

Agregaların Ses Hızının Ultrasonik Titreşim İletim Tekniği ile Belirlenmesi**Asif Zeb¹, Hakan Elçi^{2*}, Aykut Akgün³, Necdet Türk⁴**¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 35390 Buca, İzmir²Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, 35860 Torbalı, İzmir³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon⁴Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35390 Buca, İzmir

* hakan.elci@deu.edu.tr

Özet: Bu çalışmada ultrasonik titreşim iletim yöntemiyle (220 kHz), 5 farklı kayaç ve bu kayaçlardan 4 farklı çapta hazırlanan agregalardan elde edilen sıkışma dalga hızları V_p birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Hazırlanan agregaların, sağlam kaya örneklerinin V_p değerlerini ölçmek için önerilen direkt ölçüm tekniği uygulandığında ultrasonik dalga hızının geçiş zamanı ölçülemezdir. Ancak, agrega taneleri bir plastik tüp içerisinde, tek eksenli sabit yük altında (75 kgf) sıkıştırıldıklarında dalga geçiş zamanı ölçülebilmektedir. Sağlam kaya örneklerinde ölçülen V_p değerleri 2000 – 5000 m/s arasında değişirken, aynı kayalardan elde edilen agrega yığınlarının V_p değerleri 700 – 1450 m/s aralığında değiştiği belirlenmiştir. Sağlam kaya örneklerinin V_p ile onların fiziksel özellikleri arasındaki yüksek korelasyon elde edilirken, aynı kayalardan elde edilen agregaların V_p ile fiziksel özellikleri arasında düşük korelasyon ilişkisi elde edilmiştir. Genel olarak, seçilen tüm kaya türleri için, agrega dane çapı ve yığın yoğunluğu arttıkça V_p de artmaktadır. Agregada yığının V_p değerlerini agrega litolojisi ile birlikte hem agregaların porozitesi hem de yığını oluşturan agrega taneleri arasında boşluk miktarı kontrol etmektedir. Sağlam kayaların, V_p değerlerinin onların agrega yığına olan V_p değerlerine oranları porozitesi %1-3 arasında olan kayaçlarda %75, porozitesi %10 olan kayaçlarda %65 ve porozitesi %25 olan kayaçlarda ise % 50'den daha az olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultrasonik test, sıkışma dalga hızı (V_p), agregaların gevşek yığın yoğunluğu, agregaların boşluk yüzdesi

Determining Sound Velocity of Aggregates by Ultrasonic Pulse Transmission Technique

Abstract: In this study, the ultrasonic pulse transmission method (220 kHz) was used to measure the compressional wave velocities (V_p) of selected 5 rock types and aggregates prepared 4 of different sizes from them. Addition to measurements of ultrasonic selected rock type, the ultrasonic velocities of the aggregates prepared from them compared. When the direct measurement technique applied to aggregates, the sound velocity could not record the transit time. However, when the aggregate grains were compacted in a tube under uniaxial loading 75 kgf, the transit time was measured easily. V_p values measured in solid rock samples ranged from 2000 to 5000 m/s while V_p values of aggregates from the same rocks ranged from 700 to 1450 m/s. While the relations between V_p and physical properties of solid rock samples showed high correlations, the relations between V_p and physical characteristics of aggregates have given lower correlation for same rocks. In general, for all selected rocks the bulk density as well as the V_p velocity values increased with the increase in aggregate size. The speed of ultrasonic transition in the aggregate was controlled by both porosity and voids in aggregates particles. The ratio in V_p velocity values of intact rock to its aggregate mass decreased by 75% in rocks having porosity 1-3% decreased by 65% in rocks having porosity 10 % and this ratio found to be %50 in rocks having 25% porosity.

Keywords: Ultrasonic testing, compressional wave velocity (V_p), loose bulk density and voids

Giriş

Ultrasonik test beton, kaya ve son yıllarda da seramik gibi malzemelerin performansını ve güvenilirliğini belirlemek için en yaygın kullanılan tahribatsız deney yöntemlerinden biridir (Lama ve Vutukuri 1978, Tarun ark.

2004, Eren ve Kuruma 2012, Özkan ve Yayla 2016). Yöntem, ayarlanabilen titreşim uzunluğu ve ultrasonik titreşim frekanslarının küçük genlikli dalga tekrarlarının üretilmesi, aktarılması ve alınması üzerine kuruludur. Test edilen malzemenin (kaya, beton, seramik)

mineralojisi, boşlukların-tanelerin şekli ve boyutları ve de bunların dağılımı gibi mikro yapısal özellikleri ses hızı ilerlemesini belirler. Malzemenin bu özellikleri frekans spektrumunu benzersiz şekilde değiştirir ve farklı yayılım türlerinin sıkışma-(Vp) ve makaslama-(Vs) hızlarını tanımlar. Bu nedenle, dalga hızları ve genlik-frekans spektrumları, malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleriyle ve bu da mikro yapısal özellikleri ile kuvvetli bir şekilde ilişkilidir (Tarun ark. 2004, ASTM 2008, ISRM 2014).

Kaya malzemesinin dalga hızı belirlemek için gerekli numune ölçüleri, ölçüm yöntemleri gibi prosedürler ASTM (2008) ve ISRM (2014) de tanımlanmıştır. Bu yöntemler kullanılarak kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerini dolaylı yoldan belirlemek amacıyla literatürde pek çok deneysel çalışma yapılmıştır. Kahraman (2001); Sharma ve Singh (2008) kayacın P dalga hızından tek eksenli basınç dayanımını tahmin etmek için basit ilişkiler önermiştir. Khandelwal (2013), Vp -dalgası hızı ile farklı kayaların fiziko-mekanik özellikleri arasında ampirik ilişkiler elde etmiştir. Pappalardo (2015), kaya örnekleri için P-dalga hızı ile tek eksenli basma mukavemeti ve fiziksel özellikleri arasında ilişkilerin doğrusal olduğunu belirtmiştir. Karakul ve Ulusay (2013) farklı derecelerde suya doymuş kayaların Vp dalga hızı ile basınç dayanımlarını tahmin etmenin mümkün olduğunu, doymuşluk derecesine bağlı olarak kayaların dayanım ve deforme olabilme özelliklerinin azaldığını ifade etmişlerdir. Özkaraman ve ark. (2004), Pimienta ve ark. (2014) ve Boulanouar ve ark. (2013) Vp- dalga hızı ölçümlerinden kayacın termal iletkenlik katsayısının tahmin edilebileceğini belirtmiştir. Mahmutoğlu (2017) iri kristalli mermerlerin zamana bağlı olarak ısı etkisiyle bozunma derecelerini

onların kuru ve suya doymuş Vp hızlarından kestirilebileceğini belirtmiştir.

Ayrıca literatürde kaya malzemesine kıyasla daha az oranda daneli malzemelerin Vp ölçümlerinin yapıldığı çalışmalar mevcuttur. Duffy ve Mindlin (1957) kübik bir kafes içine doldurulmuş küçük bilyelerden oluşan yığının Vp ölçümlerinde, uygulanan basınçla Vp'nin değiştiğini ifade etmişlerdir. Aynı yöntemi Hardin ve Richart (1963) Ottawa kumlarına uygulamışlardır. Basıncın yanı sıra, suya doymuşluk derecesinin ve boşluk fraksiyonunun dalga hızı üzerindeki etkili olduğunu belirtmişlerdir. Goddard (1990) daneli malzemelerin basınçla artan Vp hızlarını, danelerin pürüzlülüğü ile ilişkilendirmiştir. Boner ark. (2002) 100-500 kHz frekans aralığında ultrasonik titreşim iletim yöntemini kullanarak saf kum, kil-kum ve turba-kumdan oluşan 3 karışım üzerinde, Vp ve Vs hızlarını gerilmemiş ve küçük tek eksenli gerilmeler (max 0,1 MPa) altında ölçmüşlerdir. Çalışmalarında Vp ve Vs hızlarının zeminlerin türü, zeminlerin dane boyutu ve uygulanan yük ile değiştiğini ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada 5 farklı kayaktan elde edilmiş 4 farklı çaptaki agregaların Vp-dalga hızları ölçülmüş ve Vp-dalga hızı ile agregaların fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Ayrıca seçili kayaç örneklerinin Vp değerleri ile bu kayaçlardan hazırlanan agregalardan elde edilen Vp değerleri karşılaştırılmıştır.

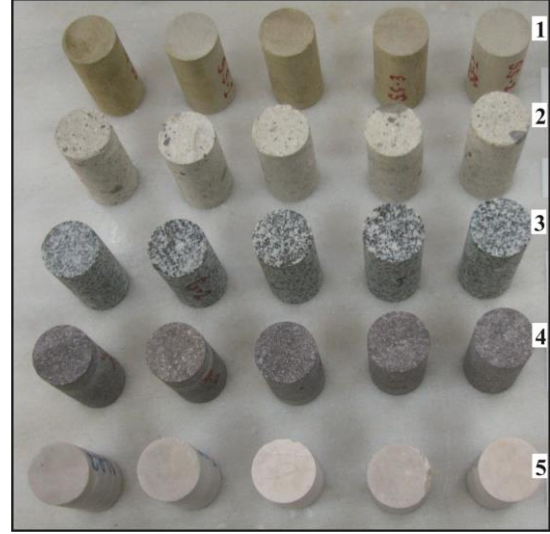
Materyal ve Metot

Numune Hazırlama

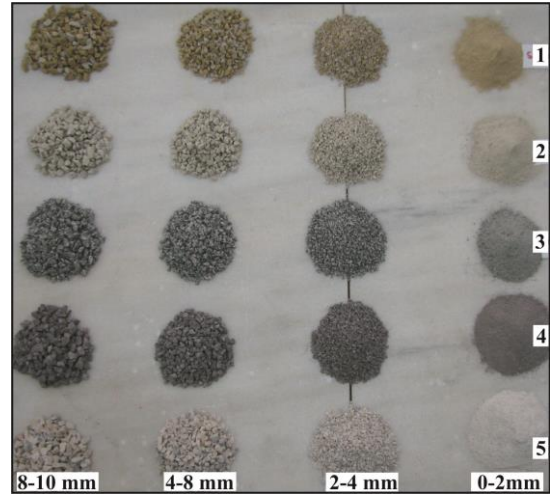
Çalışma için farklı litolojilere sahip beş kayaç (kumtaşı, tüf, granit, andezit ve dolomitik kireçtaşı) seçilmiştir. Kayaçlar, İzmir ili Torbalı ilçesinde bulunan doğal taş işleme

tesislerinden temin edilmiştir. Kayaç bloklarından karot makinesi yardımıyla çapları 50 mm olan karotlar alınmıştır. Karotlar, boy/çap oranı 2 olacak şekilde bir taş kesme testeresi ile kesilmiş ve her kayaçtan 5 adet karot örneği hazırlanmıştır. Kesme işleminden kaynaklanan kaba ve pürüzlü yüzeyler aşındırıcı disk yardımıyla düzeltilerek yüzeylerin birbirine paralelliği sağlanmıştır (Şekil 1).

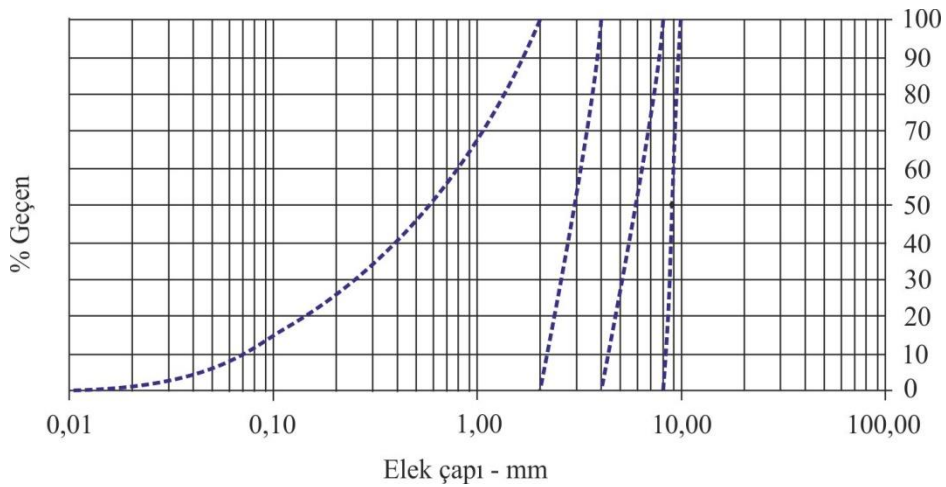
Hazırlanan karot örneklerine ek olarak blok örneklerden arta kalan parçalar önce çekiçle kırılarak 10 cm'den daha küçük parçalara ufaltılmıştır. Daha sonra bu parçalar laboratuvar tipi çeneli kırıcı ile kırılarak agrega haline getirilmiştir. Agregalar elenerek 0-2, 2-4, 4-8 ve 8-10 mm dane çapı aralıklarında her bir kayaç için 5 kg olacak şekilde boyutlandırılmıştır (Şekil 2 ve 3).



Şekil 1. Test edilen karot örnekleri.



Şekil 2. Test edilen agrega örnekleri.



Şekil 3. Hazırlanan agregaların dane çapı dağılımı

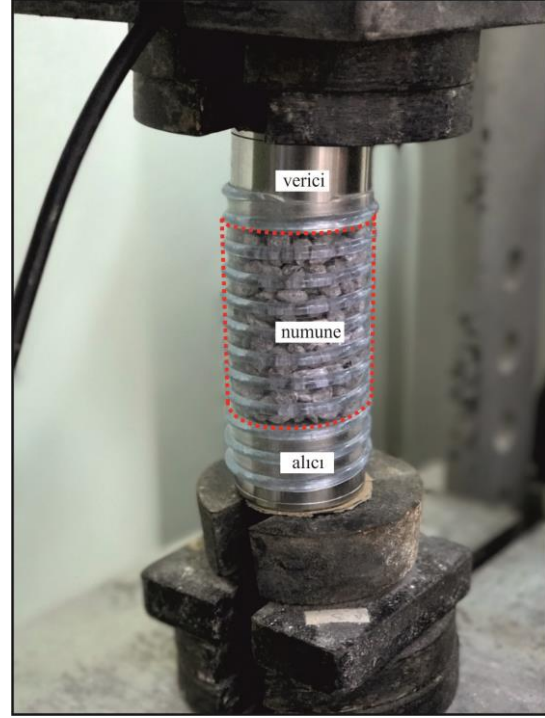
Deney Metodu

Karotların ve Agregaların Vp Ölçümleri

Vp ölçümleri Proceq marka, Pundit⁺ ölçüm aleti kullanılarak ISRM 2014'de önerilen direkt ölçüm yöntemi ile öncelikle hazırlanan karot örnekleri üzerinde yapılmıştır (Şekil 4) ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Agregaların Vp ölçümleri için, 52 mm çapında ve 130 mm uzunluğundaki silindirik plastik bir tüp kullanılmıştır. Agregalar silindirik tüp içine doldurulmuş ve ultrasonik test aletinin alıcı ve verici uçları plastik tüp içerisine yerleştirilerek agregalar ile temas etmesi sağlanmıştır. Ultrasonik test aleti çalıştırıldığında ses hızı geçiş zamanı ölçülememiştir. Bu nedenle agregalardan ses hızı geçiş zamanı, düşük yük kapasiteli (300 kgf) bir pres ile düşey yönde 75 kgf yük altında sıkıştırılarak ölçülmüştür (Şekil 5). Tüm geçiş zamanı ölçümleri 220 kHz ultrasonik titreşim frekansında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir.



Şekil 4. Kaya malzemesinin ultrasonik test ölçümü



Şekil 5. Agregaların ses hızı ölçümü için hazırlanmış deney düzeneği

Karot Örneklerinin Görünür Yoğunluk, Açık Gözenekliliği

Hazırlanan karot örneklerinin görünür yoğunluğu (kuru ve suya doygun) ve açık gözenekliliği TS EN 1936 (TSE, 2013)'a göre belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Agregaların Gevşek Yığın Yoğunluğu ve Boşluk Yüzdesi

Hazırlanan agregaların gevşek yığın yoğunluğu ve boşluk yüzdesi TS EN 1097-3 (TSE, 1999)'a göre belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir.

Agrega Yığınının Toplam Porozitesi

Agrega yığınının toplam porozitesi, agreganın tane porozitesi ve agreganın tanelerinin arasındaki boşluk yüzdesi toplamı olarak ifade edilmiştir.

Petrografik ve Kimyasal Özellikler


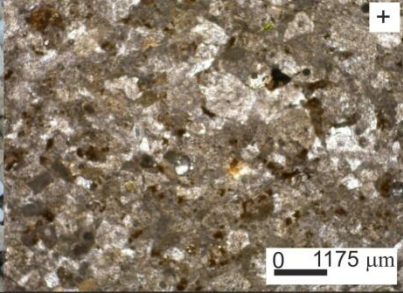

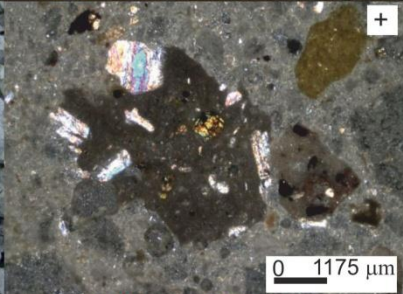

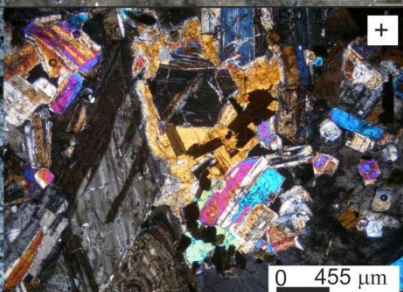

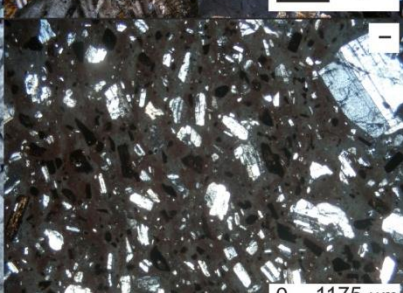

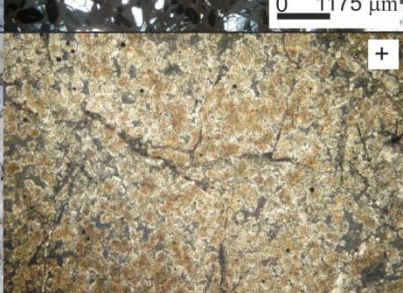
Çalışmada kullanılan kayalardan ince kesit hazırlanarak bu kesitler polarize ve polarize olmayan "Olympus

BX41 ve BX50" tipi araştırma mikroskobunda incelenmiştir. Her kaya örneğinin modal analizi yapılarak, kayaç oluşturan mineraller yüzde olarak Şekil 6'da verilmiştir. Ayrıca her kaya örneklerine kimyasal analiz yapılarak kayacın oluşturan ana oksit element yüzdeleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Test edilen kayaçların agrega ve enine kesit polarize mikroskoptaki görüntüleri Şekil 6'da sunulmuştur. Çalışmada kullanılan bir numaralı kayaç örneği % 60 feldispat, % 30 kuvars ve % 10 kaya kırıntısından oluşan iyi boylanmış litik (arkoz) kumtaşlarıdır. İki numaralı kayaç örneği kırıntılı bir dokuya sahip tüftür. Kayaç birkaç mm'den birkaç cm'e değişen boyutlarda riyolitik lav-cam kırıntıları, bazaltik lav ve pomza kırıntıları, % 3-5 feldispat-kuvars, % 1-5 oranında amfibol-proksen ve % 15-20 oranında ince kül-camdan oluşur. Kaya kırıntılarında belirgin oksidasyon gözlenir. Üç numaralı kayaç örneği % 34-53 plajioklas, %24-35

faldispat, % 21-29 kuvars, % 5-10 biotit , % 3-8 amfibol mineralleri içeren holokristalin doku gösteren tipik bir granittir. Dört numaralı kayaç örneği kahverengimsi kırmızı renkli, ince orta taneli, öz şekilli minerallere sahip ve belirgin bir lav akma dokusu gösteren Andezittir. Kayaç K-feldispat, kuvars ve plajioklas ve çeşitli boyutlarda küçük biyotit taneleri içeren hipokristalin dokuya sahiptir. Beş numaralı örnek dolomit ve kalsit minerallerinden oluşan dolomitik kireçtaşıdır Dolomitik kireçtaşları genellikle öz şekilli veya yarı öz şekilli iri dolomit kristalleri ve mikro spar boyutlarında (4-20 mikron) kristallerden oluşan, dolospar ve/veya mikrodolosparlarla ve spar kalsit ile temsil edilir. İri dolomit kristalleri genellikle zonlu yapı sunarlar. Diyajenetik fasiyes içinde basınç çözünmesi olayına bağlı olarak, ileri ve orta derecede stilo-breş veya stilonodüler yapılar gelişmiştir ve kayaç yersel olarak pembemsi renk kazanmıştır (Şekil 6).

 <p>1</p> <p>1 cm</p>	 <p>+</p> <p>0 1175 µm</p>	<p><u>Kumtaşı</u></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Mineral</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Feldispat</td> <td>58 - 63</td> </tr> <tr> <td>Kuars</td> <td>27 - 35</td> </tr> <tr> <td>Litik kırıntılar</td> <td>8 - 12</td> </tr> </tbody> </table>	Mineral	%	Feldispat	58 - 63	Kuars	27 - 35	Litik kırıntılar	8 - 12						
Mineral	%															
Feldispat	58 - 63															
Kuars	27 - 35															
Litik kırıntılar	8 - 12															
 <p>2</p> <p>1 cm</p>	 <p>+</p> <p>0 1175 µm</p>	<p><u>Tüf</u></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Mineral</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Matriks (ince kül - cam)</td> <td>15 - 20</td> </tr> <tr> <td>Riyolitik lav - cam kırıntıları</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Bazaltik lav</td> <td>5 - 10</td> </tr> <tr> <td>Pomza kırıntıları</td> <td>60 - 70</td> </tr> <tr> <td>Kuars - Feldispat</td> <td>3 - 5</td> </tr> <tr> <td>Amfibol - Proksen</td> <td>1 - 5</td> </tr> </tbody> </table>	Mineral	%	Matriks (ince kül - cam)	15 - 20	Riyolitik lav - cam kırıntıları	10	Bazaltik lav	5 - 10	Pomza kırıntıları	60 - 70	Kuars - Feldispat	3 - 5	Amfibol - Proksen	1 - 5
Mineral	%															
Matriks (ince kül - cam)	15 - 20															
Riyolitik lav - cam kırıntıları	10															
Bazaltik lav	5 - 10															
Pomza kırıntıları	60 - 70															
Kuars - Feldispat	3 - 5															
Amfibol - Proksen	1 - 5															
 <p>3</p> <p>1 cm</p>	 <p>+</p> <p>0 455 µm</p>	<p><u>Granit</u></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Mineral</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plajiolklas</td> <td>34 - 53</td> </tr> <tr> <td>Feldispat</td> <td>24 - 35</td> </tr> <tr> <td>Kuars</td> <td>21 - 29</td> </tr> <tr> <td>Biyotit</td> <td>5 - 10</td> </tr> <tr> <td>Amfibol</td> <td>3 - 8</td> </tr> </tbody> </table>	Mineral	%	Plajiolklas	34 - 53	Feldispat	24 - 35	Kuars	21 - 29	Biyotit	5 - 10	Amfibol	3 - 8		
Mineral	%															
Plajiolklas	34 - 53															
Feldispat	24 - 35															
Kuars	21 - 29															
Biyotit	5 - 10															
Amfibol	3 - 8															
 <p>4</p> <p>1 cm</p>	 <p>-</p> <p>0 1175 µm</p>	<p><u>Andezit</u></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Mineral</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K- Feldispat</td> <td>20 - 23</td> </tr> <tr> <td>Kuars</td> <td>2 - 3</td> </tr> <tr> <td>Plajiolklas</td> <td>40 - 47</td> </tr> <tr> <td>Biyotit</td> <td>5 - 7</td> </tr> <tr> <td>Matriks</td> <td>20 - 23</td> </tr> </tbody> </table>	Mineral	%	K- Feldispat	20 - 23	Kuars	2 - 3	Plajiolklas	40 - 47	Biyotit	5 - 7	Matriks	20 - 23		
Mineral	%															
K- Feldispat	20 - 23															
Kuars	2 - 3															
Plajiolklas	40 - 47															
Biyotit	5 - 7															
Matriks	20 - 23															
 <p>5</p> <p>1 cm</p>	 <p>+</p> <p>0 1175 µm</p>	<p><u>Dolomitik kireçtaşı</u></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Mineral</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Kalsit</td> <td>70 - 80</td> </tr> <tr> <td>Dolomit</td> <td>25 - 30</td> </tr> </tbody> </table>	Mineral	%	Kalsit	70 - 80	Dolomit	25 - 30								
Mineral	%															
Kalsit	70 - 80															
Dolomit	25 - 30															

Şekil 6. Test edilen kayaların agrega ve ince kesit, polarize mikroskoptaki görüntüleri.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan kayaların ana oksit yüzdeleri

Örnek	Major element oksit %										Total
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	KK	
Kumtaşı	69.2	11.2	4.87	0.8	5.1	1.5	2.52	0.25	0.33	4.16	100
Tüf	63.9	9.11	0.97	0.90	5.78	2.35	3.94	0.07	0.133	12.15	99.363
Granit	59.75	17.25	5.92	1.98	4.22	3.04	5.95	0,08	0,088	1.40	99.586
Andezit	61.29	16.25	4.08	1.44	5.71	3.79	2.52	0.55	0.123	4.16	99.913
D. kireçtaşı	0.30	0.11	0.03	8.37	45.43	0.008	0.077	0.01<	0.008	45.19	99.533

D: Dolomitik, KK: Kızdırma kaybı

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan kayaların fiziksel özellikleri ve P dalga hızları

Litoloji	Kuru	Suya doymun	ρ_r	Kuru	Suya doymun	n
	ρ_b (Mg/m ³)	ρ_b (Mg/m ³)	(%)	V _p (m/s)	V _p (m/s)	
Kumtaşı	2261 ± 240	2371 ± 23	11,104 ± 0,667	3211 ± 123	3296 ± 113	5
Tüf	1530 ± 83	1742 ± 23	25,444 ± 3.804	2045 ± 149	1455 ± 242	5
Granit	2680 ± 2	2691 ± 1	1,088 ± 0,098	3936 ± 201	4488 ± 82	5
Andezit	2446 ± 15	2473 ± 13	2.630 ± 0,201	4062 ± 83	4101 ± 58	5
D. kireçtaşı	2769 ± 40	2750 ± 23	0,461 ± 0,307	4997 ± 247	5120 ± 312	5

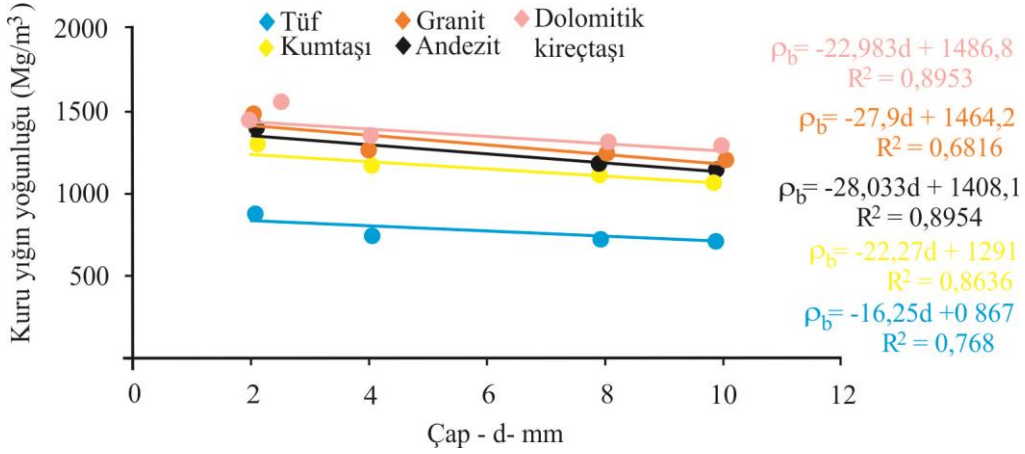
D:Dolomitik, ρ_b : görünür yoğunluk, ρ_r : açık gözeneklilik, V_p: P dalga hızı, n: örnek sayısı

Çizelge 3 Çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri ve P dalga hızları

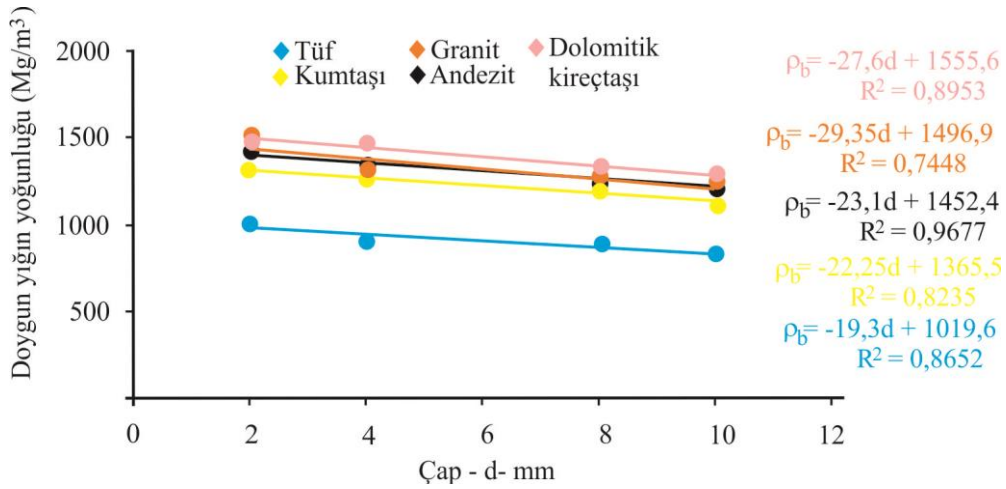
Litoloji	Dane çapı	Kuru	Suya doy.	ρ_r	v	Kuru	Suya doy.	n
		ρ_b (Mg/m ³)	ρ_b (Mg/m ³)	(%)	(%)	V _p (m/s)	V _p (m/s)	
Kumtaşı	0-2	1289 ± 10	1223 ± 7			816 ± 38	993 ± 3	3
	2-4	1058 ± 25	1123 ± 49			1122 ± 98	1124 ± 64	3
	4-8	1149 ± 24	1176 ± 8	9,44 ± 0,34	53,73 ± 0,15	1229 ± 43	1369 ± 50	3
	8-10	1084 ± 13	1173 ± 8	9,23 ± 0,17	52,24 ± 0,19	1547 ± 97	1553 ± 23	3
Tüf	0-2	874 ± 5	981 ± 24			796 ± 27	761 ± 38	3
	2-4	705 ± 8	822 ± 4			1056 ± 18	965 ± 43	3
	4-8	727 ± 9	904 ± 5	24,92 ± 0,57	53,28 ± 0,70	1306 ± 20	1162 ± 65	3
	8-10	706 ± 11	889 ± 9	24,18 ± 0,38	52,96 ± 0,42	1454 ± 75	1247 ± 19	3
Granit	0-2	1471 ± 8	1229 ± 27			656 ± 19	752 ± 21	3
	2-4	1271 ± 13	1119 ± 8			899 ± 11	931 ± 14	3
	4-8	1179 ± 19	1261 ± 9	1,11 ± 0,05	53,93 ± 0,55	1200 ± 36	1286 ± 57	3
	8-10	1236 ± 17	1317 ± 6	1,04 ± 0,05	55,80 ± 0,84	1382 ± 89	1429 ± 83	3
Andezit	0-2	1371 ± 17	1210 ± 18			710 ± 22	819 ± 14	3
	2-4	1121 ± 14	1144 ± 9			978 ± 31	987 ± 19	3
	4-8	1169 ± 25	1226 ± 13	2,66 ± 0,05	54,19 ± 0,36	1129 ± 37	1213 ± 22	3
	8-10	1159 ± 8	1212 ± 7	2,26 ± 0,04	51,27 ± 1,67	1295 ± 79	1302 ± 52	3
D.	0-2	1441 ± 34	1320 ± 14			799 ± 12	1019 ± 9	3
	2-4	1243 ± 14	1243 ± 26			1119 ± 12	1125 ± 58	3
Kireçtaşı	4-8	1302 ± 33	1346 ± 32	0,30 ± 0,07	53,42 ± 0,65	1441 ± 101	1448 ± 81	3
	8-10	1320 ± 18	1343 ± 26	0,28 ± 0,08	55,63 ± 1,80	1507 ± 38	1521 ± 14	3

D:Dolomitik, ρ_b : agrega yığın yoğunluğu, ρ_r : agrega tane gözenekliliği, v : agrega boşluk yüzdesi,V_p: P dalga hızı, n: örnek sayısı

Agregaların dane çapı arttıkça, agrega yığını içerisindeki boşluk yüzdesi artmakta buna bağlı olarak agrega yığın yoğunluğu azalmaktadır (Çizelge 3, Şekil 7 ve 8).



Şekil 7. Agregaların kuru yığın yoğunluğu dane çapı ilişkisi



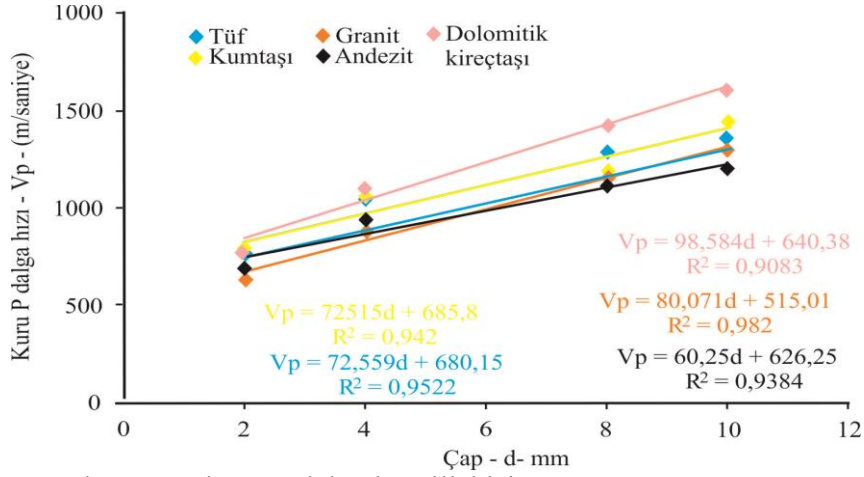
Şekil 8. Agregaların suya doymun yığın yoğunluğu dane çapı ilişkisi

İri agregalar ince agregalara nazaran daha yüksek V_p hızlarına sahiptir. Başka bir deyişle agrega çapı arttıkça V_p hızı da artmıştır (Çizelge 3, Şekil 9 ve 10). Bunun sebebi yığın içerisinde iri agregaların ince agregalara nazaran daha geniş temas yüzeylerine sahip olmalarıdır. Suya doymun haldeki agregalar, kuru haldeki agregalara nazaran daha yüksek V_p değerleri vermiştir.

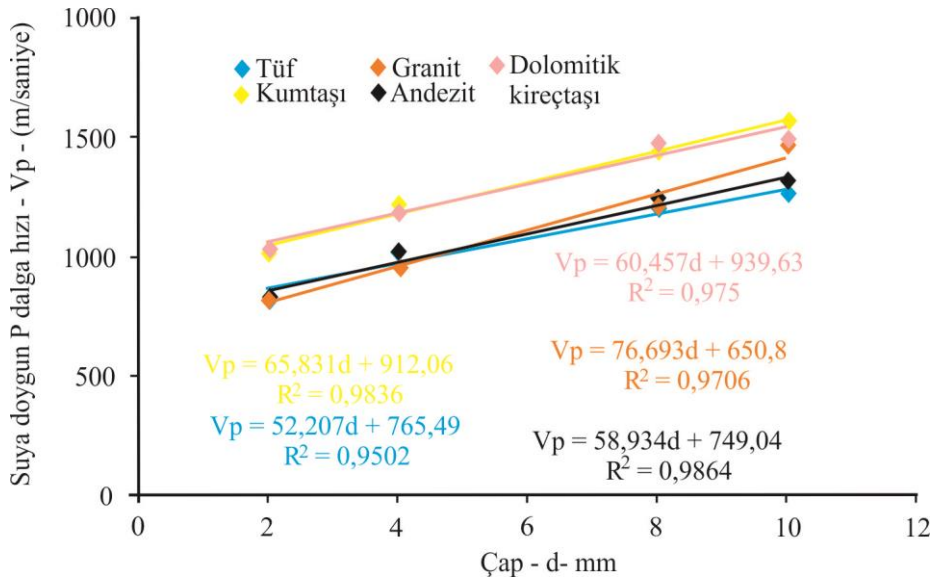
İncelenen kayalar örneklerinin görünür yoğunluğu 1530 Mg/m^3 (tüf) ile 2769 Mg/m^3 (dolomitik kireçtaşı)

arasında değişirken aynı kayalardan elde edilen farklı çaplardaki agregaların yığın yoğunluğu 705 Mg/m^3 (tüf) ile 1441 Mg/m^3 (dolomitik kireçtaşı) arasında değişim gösterir. Karot örneklerinde belirlenen yoğunluğa bağlı olarak artan V_p ilişkisi agregalarda gözlenmemiştir (Çizelge 3, Şekil 11 ve 12).

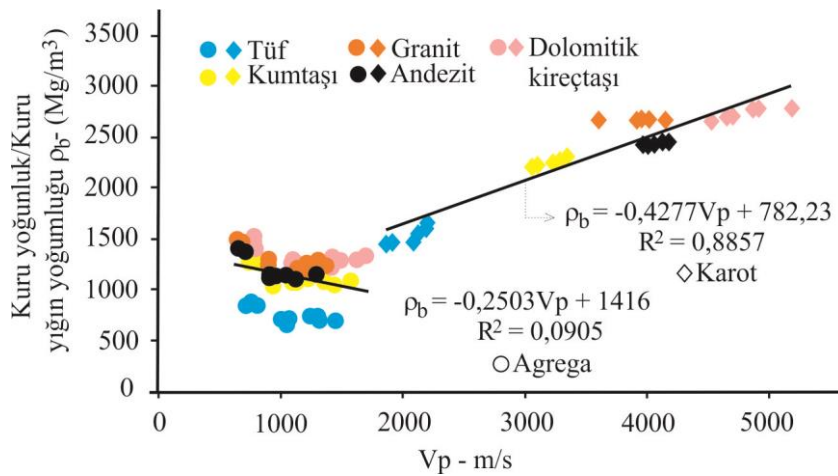
Agrega yığınının toplam porozitesi ile P dalga hızı arasında sağlam kayalar porozitesi ile P dalga hızı arasında olduğu gibi yüksek korelasyonlu bir ilişki vardır. Agregaların porozitesi arttıkça P dalga hızı azalır (Çizelge 3, Şekil 13).



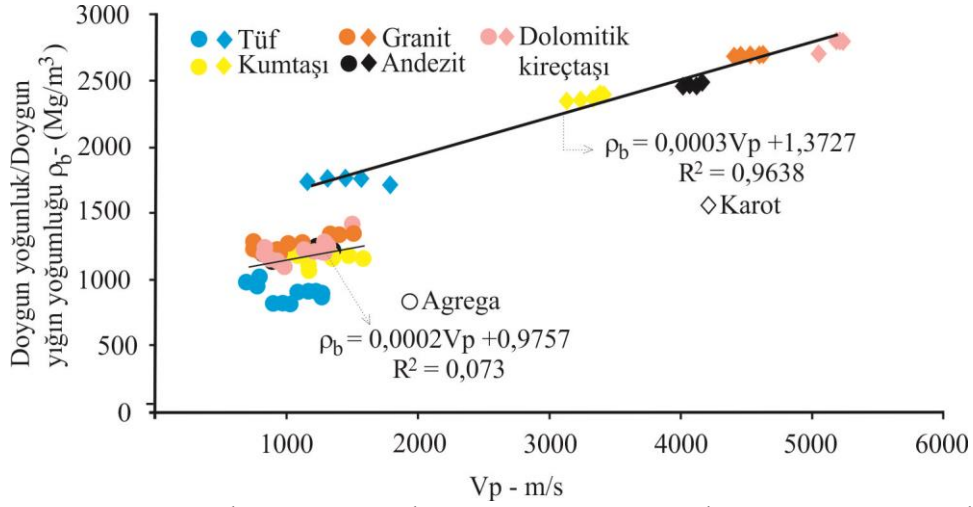
Şekil 9. Agrega dane çapı kuru P dalga hızı ilişkisi



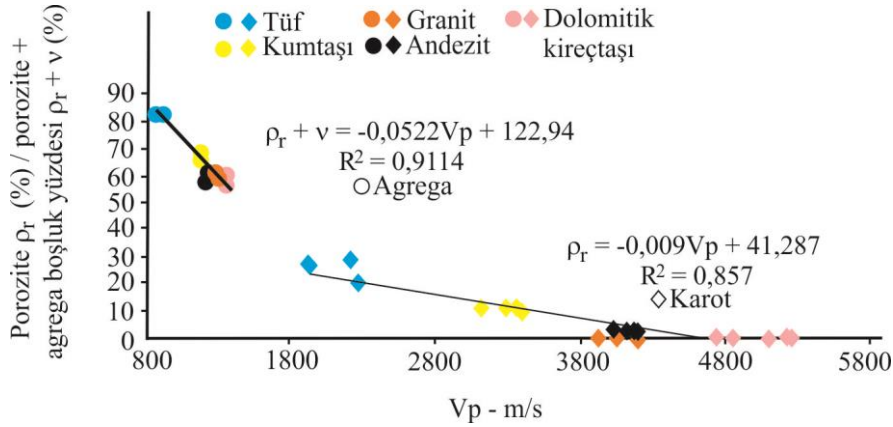
Şekil 10. Agrega dane çapı suya doymuş P dalga hızı ilişkisi



Şekil 11. Kayaç kuru yoğunluğu ve agrega kuru yığın yoğunluğu P dalga hızı ilişkisi



Şekil 12. Kayaç suya doymun yoğunluğu ve agrega suya doymun yığın yoğunluğu P dalga hızı ilişkisi



Şekil 13. Kayaç porozitesi ve agrega yığınının toplam porozitesi P dalga hızı ilişkisi

Sonuçlar

Seçili 5 kayaç ve her kayaçtan 4 farklı çapta hazırlanan agregalar üzerinde yapılan Vp ölçümleri, sağlam kayaçların porozite ve yoğunlukları ile yüksek korelasyon ilişkisi elde edilirken, agregalar için çok daha küçük korelasyon elde edilmiştir. Agregaların Vp hızları düşük yükte (75 kgf) sıkıştırıldıklarında ölçülebilir. Aynı yük altında sıkıştırıldıklarında iri agregalar ince agregalara göre daha yüksek Vp hızı değerleri vermiştir. Aynı kayaçtan üretilen agrega yığın yoğunluğu sağlam

kayacın yoğunluğuna oranla yarı yarıya daha azdır (Çizelge 4). Agregaların yığın yoğunlukları ile Vp hızları arasında bir ilişki belirlenmemiştir. Tüf örneği dışında suya doymun haldeki kayaç örneklerinin Vp değerleri kuru hallerindeki Vp değerlerine oranla % 2-12 daha fazla bulunmuştur. Agregalarda suya doymunluğun Vp'e etkisi ise % 1-20 arasındadır. Tüf de ise hem karot örnekleri hem de agrega örneklerinde suya doymun Vp değerleri kuru haldeki Vp değerlerinden daha düşüktür. Sağlam kayanın onun agregasına olan Vp oranı,

porozitesi % 1-3 arasında olan kayaçlarda % 75, porozitesi % 10 olan kayaçlarda % 63 ve porozitesi % 25 olan kayaçlarda % 50'den daha azdır.

Çizelge 4. Çalışmada kullanılan kayaç ve onların agregalarının fiziksel özellikleri ve Vp hızlarındaki değişim

Litoloji	ρb_1 (Mg/m ³)	ρr (%)	Vp ₁ (m/s)	d (mm)	ρb_2 (Mg/m ³)	Vp ₂ (m/s)	$\Delta\rho b$ (%)	Ort. $\Delta\rho b$ (%)	ΔVp (%)	Ort. ΔVp (%)
Kumtaşı	2261	11,104	3211	0-2	1289 ± 10	816 ± 38	47		75	
	±	±	±	2-4	1058 ± 25	1122 ± 98	53	50	65	63
	240	0,667	123	4-8	1149 ± 24	1229 ± 43	49		62	
				8-10	1084 ± 13	1547 ± 97	52		52	
Tüf	1530	25,444	2045	0-2	874 ± 5	796 ± 27	43		61	
	±	±	±	2-4	705 ± 8	1056 ± 18	54	51	48	44
	83	3,804	149	4-8	727 ± 9	1306 ± 20	52		36	
				8-10	706 ± 11	1454 ± 75	54		29	
Granit	2680	1,088	3936	0-2	1471 ± 8	656 ± 19	45		83	
	±	±	±	2-4	1271 ± 13	899 ± 11	53	52	77	74
	2	0,098	201	4-8	1179 ± 19	1200 ± 36	56		70	
				8-10	1236 ± 17	1382 ± 89	54		65	
Andezit	2446	2,630	4062	0-2	1371 ± 17	710 ± 22	44		83	
	±	±	±	2-4	1121 ± 14	978 ± 31	54	51	76	75
	15	0,201	83	4-8	1169 ± 25	1129 ± 37	52		72	
				8-10	1159 ± 8	1295 ± 79	53		68	
D. Kireçtaşı	2769	0,461	4997	0-2	1441 ± 34	799 ± 12	48		84	
	±	±	±	2-4	1243 ± 14	1119 ± 12	55	52	78	76
	40	0,307	247	4-8	1302 ± 33	1441 ± 101	53		71	
				8-10	1320 ± 18	1507 ± 38	52		70	

D:Dolomitik, ρb_1 : sağlam kaya yoğunluğu, ρr : sağlam kaya gözenekliliği, Vp₁: sağlam kaya P dalga hızı, d: agrega dane çapı, ρb_2 : agrega yığın yoğunluğu, Vp₂: agrega P dalga hızı, $\Delta\rho b$: sağlam kaya yoğunluğundan agrega yığın yoğunluğuna değişim, ΔVp : sağlam kaya P dalga hızından agrega yığınının P dalga hızına olan değişim.

Teşekkür

Yazarlar araştırmada kullanılan kayaçların teminde gösterdikleri ilgiden dolayı doğal taş işleme tesislerine, Pundit+ cihazının kullanılmasına imkân sağlayan Dr. Ahmet H. Deliormanlı'ya,

makalenin değerlendirme aşamasında düzeltme ve önerileri ile katkılar sağlayan hakemlere ve bu derginin çıkarılmasında emek sarf eden tüm yayın ekibine teşekkür eder.

Kaynaklar

ASTM, 2008. D2845-08 Standart Test Method for Laboratory Determination of Puls Velocities and Ultrasonic Elastik Constants of Rock. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bonner, B. P., Berge, P. A., Aracne-Ruddle, C. M., Bertete-Aguirre, H., Wildenschild, D., Trombino, C.N., et al., 2002. Linear and Nonlinear Ultrasonic Properties of Granular Soils. Materials Research

- Society Meeting San Francisco, CA. UCRL-JC136207, 1–8.
- Boulanouar A., Rahmouni A., Boukalouch M., Samaouali A., Géraud Y., Harnafi M., Sebbani J., 2013. Determination of Thermal Conductivity and Porosity of Building Stone from Ultrasonic Velocity Measurements. *Geomaterials*, 2013, 3, 138-144.
- Duffy, J. and Mindlin, R., 1957. Stress-strain relations and vibrations of a granular medium. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 24, 585–593.
- Eren E., and Kurama S., (2012). Characterization of mechanical properties of porcelain tile using ultrasonic. *G. U. J. Sci.* 25, 761-768
- Goddard, J., 1990. Nonlinear elasticity and pressure-dependent wave speeds in granular media. *Proceedings of the Royal Society of London* 430, 105–131.
- Hardin, B., and Richart, F., 1963. Elastic wave velocities in granular soils. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89, 33–65.
- ISRM, 2014. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. In: R. Ulusay (eds.), *Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group*, Ankara.
- Kahraman S., 2001 Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *Int J Rock Mech Mining Sci* 38:981–994
- Khandelwal M., 2013. Correlating P-wave velocity with the physicommechanical properties of different rocks. *Pure Appl Geophys* 170:507–514
- Karakul H, Ulusay R (2013) Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. *Rock Mech Rock Eng* 46:981–999
- Lama R.D. and Vutukuri V.S., 1978. *Handbook on mechanical properties of rocks*, Vol II. Trans Tech, Herzberg
- Mahmutoğlu, Y., 2017. Prediction of weathering by thermal degradation of a coarse-grained marble using ultrasonic pulse velocity. *Environ Earth Sci* 76:435.
- Özkahraman, H.T., Selver, R. and Işık E. C., 2004. Determination of the thermal conductivity of rock from P-wave velocity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 703–708.
- Özkan, İ., and Yayla Z., 2016. Evaluation of correlation between physical properties and ultrasonic pulse velocity of fired clay samples. *Ultrasonic* 66: 4-10.
- Tarun R., Naik T. R., Malhotra, V.M., Popovics, J. V., 2004. The Ultrasonic Pulse Velocity Method, in: V.M. MALHOTRA and N. J. CARINO, *Etidet 2004, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, Crc Press.
- TSE (Türk Standartları Enstitüsü) 2010, TS EN 1936. Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini. Ankara. Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE 2014, TS EN 13755. Doğal taşlar - Deney yöntemleri – Atmosfer Basıncında Su Emme. Ankara. Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE 2013, TS EN 1097-6. Agregaların Tane Yoğunluğu ve Su Emme

- Oranı Tayini. Ankara. Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE 1999, TS EN 1097-3. Agregaların Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini. Ankara. Türk Standartları Enstitüsü.
- Pimienta L, Sarout J, Esteban L, and Piane C. D., 2014. Prediction of rocks thermal conductivity from elastic wave velocities, mineralogy and microstructure. *Geophys J Int* 197:860–874
- Pappalardo G., 2015. Correlation between P-wave velocity and physical-mechanical properties of intensely jointed dolostones, Peloritani mounts, NE Sicily. *Rock Mech Rock Eng* 48:1711–1721
- Sharma P, Singh T., 2008. A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bull Eng Geol Environ* 67:17–22