleri elde edilmiştir. [Sharma vd. \(2017\)](#) benzer şekilde aynı veri setinde farklı regresyon eşitlikleri üretmiş ve en yüksek regresyon katsayısı değerini doğrusal denklemde yakalamıştır. Ancak tüm denklemler değerlendirildiğinde veri seti dar bir aralıkta değişen çalışmalarda doğrusal denklemlerin ([Sharma & Singh, 2008](#)), veri seti geniş bir aralıkta değişen çalışmalarda ([Moradian & Behnia, 2009](#)) eksponansiyel ve üstel denklemlerin yüksek regresyon katsayısı değeri verdiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte; eksponansiyel, üstel ve doğrusal eşitliklerin regresyon katsayısı değerlerindeki bu farklılık ve örnek grupları içerisindeki potansiyel heterojenlik göz önüne alındığında, bu tip eşitliklerin tahmin performansının kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkili olmayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

(2) Bu çalışmada dayanımları 8 – 226 MPa arasında, boyuna dalga hızları 1145 – 6781 m/s arasında değişen çok geniş bir veri aralığı kullanılmıştır. Bu nedenle elde edilen 0.72 değerindeki regresyon katsayısı kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır. Literatürde genel olarak veri değer aralıkları çok geniş olmayan çalışmalarda yüksek regresyon katsayıları elde edilmiştir. Tablo 1'de en yüksek regresyon değerinin 0.96 ile [Khandewal & Singh \(2009\)](#) tarafından yapılan çalışmada elde edildiği görülmektedir. Bu çalışmada, veri seti içinde V_p aralığı 1741-2116 m/s, σ_{ci} aralığı ise 9-58 MPa arasında değişmekte olup, tüm veriler çok dar bir aralıkta kalmıştır. Tersine, [Rahman & Sarkar \(2021\)](#) tarafından yapılan çalışmada veri seti içinde V_p aralığı 1100-6700 m/s, σ_{ci} aralığı ise 5-290 MPa arasında değişmekte, tüm veriler çok geniş bir aralıkta kalmaktadır. Bu çalışmada ise regresyon değeri beklenildiği şekilde 0.57'dir.

(3) Grafikte genel olarak boyuna dalga hızı değerinin 6000 m/s'den yüksek olan örneklerin tek eksenli basınç dayanımlarının 100 MPa'ın üzerinde, 3000 m/s'den küçük olan örneklerin tek eksenli basınç dayanımlarının 75 MPa'ın altında olduğu görülmektedir. Bu değerler genel bir değerlendirme olması açısından faydalı olabilir.

(4) Çalışma kapsamında önerilen denklemlerin sadece arazi şartlarında, tek eksenli basınç dayanımı deneyinin sürekli tekrarlanması gerektiğinde ve bunun her an için mümkün olmadığı durumda (örneğin tünellerde anlık olarak kaya kütle sınıflama sistemlerinin uygulanması gerektiği durumlar), tarihi vb. yapılarda olduğu gibi deney için silindirik örnek temin etmenin mümkün olmadığı durumlarda veya laminalı kayaçlarda standartlara uygun örnek temin etmenin mümkün olmadığı durumlarda kullanılması önerilmektedir.

(5) Çalışma kapsamında önerilen regresyon eşitliklerinin regresyon katsayılarının birbirine çok yakın (0,7, 0,7, 0,72) olması nedeniyle tahmin modeli olarak uygulanması daha kolay olan lineer regresyon eşitliğinin kullanılması önerilmiştir.

(6) Önerilen lineer regresyon eşitliği üzerinde yapılan anlamlılık testlerinde hem eşitlikte kullanılan sabit ve bağımsız değişkenin hem de eşitliğin kendisinin %95 güven aralığında ($\alpha=0,05$) istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir.

Yazar katkısı

Author contribution

Hakan Ersoy literatür verilerinin derlenmesinde ve makalenin ilk taslağının hazırlanmasında katkı sunmuştur. Deneysel çalışmalar Murat Karahan ve Muhammet Oğuz Sünnetci tarafından yapılmıştır. Regresyon modelleri Hakan Ersoy ve Arzu Fırat Ersoy tarafından geliştirilmiştir. İstatistiksel analizler Mugammet Oğuz Sünnetci tarafından yapılmıştır. Tüm yazarlar makalenin son haline şekil vermiştir.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Altindag, R. (2012). Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(3), 229-237.
- Altindag, R., and Guney, A. (2010) Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. *Scientific Research and Essays*, 5(16), 2107 – 2118.
- Armaghani, J. D., Mohamad, T. E., Hajihassani, M., Yagiz, S., & Motaghedi, H. (2016). Application of several non-linear prediction tools for estimating uniaxial compressive strength of granitic rocks and comparison of their performances. *Engineering with Computers*, 32, 189-206. <https://doi.org/10.1007/s00366-015-0410-5>
- ASTM. (2008). D2845-00, Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017
- Aydin, A. (2014). Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0454-z>
- Bieniawski, Z. T. (1975). The point-load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, 9(1), 1-11. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(75\)90024-1](https://doi.org/10.1016/0013-7952(75)90024-1)
- Çobanoğlu, İ., & Çelik, S. B. (2008). Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hardness and P-wave velocity. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 491-498. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0158-x>
- Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. (Air Force Weapons Lab. Technical Report No. AFWL-TR 65-116). Kirtland Base, New Mexico
- 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. *Engineering Geology*, 108(3-4), 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.07.002>
- Ersoy, H., Karahan, M., Babacan, A. E., & Sünnetci, M. O. (2019). A new approach to the effect of sample dimensions and measurement techniques on ultrasonic wave velocity. *Engineering Geology*, 251, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.02.011>
- Farah, R. (2011). *Correlations between index properties and unconfined compressive strength of weathered ocala limestone*. [Yüksek Lisans Tezi, University of North Florida].
- Franklin, J. A. (1985). Suggested method for determining point load strength. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(2), 51-60. Pergamon.
- Gökçeoğlu, C. (1996). Schmidt sertlik çekici kullanılarak tahmin edilen tek eksenli sıkışma dayanımı verilerinin güvenilirliği üzerine bir değerlendirme. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 20(1), 78-81.
- Heidari, M., Mohseni, H., & Jalali, S. H. (2018). Prediction of uniaxial compressive strength of some sedimentary rocks by fuzzy and regression models. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 401-412. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0334-5>

- Irfan, T. & Dearman, W. (1978). Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 17(1). <https://doi.org/10.1007/BF02634696>
- Kahraman, S. (1996). Basıncı direnci tahmininde Schmidt ve nokta yük indeksi kullanmanın güvenilirliği. *KTU Jeoloji Muhendisliği Bolumu 30. Yıl Sempozyumu*. Trabzon.
- Kahraman, S. A. İ. R. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 981-994. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00039-9)
- Kahraman, S., Fener, M., & Kozman, E. (2012). Predicting the compressive and tensile strength of rocks from indentation hardness index. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(5), 331-339.
- Karakul, H., & Ulusay, R. (2013). Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 981-999. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0353-8>
- Khandelwal, M. (2013). Correlating P-wave velocity with the physico-mechanical properties of different rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 170, 507-514. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0556-7>
- Khandelwal, M., & Singh, T. N. (2009). Correlating static properties of coal measures rocks with P-wave velocity. *International Journal of Coal Geology*, 79(1-2), 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.004>
- Kılıç, A., & Teymen, A. (2008). Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 237-244. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0128-3>
- Kidybiński, A. (1981, August). Bursting liability indices of coal. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 18, No. 4, pp. 295-304). Pergamon.
- Kurtulus, C. E. N. G. İ. Z., Bozkurt, A., & Endes, H. (2012). Physical and mechanical properties of serpentized ultrabasic rocks in NW Turkey. *Pure and applied geophysics*, 169(7), 1205-1215. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0394-z>
- Liang, M., Mohamad, E. T., Faradonbeh, R. S., Jahed Armaghani, D., & Ghoraba, S. (2016). Rock strength assessment based on regression tree technique. *Engineering with Computers*, 32, 343-354. <https://doi.org/10.1007/s00366-015-0429-7>
- Liu, P. H., Wu, J. H., & Lee, D. H. (2022). New rock strength-based UCS-Vp correlation equation for different rock types by statistical regression methods. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 32, 100403. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2022.100403>
- Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2004). Nondestructive testing of concrete. *Boca Raton, New York, Washington DC 2nd Edition*. CRC Press LLC.
- Moradian, Z. A., & Behnia, M. (2009). Predicting the uniaxial compressive strength and static Young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test. *International Journal of Geomechanics*, 9(1), 14-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2009\)9:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2009)9:1(14))
- Nazir, R., Momeni, E., Armaghani, D. J., & Amin, M. M. (2013). Correlation between unconfined compressive strength and indirect tensile strength of limestone rock samples. *Electron J Geotech Eng*, 18(1), 1737-1746.
- Rahman, T., & Sarkar, K. (2021). Lithological control on the estimation of uniaxial compressive strength by the P-wave velocity using supervised and unsupervised learning. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(6), 3175-3191. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02445-8>
- Sharma, L. K., Vishal, V., & Singh, T. N. (2017). Developing novel models using neural networks and fuzzy systems for the prediction of strength of rocks from key geomechanical properties. *Measurement*, 102, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.01.043>
- Sharma, P. K., & Singh, T. N. (2008). A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 17-22. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0109-y>

- Teymen, A., & Mengüç, E. C. (2020). Comparative evaluation of different statistical tools for the prediction of uniaxial compressive strength of rocks. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(6), 785-797. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.06.008>
- Tuğrul, A., & Zarif, I. H. (1999). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering geology*, 51(4), 303-317. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00071-4)
- Ulusay, R., & Hudson, J. A. (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. *ISRM Turkish National Group*. Ankara, Turkey.
- Ulusay, R., Ersoy, H., Sünnetci, M. O., & Karahan, M. (2025). The leeb (Equotip) hardness test for rock materials: An overview, assessments on the factors influencing test results, and prediction models based on a large database. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(3), 1-46. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04170-w>
- Ulusay, R., Türeli, K., & Ider, M. H. (1994). Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. *Engineering Geology*, 38(1-2), 135-157. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90029-9)
- Wang, M., Wan, W., & Zhao, Y. (2020). Prediction of the uniaxial compressive strength of rocks from simple index tests using a random forest predictive model. *Comptes Rendus. Mécanique*, 348(1), 3-32. <https://doi.org/10.5802/crmeca.3>
- Yagiz, S. (2011). P-wave velocity test for assessment of geotechnical properties of some rock materials. *Bulletin of Materials Science*, 34, 947-953. <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0220-3>