





Kayacı oluşturan bileşenlerin Leeb sertliğine etkisi The effect of rock components on Leeb hardness

Mehmet Can Balcı^{1,*} , İsmail İnce² 

¹ Batman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 72000, Batman, Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı, kayaların tek eksenli sıkışma dayanımını dolaylı, tahribatsız, ucuz ve pratik bir şekilde tahmin etmek için son dönemde yaygın olarak kullanılan Leeb sertliğine (HL), örnek içindeki farklı bileşenlerin etkisini araştırmaktır. Bu amaçla, bileşiminde egemen olarak volkanik cam (VC) ve volkanik kayaç parçaları (VKP) içeren piroklastik kayaçtan küp şekilli örnekler hazırlanmıştır. Görüntü işleme programı (Image Pro Plus 6.0) vasıtasıyla küp örneklerin her bir yüzeyindeki volkanik kayaç parçası yüzdeleri (VKPY) belirlenmiştir. Ayrıca küp örneklerin her bir yüzeyinin HL değeri belirlenmiştir. VKPY değişimi ile HL değeri arasındaki ilişki basit regresyon analizi ile araştırılmış ve bu değerler arasında güçlü belirleme katsayıları bulunmuştur. Elde edilen bu ilişkilere göre, HL değerinin kayaç bileşiminde yer alan VKP'dan etkilendiği tespit edilmiştir. HL testinin bu tür kayaçlar için uygun olmadığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Leeb sertliği (HL), Görüntü işleme programı, Volkanik kayaç parçası (VKP), Piroklastik kayaç

1 Giriş

Leeb sertliği (HL), İsviçreli mühendis Dietmar Leeb tarafından 1975 yılında metaller ve polimerlerin sertliği belirlemek için geliştirilen tahribatsız bir testtir [1]. Bu testin taşınabilir olması ve test cihazının uygulanan darbe yönünü seçme olanağı sunması, cihazın farklı disiplinler (jeomorfoloji, inşaat mühendisliği, restorasyon çalışmaları ve kaya mekaniği) tarafından kullanılmasını yaygınlaştırmıştır [2-7]. Leeb sertliği ile ilgili kaya mekaniğindeki öncü çalışmalar, kayaların HL değerleri ile fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin irdelenmesi yönünde olmuştur [8-15]. Bu çalışmalarda en çok yoğunlaşılan alan, kayaların tek eksenli sıkışma dayanımının tahminidir. Bu değer tahmininde araştırmacılar basit regresyon [1, 8, 11-17], çoklu regresyon [9, 14], yapay sinir ağları [10] ve fuzzy [9] gibi yaklaşımları değerlendirmişlerdir. Bu çalışmalarda geliştirilen tahmin modellerinde yüksek korelasyon ilişkileri belirlenmiştir. Bazı araştırmacılar ise kayalarda yapılan HL testlerinin boyut faktörü [1, 8, 12, 13, 17-19], gözenek [20-22], tane veya kristal boyutundan [1] doğrudan etkilendiğini belirtmişlerdir. Kayaların HL değerine boyut faktörü

Abstract

The scope of this study is to investigate the effect of different components in the sample on Leeb hardness (HL), which has recently been widely used to predict the uniaxial compressive strength of rocks in an indirect, non-destructive, cost-effective, and practical way. For this purpose, cube-shaped samples were prepared from pyroclastic rocks consisting for the most part of volcanic glass (VG) and volcanic rock fragments (VRF). The percentage of volcanic rock fragments (VRFP) on each surface of the cube samples was determined using an image processing program (Image Pro Plus 6.0). Moreover, the HL value of each surface of the cube samples was determined. The correlation between the change in VRFP and HL value was investigated by simple regression analysis and strong coefficients of determination were found between these values. According to these correlations, it was determined that the HL value is affected by the VRF in the rock composition. As consequence, the HL test was found to be unsuitable for these types of rock.

Keywords: Leeb hardness (HL), Image processing program, Volcanic rock fragment (VRF), Pyroclastic rock

etkisini ortadan kaldırmak adına küp ve karot örnekler için gerekli örneklem boyut özellikleri tanımlanmıştır. İnce ve Bozdağ [1] küp örnekler için bir kenar uzunluğunun en az 7 cm olması gerektiğini belirtmişlerdir. Çelik vd. [19]'ne göre karot örneklerde yapılacak eksenel ve çapsal ölçümler için boy/çap oranı $\geq 1,5$ olmalıdır. Birçok araştırmacı kayaların porozitesinin artışı ile HL değerinde düşüş gözlemlendiğini belirtmişlerdir [1, 20, 22]. Ayrıca Çelik ve Çobanoğlu [22] çalışmalarında örnek yüzeyindeki gözeneklerin varlığının artışının Leeb sertlik cihazının çalışmasını etkilediğini ve HL değerlerinin ölçümlerinin alınmasının zorlaştırdığını belirtmişlerdir. İnce ve Bozdağ [1] kayaların içindeki iri tane veya iri kristallerin HL değerinde büyük sapmalar oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Bütün bu çalışmalara rağmen bu konuda detaylı çalışmaların yeterince olmadığını söylemek mümkündür. Kayaların HL değeri üzerine iri taneli kayaç parçalarının etkisini tespit etmek, kayalar için geliştirilecek HL standartlarının uygunluğunun ve kullanılabilirliğinin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada anglomera örneklerinden farklı tane boyutlarında volkanik kayaç parçaları içeren küp örnekler hazırlanarak bu küp örneklerin yüzeylerindeki

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetcan.balci@batman.edu.tr (M. C. Balcı)

Geliş / Received: 26.07.2024 Kabul / Accepted: 20.08.2024 Yayınlanma / Published: xx.xx.20xx

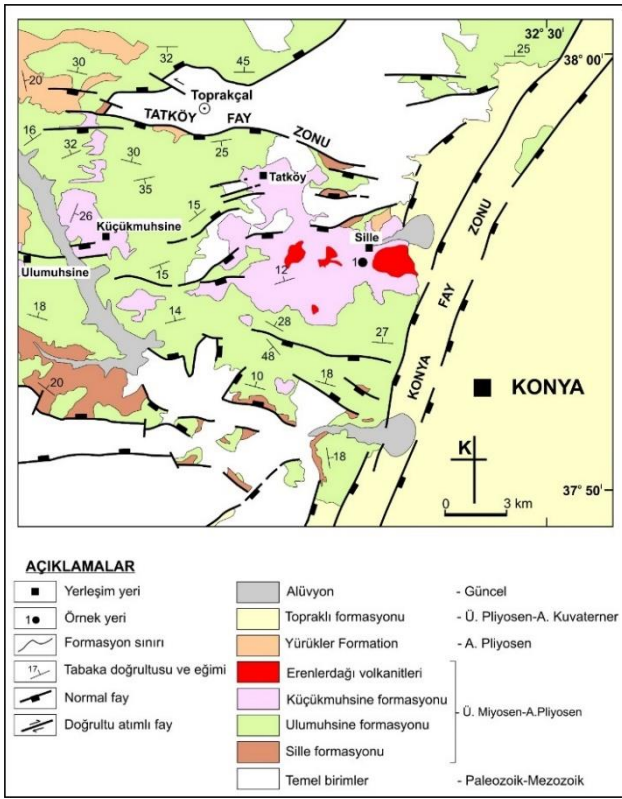
doi: 10.28948/ngumuh.1523160

farklı tanelerin oranlarının artışı ile HL değerindeki değişim araştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan örneklerin derlendiği alanın temelini Paleozoik ve Mezozoik yaşlı birimler oluşturmaktadır (Şekil 1). Bu birimler üzerine, açılal uyumsuzlukla kırmızı, kahverengi çamurtaş ve kumtaşı konglomeralarından oluşan Geç Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı Sille formasyonu gelmektedir [23]. Sille formasyonu üzerinde yanal düşey geçişle Ulumuhsine formasyonu yer almaktadır. Ulumuhsine formasyonu, kirli beyaz, krem, gri, bej ve sarı renkli, ince-kalın tabakalı gösel kireçtaşları ve kırıntılılardan oluşmaktadır [24].

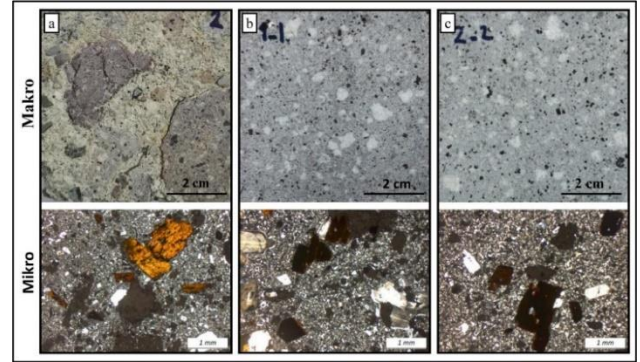


Şekil 1. Örneklerin derlendiği bölgenin jeoloji haritası (Aksoy ve Demiröz [25] ve Aksoy [26]’dan değiştirilerek alınmıştır)

Birimin yaşı Geç Miyosen-Erken Pliyosen'dir [23]. Ulumuhsine formasyonu üzerine yanal düşey geçişli olarak Küçükmuhsine formasyonu yer alır. Bu birim, beyaz, gri ve bazı yerlerde pembe renkli piroklastiklerden (tüf, tüfit, anglomera ve volkanik breş) oluşan ve volkanik kumtaşı ile aralanmalı volkano-sedimanter bir istif olup Geç Miyosen-Erken Pliyosen yaşlıdır [23]. Bu birimler, dasit, andezit ve bazaltik kayalardan oluşan Geç Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı Erenler Dağı volkanitleri tarafından kesilir. Erenler Dağı volkanitleri, alüvyon yelpazesi ve örgülü akarsu birikintilerinden oluşan Erken Pliyosen yaşlı Yörükler formasyonunun açılal uyumsuzluğu ile örtülür [23]. Yörükler formasyonu üzerine alüvyon yelpazesi

birikintilerinden oluşan Geç Pliyosen-Erken Kuvaterner yaşlı Topraklı formasyonu uyumsuzlukla gelir.

Bu çalışmada Konya bölgesinde yaygın olarak gözlenen Küçükmuhsine formasyonu içerisinde yer alan anglomera seviyelerinden alınan örnekler kullanılmıştır. Kayacı oluşturan bileşenlerin makro ve mikro resimleri Şekil 2’de verilmiştir. Numune gri renkli hamur fazının (VC) içerisinde feno kristaller (FK) ve farklı volkanik kayaç parçaları (VKP) içermektedir (Şekil 2a). Kayacın hamuru yer yer kül boyutu çoğunlukla lapilli boyutundaki tanelerden oluşmaktadır. Ayrıca bu birim içerisinde blok boyutunda volkanik kayaç parçaları yer almaktadır. Örneğin ince kesitlerinde başlıca bileşenini volkanik cam, plajiyoklaz, biyotit, kayaç parçası, kuvars ve opak mineral oluşturmaktadır (Şekil 2a ve Tablo 1). Örneği oluşturan hamur fazı ve farklı volkanik kayaç parçalarının mineralojik bileşimleri ve dokusal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Şekil 2a’daki anglomera örneğinin (1 nolu örnek) makro görünümü incelendiğinde kayacın hamur fazı ve farklı renkteki volkanik kayaç (VK1 ve VK2) parçalarından oluştuğu görülmektedir. Arazide Küçükmuhsine formasyonu içerisinde 1 nolu örneği oluşturan VK1 ve VK2 kayaç parçalarına benzer doku özelliklerindeki volkanik kayaç blok örnekleri (V1 ve V2) derlenmiştir. Burada V1 nolu örnek VK1, V2 nolu örnek ise VK2 ile benzer mineralojik ve dokusal özellikler sahiptir. Bu örneklerin makro ve mikro görünümü Şekil 2b, ve c’de verilmiştir. Her iki kayaç parçası renkleri farklı olmasına rağmen benzer mineralojik bileşim ve dokuya sahiptir. Streickeisen [27] sınıflandırmasına göre V1 ve V2 örnekleri dasit olarak adlandırılmıştır. Bütün örneklerin hamur fazı ikincil olarak silisleşmiştir.



Şekil 2. Kayaçların makro ve mikro görünümü, (a) Anglomera, (b) VK1, (c) VK2

2.2 Metot

Piroklastik kaya ve içinde yer alan volkanik kayaç bloklarının mineralojik-petrografik ve fiziksel özellikleri ile Leeb sertliği değerlerinin belirlenmesi amacıyla blok örnek derlemesi yapılmıştır. Daha sonra derlenen blok örneklerden TS EN-1936 [28]’da önerilen standarda göre her bir kayaç grubu için 7 cm x 7 cm x 7 cm ölçülerinde 5 adet küp örnek hazırlanmıştır. Hazırlanan küp örnekleri kullanılarak kayacın fiziksel özellikleri (kuru yoğunluk ve porozite) TS EN-1936 [28]’da önerilen yöntemle belirlenmiştir. P-dalgı hızı (Vp) değerleri ise ASTM E494-10 [29]’da belirtilen standartlar dikkate alınarak tespit edilmiştir. Bu

deney Pundit marka PL-200 model cihaz kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3a). Her bir örnekte ölçüm üç kez tekrarlanmıştır. Daha sonra bu değerlerin ortalaması alınarak örneğin Vp değeri belirlenmiştir. Her bir kayaç grubunun fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde 5 adet küp örnek kullanılmıştır.

Tablo 1. Piroklastik kayaçların dokusal özellikleri ve mineralojik bileşimleri

	Kayaçın Bileşenleri	Renk	Makro Özellikler
1	VC, VKP ve FK	Açık gri	İnce-orta taneli, afanitik porfirik dokulu
V1	VC ve FK	Lila	Afanitik porfirik dokulu
V2	VC ve FK	Gri	Afanitik porfirik dokulu
Mikro Özellikler			
Örnek No	Bileşenlerin % dağılımı	Doku	
1	Shf:86, Pl:5, By:3, Q:2, Kp:3, Op:1	Porfirik	
V1	Shf:48, Pl:25, By:17, Q:10, Op:1	Vitrofirik porfirik	
V2	Shf:48, Pl:24, By:15, Q:12, Op:1	Vitrofirik porfirik	

VC: Volkanik cam, VKP: Volkanik kayaç parçası, FK: Feno kristaller, Pl: Plajyoklaz, Kp: Kayaç parçası, Q: Kuvars, By: Biyotit, Op: Opak mineral, Shf: Silisleşmiş hamur fazı

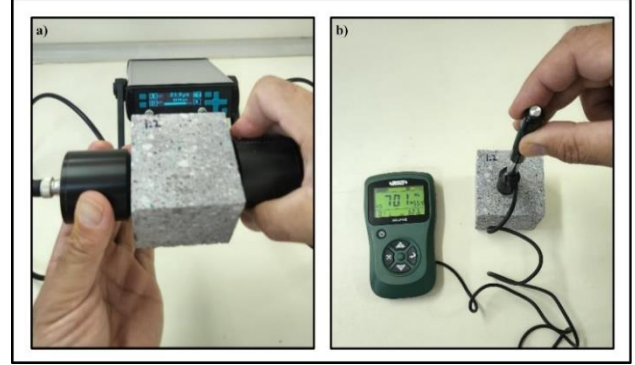
Leeb sertliği, test edilen malzemenin hem plastik hem de elastik özelliklerine bağlı olan dinamik veya geri tepme tipi yüzey sertliğinin ifadesidir [30]. Leeb sertliği, yay kuvvetinin ürettiği enerjinin küresel şekilli bir tungsten uca aktarılması ve ucun test ölçüm yüzeyinde sabit bir hızda darbe ve geri tepme enerjileri arasındaki oranın 1000 katının alınmasıyla hesaplanır. Leeb sertlik testinin çelik ürünler için geliştirilmiş bir standardı [30] olmasına rağmen, kayalar için standart olarak esas alınan bir test yoktur. Bu çalışmada Leeb sertlik ölçümleri Insize marka test cihazı ile darbe enerjili (11 Nmm) D-probe kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3b). Cihazın ölçüm aralığı 0 ile 999 HL arasında değişmekle birlikte doğruluk değeri ± 6 HL'dir. Ölçümden önce cihaz kalibre edilmiştir. Kayaçların (anglomera, V1 ve V2) HL değerinin belirlenmesinde İnce ve Bozdağ'ın [1] önerdikleri yaklaşım dikkate alınarak örneğin yüzeyinde 20 farklı noktada ölçülen değerlerin ortalaması olarak yapılmıştır (Şekil 3b).

Anglomera örneğinin yüzeyindeki VKP miktarının HL değerine etkisi araştırılırken küp numunelerin her bir yüzeyi için HL değeri belirlenmiştir. Her bir yüzeyin HL değeri belirlenirken yüzeyde rasgele 20 farklı noktada ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümlerin ortalaması alınarak yüzeye ait HL değerleri belirlenmiştir. Bu aşamada toplam 30 yüzeyde (5 küp örnek x 6 yüzey) ölçüm yapılmıştır.

Numunelerin yüzeyindeki volkanik kayaçların oranını belirlemek için her bir örneğin 6 yüzeyinde HL testinin ardından yüksek çözünürlüklü görüntüleri elde edilmiştir. Görüntülerin elde edilmesinde Canon EOS 450 (12 megapiksel) fotoğraf makinası kullanılmıştır. Daha sonra her bir yüzeydeki 5 mm'den büyük olan volkanik kayaç parçasının toplam yüzeydeki oranları belirlenmiştir. Bu amaç için Image Pro Plus 6.0 paket programı kullanılmıştır.

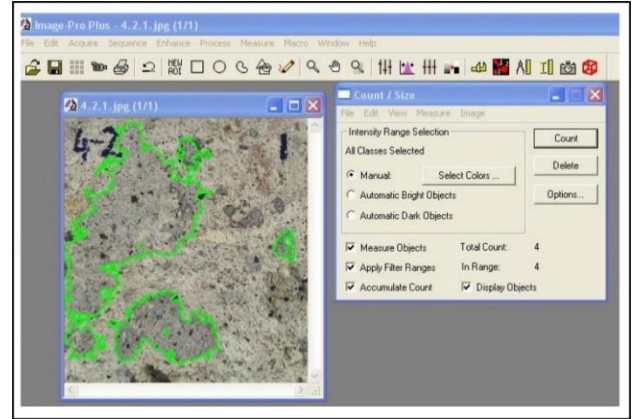
Bu paket programda volkanik kayaç parçalarına ait alanlar uygun "Range" ve "Smooth" değerleri seçilerek

manuel olarak belirlenmiştir (Şekil 4). Bu süreç her bir kayaç parçasının manuel olarak ölçülmesine yardımcı olmuştur. İnceleme alanı üzerindeki volkanik kayaç parçalarının dağılımını daha iyi görebilmek için görüntüleme maskeleme işlemi uygulanmıştır. En son aşamada ise her bir yüzeyde volkanik kayaç parçalarının sınırladığı alanlar belirlenmiştir.



Şekil 3. Kayaçlarda bazı fiziksel özelliklerin ölçümü: (a) P-dalga hızı, (b) Leeb sertliği

Çalışmada kullanılan kayaçların petrografik özellikleri TS EN-12407 [31]'de önerilen yöntemle ince kesitler hazırlanarak Leica marka DM 2700 P model polarize mikroskop kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 4. Örneklerin yüzeydeki VKP seçim aşamasından bir görünüm

3 Bulgular ve tartışma

Çalışmada kullanılan piroklastik kayacın ve bu kayacın bileşenlerinden VKP'yi temsil eden volkanik bloklara ait kayaçlardan elde edilen fiziksel özellikler (gözeneklilik, kuru yoğunluk, P dalga hızı) ve Leeb sertliğine (HL) ait istatistik değerler (minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma) Tablo 2'de verilmiştir. 1 nolu kayacın fiziksel özellikleri için istatistik değerler incelendiğinde, standart sapma değerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu örneğin minimum HL değeri 201.00 iken maksimum HL değeri 709.00 olarak belirlenmiştir. 1 nolu örneğin HL değeri için standart sapma değeri (183.77) oldukça yüksek olarak belirlenmiştir. V1 örneğinin kuru yoğunluğu, porozitesi ve P-dalga hızı ortalama değerleri sırasıyla 2.24 gr/cm³, % 10.56 ve 3.15 km/s'dir. V2 nolu örneğin kuru yoğunluğu 2.33

gr/cm³, porozitesi %8.76 ve P-dalga hızı 3,18 km/s'dir. V1 ve V2 nolu örneğin HL değerleri ise sırasıyla 620.67 ve 711.45'dir. Volkanik kayaların HL değerlerinin yüksek olmasına rağmen standart sapma değeri (V1:24.79; V2:22.94) oldukça küçüktür.

Tablo 2. Kayaların fiziksel özellikleri ve HL değerleri

Kayaç	Örnek Sayısı	İstatiksel Tanımlama	ρ_d g/cm ³	n %	Vp km/s	HL
1*	5	Ortalama	1.61	19.52	1.48	509.67
		Minimum	1.61	24.68	1.43	201.00
		Maksimum	1.77	28.78	1.54	709.00
		Standart sapma	0.09	4.71	0.06	183.77
		Ortalama	2.24	10.56	3.15	620.67
VK1	5	Minimum	2.23	10.54	3.14	586.00
		Maksimum	2.26	10.57	3.16	666.00
		Standart sapma	0.01	0.02	0.01	24.79
		Ortalama	2.33	8.76	3.18	711.45
		Minimum	2.32	8.72	3.17	675.00
VK2	5	Maksimum	2.33	8.80	3.19	740.00
		Standart sapma	0.01	0.04	0.01	22.94

ρ_d : kuru yoğunluk, n: porozite, Vp: P-dalga hızı, HL: Leeb sertliği
* 1 nolu kayaya HL testi yapılırken bileşenlere dikkat edilmeden her bir örnekte rasgele 20 ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalamasıdır.

Piroklastik kayacın HL değerlerindeki farklılığın ana sebebi, kayacı oluşturan bileşenlerden VC ve VKP'larıyla ilişkilidir. Bu ilişkinin daha iyi anlaşılması için örneklerin her bir yüzeyinde kayacı oluşturan bileşenlerin HL değerleri ayrı ayrı belirlenmiştir (Tablo 3). Kayacın bileşenlerinde VC'nin HL değeri 119 ile 387 arasında değişmekte olup ortalama değer 274.95 olarak belirlenmiştir. VKP1 için HL değeri 351 ile 663 arasındayken VKP2 için 334 ile 709 arasında tespit edilmiştir. VKP'ların HL değeri, volkanik kayalardan (VK1 ve VK2) elde edilen HL değerlerinin minimum, maksimum aralığından daha geniş bir aralıkta ve standart sapma değerlerinin daha yüksek olması boyut faktörü ile açıklanabilir. Daha önce birçok araştırmacının belirttiği üzere HL testi örneklem boyutundan doğrudan etkilenmektedir [1, 21, 22]. Bu durum örneklerin içinde yer alan VKP farklı boyutlarda olması ile ilişkilidir. Örnek içinde daha büyük VKP'larında daha yüksek HL değerleri belirlenirken daha küçük VKP'da daha küçük değerler ölçülmüştür. Bu değişimler 1 nolu kayacın HL değerindeki değişimle doğrudan ilişkilidir. Bu durumun daha iyi anlaşılması için Image Pro Plus 6.0 görüntü işleme programı aracılığıyla örnek yüzeylerinde kayaç bileşenlerinin değişimleri belirlenerek Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde küp örneklerin yüzeyinde volkanik kayaç parçalarının (VK1 ve VK2) yüzde dağılımı yaklaşık olarak %2 ile %71 arasında değişmektedir. Örnek yüzeyindeki volkanik kayaç yüzdeleri (VKPY) ile HL değerleri arasındaki ilişki Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde HL ile VKPY arasında artan doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. HL ile VKPY arasındaki belirleme katsayı (R^2) ise 0.906'dır. HL değeri ölçüm yüzeyinde

VKPY artışıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. HL ile VKPY arasındaki ilişkinin geçerliği varyans analizi ile denetlenmiş ve %5 önem düzeyi ($p < 0.05$) için kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir (Tablo 5).

Tablo 3. Piroklastik kayacın farklı bileşenlerinde (VC ve VKP) ölçülen HL değerlerinin istatistiksel özellikleri

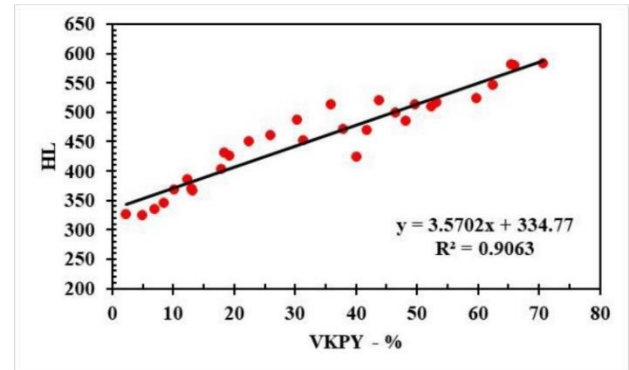
Kayaç Bileşenleri	İstatiksel Tanımlama			
	Ortalama	Minimum	Maksimum	Standart sapma
VC	274.95	119.00	387.00	76.83
VKP1	511.09	351.00	663.00	66.16
VKP2	555.81	334.00	709.00	76.83

Tablo 4. Küp örnek yüzeylerinde kayaç parçalarının yüzdesel değerlerinin istatistiksel özellikleri

Kayaç Parçaları	İstatiksel tanımlama			
	Ortalama	Minimum	Maksimum	Standart sapma
VKP1	16.32	0.00	49.49	18.82
VKP2	17.40	2.23	38.83	9.22
Σ VKP	33.72	2.23	70.69	23.18

Tablo 5. HL ile VKPY arasındaki ilişkinin varyans analizi

R^2	t test	F test	$p < 0.05$
0.9063	16.458	270.880	0.000



Şekil 5. VKPY ile HL arasındaki istatistiksel ilişki

HL değerinin kayacı oluşturan bileşenlerden etkilendiği daha önce birçok araştırmacının [1, 19, 20] sadece belirttiği ve araştırılmasını önerdiği durum olup yapılan çalışmayla bu deneysel olarak ispatlanmıştır. HL deneyinin farklı boyutlarda ve sertliklerde bileşenlerden oluşan kayalar için kullanılması önerilmez.

4 Sonuçlar

Konya bölgesinden alınan anglomera kayaç örneğini oluşturan bileşenlerin HL değerine etkisinin belirlenmesi amacı ile yapılan bu araştırmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Piroklastik kayacı oluşturan bileşenler (VC ve VKP) HL değerini doğrudan etkilemektedir.
- Örnekler içindeki bileşenlerin (VKP) boyutları HL değerini etkileyen diğer bir faktördür.
- Örneklem yüzeyinde VKPY ile HL arasında doğrusal bir ilişki olup R^2 değeri ise 0,906 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular HL deneyinin farklı bileşenlerden oluşan kayalar için uygun olmadığını ortaya koymuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] İ. İnce and A. Bozdağ, An investigation on sample size in Leeb hardness test and prediction of some index properties of magmatic rocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06478-9>.
- [2] S. Kawasaki, C. Tanimoto, K. Koizumi and M. Ishikawa, An attempt to estimate mechanical properties of rocks using the Equotip hardness tester. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 43(4), 244–248, 2002. <https://doi.org/10.5110/jjseg.43.244>.
- [3] S. Wakasa, H. Matsuzaki, Y. Tanaka and Y. Matsukura, Estimation of episodic exfoliation rates of rock sheets on a granite dome in Korea from cosmogenic nuclide analysis. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 31(10), 1246–1256, 2006. <https://doi.org/10.1002/esp.1328>.
- [4] L. Mol and H. A. Viles, The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone. *Earth Surf Processes Landforms*, 37(3), 301–314, 2012. <https://doi.org/10.1002/esp.2252>.
- [5] K. Wilhelm, H. Viles, O. Burke and J. Mayaud, Surface hardness as a proxy for weathering behaviour of limestone heritage: a case study on dated headstones on the Isle of Portland, UK. *Environmental Earth Sciences*, 75, 931, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5661-y>.
- [6] Y. Wang, Q. Pei, S. Yang, Q. Guo and H. Viles. Evaluating the condition of sandstone rock-hewn cave-temple façade using in situ non-invasive techniques. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 2915–2920, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02063-w>.
- [7] K. Gireson, S. B. Çelik and İ. Çobanoğlu, Non-destructive estimation of uniaxial compressive strength of deteriorated carbonate building stones by frost action. *Environmental Earth Sciences*, 82(14), 363, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11032-9>.
- [8] W. Verwaal and A. Mulder, Estimating rock strength with the Equotip hardness tester. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 30(6), 659-662, 1993.
- [9] M. Alvarez Grima and R. Babuška, Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(3), 339–349, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00007-8).
- [10] F. Meulenkamp and M. A. Grima, Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(1), 29–39, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00173-9).
- [11] H. Aoki and Y. Matsukura, Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from equotip hardness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 23–29, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0116-z>.
- [12] Y. Asiri, A. Corkum and H. El Naggar, Leeb hardness test for UCS estimation of sandstone. 69th Geo Vancouver Conference, Vancouver, Canada, October 2016.
- [13] A.G. Corkum, Y. Asiri, H. El Naggar and D. Kinakin, The Leeb hardness test for rock: an updated methodology and UCS correlation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 665-675, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1372-2>.
- [14] S. B. Çelik and İ. Çobanoğlu, Comparative investigation of Shore, Schmidt, and Leeb hardness tests in the characterization of rock materials. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-16, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8567-7>.
- [15] N. Yılmaz Güneş and R. M. Goktan, Comparison and combination of two NDT methods with implications for compressive strength evaluation of selected masonry and building stones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78: 4493–4503, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1382-7>.
- [16] G. Ekincioglu, D. Akbay ve M. Sert, Doğaltaşların geri tepme sertlikleri ile bazı kayaç özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi. KAYAMEK'2022- 13. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, sayfa 59-66, Isparta, Türkiye, 26-28 Mayıs 2022.
- [17] S. Ghorbani, S. H. Hoseinie, E. Ghasemi and T. Sherizadeh, A review on rock hardness testing methods and their applications in rock engineering. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(11), 1067, 2022-a. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10314-z>.
- [18] Y. Asiri, Standardized Process for Filed Estimation of Unconfined Compressive Strength Using Leeb Hardness. Master Thesis, Dalhousie University, Canada, 2017.
- [19] S. B. Çelik, İ. Çobanoğlu, T. Koralay and K. Gireson, Investigation of the Leeb hardness test in rapid characterisation of rock cores with particular emphasis on the effect of length to diameter ratio. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 37(7), 2023. <https://doi.org/10.1080/17480930.2023.2213549>.
- [20] S. Ghorbani, S. H. Hoseinie, E. Ghasemi and T. Sherizadeh, Application of Leeb hardness test in prediction of dynamic elastic constants of sedimentary and igneous rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(6), 3125-3145, 2022-b. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02083-z>.
- [21] S. Ghorbani, S. H. Hoseinie, E. Ghasemi and T. Sherizadeh, Adoption of ASTM A956-06 Leeb hardness testing standard to rock engineering applications. *Construction and Building Materials*, 364,

- 129886, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129886>.
- [22] S. B. Çelik and İ. Çobanoğlu, Investigation of the effect of saturated conditions and number of measurements on the Leeb hardness test and improved correlations to estimate basic rock properties. *Acta Geotechnica*, 18(8), 4261–4278, 2023.
<https://doi.org/10.1007/s11440-023-01823-6>.
- [23] Y. Eren, Konya kuzeybatısında Bozdağlar masifinin otokton ve örtü birimlerinin stratigrafisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 36(2), 7-23, 1993.
- [24] A.M. Özkan, Ulumuhsine-Tatköy (Konya) Civarındaki Üst Miyosen-Alt Pliyosen yaşlı kumtaşlarının petrofasiyes özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 229–239, 2000.
- [25] R. Aksoy and A. Demiroz, The Konya earthquakes of 10–11 september 2009 and soil conditions in Konya, central Anatolia, Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(2), 295–303, 2012.
<https://doi.org/10.5194/nhess-12-295-2012>.
- [26] R. Aksoy, Extensional neotectonic regime in west-southwest Konya, central Anatolia, Turkey. *International Geology Review*, 61(14), 1803–1821, 2019.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1581996>.
- [27] A. Streickeisen, Classification and nomenclature of volcanic rock. Iomprophyres, corbanatites and millitic rocks. *Geology*, 7, 331–335, 1979.
- [28] TS EN 1936, Natural Stone Test Methods - Determination of Real Density and Apparent Density and of Total and Open Porosity. Turkish Standards Institution, Ankara, 2010.
- [29] ASTM E494, Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
<https://doi.org/10.1520/E0494-95>.
- [30] ASTM A956, Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
https://doi.org/10.1520/A0956_A0956M-22.
- [31] TS EN-12407, Natural Stone Test Methods - Petrographic Examination. Turkish Standards Institution, Ankara, 2019.

