Kayaç Özelliklerinin Patlatma Kaynaklı Dalga Yayılımına Olan Etkisinin Araştırılması

Investigation of The Influence of Rock Properties on Blasting-Induced Wave Propagation

Kerim KÜÇÜK [1*], C. Okay AKSOY [1], Abdulrahim BUSOBOZİ [1], Şahin GÜLERYÜZ [1]

[1] Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir
Sorumlu Yazar: kerim.kucuk@deu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, kayaçların fiziksel, mekanik, dinamik ve kimyasal özelliklerinin patlatma kaynaklı dalga yayılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla farklı sondajlardan alınan kayaç numuneleri üzerinde yoğunluk, porozite, ultrasonik P ve S dalga hızları, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), elastisite modülü, suda dağılma dayanımı ve kimyasal analiz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca saha sismik ölçümlerinden elde edilen veriler laboratuvar sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, yoğunluğu yüksek ve porozitesi düşük kayaçların daha yüksek dalga hızları, dayanım ve elastisite modülü değerlerine sahip olduğu; buna karşılık düşük yoğunluk ve yüksek poroziteye sahip kayaçların düşük dalga hızları, dayanım ve elastisite modülü değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Kimyasal bileşimin de kayaçların fiziksel ve mekanik davranışları üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, kayaç özelliklerinin patlatma kaynaklı dalga yayılımını önemli ölçüde kontrol ettiğini ortaya koymuş ve patlatma tasarımlarının optimize edilmesine yönelik önemli bilgiler sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Kayaç özellikleri, patlatma kaynaklı dalga yayılımı, P ve S dalga hızları, porozite, sismik titreşimler, yoğunluk.

Abstract

This study investigates the effects of the physical, mechanical, dynamic, and chemical properties of rocks on the propagation of blasting-induced waves. For this purpose, density, porosity, ultrasonic P and S wave velocities, uniaxial compressive strength (UCS), elasticity modulus, slake durability, and chemical analyses were conducted on rock samples obtained from different boreholes. In addition, field seismic measurements were evaluated and compared with laboratory results. The results showed that rocks with high density and low porosity exhibited higher wave velocities, strength, and modulus of elasticity values; conversely, rocks with low density and high porosity had lower wave velocities, strength, and modulus of elasticity values. It was also determined that chemical composition had a significant impact on the physical and mechanical behavior of the rocks. These findings revealed that rock properties significantly control wave propagation caused by blasting, providing important information for optimizing blasting designs.

Keywords: *Blasting-induced wave propagation, density, P- and S-wave velocities, porosity, rock properties, seismic vibrations.*

1. Giriş

Patlatma kaynaklı dalgaların kaya kütlesi içerisindeki yayılım davranışı, patlatma verimliliği, kayaç parçalanması ve çevresel etkilerin kontrolü açısından madencilik mühendisliğinin önemli araştırma konularından biridir. Dalgaların yayılım karakteristikleri; kayaçların yoğunluk, porozite, dayanım ve kimyasal bileşim gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle kayaç özellikleri ile dalga yayılımı arasındaki ilişkilerin belirlenmesi, patlatma tasarımının optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, farklı sondajlardan elde edilen kayaç numuneleri üzerinde yoğunluk, porozite, ultrasonik P ve S dalga hızları, tek eksenli basınç dayanımı, suda dağılma dayanımı ve kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen laboratuvar verileri saha sismik ölçümleri ile değerlendirilerek kayaç özelliklerinin patlatma kaynaklı dalga yayılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, kayaçların fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri ile dalga yayılım davranışı arasındaki ilişkileri ortaya koymak ve patlatma uygulamalarına yönelik bilimsel bir değerlendirme sunmaktır.

Literatürde kayaç özellikleri ile dalga yayılımı arasındaki ilişkiler genellikle laboratuvar ölçekli verilerle ele alınmakta, bu ilişkilerin saha ölçekli sismik kayıtlarla doğrudan karşılaştırıldığı çalışmalar ise sınırlı kalmaktadır. Bu çalışma, kayaçların fiziksel, mekanik, dinamik ve kimyasal özelliklerini saha sismik verileriyle bütüncül olarak değerlendirerek bu boşluğun giderilmesine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Literatürdeki çalışmalar genel olarak kayaçların yoğunluk, porozite ve mineralojik bileşim gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin, sismik dalga hızları ile patlatma kaynaklı titreşimlerin yayılım ve sönümlenme davranışları üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır. Yaşar ve Erdoğan (2004) ile Kahraman (2002) tarafından yapılan araştırmalar, kayaçların yoğunluğu, tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülü arttıkça, boşluk ve mikro çatlakların azalmasına bağlı olarak ultrasonik P-dalgası hızlarının belirgin şekilde yükseldiğini ortaya koymuştur. Diğer yandan, dalga sönümlenmesi üzerine yoğunlaşan Lu ve Tao (2023), yüksek poroziteli kayaçlarda dalga enerjisinin gözeneklerde emilmesi sebebiyle titreşimlerin çok daha hızlı sönümlendiğini saptarken; Xu, Yu ve Guo (2016) ise yüksek dayanımlı sert kayaçlarda patlayıcı enerjisinin büyük kısmının sismik dalgalara dönüştüğünü ve titreşim hızının hızlıca sönümlendiğini belirlemiştir. Sonuç olarak önceki bilimsel çalışmalar, kayacın kompakt yapısı

ve yoğunluğunun dalga iletimini hızlandırdığını, artan porozitenin ise dalga enerjisini azaltıcı bir rol oynadığını net bir şekilde desteklemektedir. Bu bulgular, kaya mekaniğinin temel kaynaklarında ortaya konulan gözeneklilik-yoğunluk-dayanım etkileşimleri ve kayaç mühendislik sınıflama yaklaşımlarıyla da örtüşmektedir (Goodman, 1989; Jaeger vd., 2007; Bieniawski, 1989).

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada farklı sondajlardan elde edilen karot numuneleri kullanılmıştır. Numuneler üzerinde yoğunluk, porozite, ultrasonik P ve S dalga hızları, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), statik ve dinamik elastisite modülü, dinamik poisson oranı, suda dağılma dayanımı ve kimyasal analiz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk değerleri helyum piknometresi kullanılarak belirlenirken, porozite değerleri suya doygunluk yöntemi ile hesaplanmıştır. Kayaçların dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla P ve S dalga hızları PUNDIT cihazı ile ölçülmüş, elde edilen veriler kullanılarak dinamik elastisite modülü ve dinamik poisson oranı hesaplanmıştır. Yoğunluk ve porozite tayinlerinde izlenen yöntemler, kaya mekaniği alanında kabul gören ISRM (2007) tarafından önerilen deney yöntemleriyle de uyumludur.



Şekil 1. Laboratuvar deneyler yapılışı

Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla ASTM D7012 standardına uygun olarak tek eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlarla statik elastisite modülü değerleri de hesaplanmıştır (ASTM D7012, 2021). Kayaçların ayrışmaya karşı dayanıklılıkları ASTM D4644 standardına göre suda dağılma deneyi ile belirlenmiştir (ASTM D4644, 2016). Ayrıca numunelerin majör oksit içerikleri ICP-OES yöntemi ile analiz edilmiştir.

Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar, saha patlatmalarından kaydedilen sismograf verileri ile değerlendirilerek kayaç özelliklerinin patlatma kaynaklı dalga yayılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Çizelge 1. Deneyler Sonunda Elde Edilen Veriler

Sondaj No	**Litoloji**	**Derinlik (m)**	**Yoğunluk**	**Porozite (%)**	**P Hızı (m/s)**	**S Hızı (m/s)**	**Elastisite Modülü (MPa)**	**TEBD (MPa)**	**Dinamik Poisson Oranı**	**Dinamik Elastisite Modülü**
CT-1	"Volkanik Kayaç; Gri-bejimsi ve beyaz renkte, yüksek dayanımlı, orta ayrışmış, kırık ve çatlaklarında oksitlenme görülmekte, kalsit - kuvars damarları mevcut, altere andezitik kayaç, hematitleşme yer yer görülmekte"	38,00-39,00	2,67	5,90	2850	1620	4200,00	30,00	0,26	29401,74
CT-1		40,00-41,00	2,66	4,23	3020	1760			0,24	24656,71
CT-1		41,00-42,00	2,66	5,01	3000	1750	7238,06	27,72	0,24	30449,69
CT-2	Rezidüel zemin; bej-sarı-kahve renkli, volkanik orjinli,yer yer çakıllı, çok sıkı, sert kıvamda, kuru formda, kum, kil , silt içerikli	14,50-16,00	2,67	6,31	2800	1580	4200,00	30,00	0,27	14586,77
CT-2	Volkanik Kayaç; Gri-bejimsi renkte, orta dayanımlı, orta ayrışmış, kırık ve çatlaklarında oksitlenme görülmekte, kuvars damarları mevcut, kaya kalitesi orta	32,00-33,00	2,73	10,70	2700	1550	2900,00	40,00	0,25	43474,38
CT-2		33,00-34,00	2,69	9,98	2580	1430			0,28	14407,93
CT-5	Andezit; Açık gri-bej renkli, ince taneli matris ve porfirik dokuya sahip, genel olarak taze, yer yer yüzeysel alterasyon ve demir oksitlenmeleri izlenmektedir. Orta-sık çatlaklı, yer yer eklem çatlakları ve blok yapıları gözlenen dayanımlı-orta dayanımlı volkanik andezit	16,80-17,80	2,70	7,52	2570	1480	2697,18	47,74	0,25	16727,24
CT-5		18,80-19,80	2,68	7,31	2880	1680			0,24	22105,93
CT-5		19,80-20,80	2,68	8,67	2660	1520			0,26	17258,77
CT-5		20,80-21,80	2,74	9,10	2650	1528			0,25	16608,13
CT-5		22,80-23,80	2,76	11,83	2660	1550	885,32	57,44	0,25	16444,5
CT-5		27,80-28,80	2,91	12,92	3150	1720	332,02	55,00	0,29	23016,42

CT-7	Şişt; Koyu yeşil gri renkli sağlam şist, şistozite sondaj doğrultusuna dik, çatlaklar kil+kalsit dolgulu	24,60-25,60	3,12	0,33	4223	2661	13848,12	75,00	0,17	51734,20
CT-7		26,60-27,40	3,12	0,25	4210	2650	13500,00	74,00	0,17	60319,73
CT-8	Volkanik Kayaç; Sarımsı-Gri-bejimsi renkte, az-orta dayanımlı, az-orta ayrışmış, ara ara kırık ve çatlaklarında oksitlenme görülmekte, ara ara kalsit damarları mevcut, kaya kalitesi orta-zayıf-çok zayıf	44,00-45,00	2,66	5,55	2600	1460	797,26	31,38	0,27	15701,66
CT-8		45,00-46,00	2,67				4200,00	30,00		

Çizelge 2. Suda dağılma deney sonuçları

Sondaj No	**Sondaj Aralığı**	**Id1**	**Id2**	**Gambles Suda Dağılma Dayanım Sınıflaması**
CT-05	25,80-26,80	97,55	96,81	Yüksek
	27,80-28,80	98,15	97,63	Yüksek
CT-05	16,80-17,80	98,09	97,56	Yüksek
	19,80-20,80	97,81	97,23	Yüksek
CT-08	45,00-46,00	98,61	98,20	Çok yüksek
	47,00-48,00	98,66	98,24	Çok yüksek
CT-02	31,00-32,00	98,97	98,86	Çok yüksek
	33,00-34,00	99,26	99,14	Çok yüksek
CT-05	23,80-24,80	97,78	97,28	Yüksek
CT-01	38,00-39,00	98,88	98,55	Çok yüksek
CT-02	16,00-17,50	98,48	98,22	Çok yüksek
CT-08	35,00-36,00	98,70	98,55	Çok yüksek
	31,00-32,00	99,22	99,09	Çok yüksek

Çizelge 3. Kimyasal analiz sonunda elde edilen majör oksit içerikler

Numune Adı	**Sondaj Aralığı**	**SO_3**	**KK**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**Na2O**	**K2O**	**MnO**	**TiO_2**
CT-01 BOX-10	40,00-41,00	0	4,91	62,86	16,33	4,03	2,41	0,41	0,27	8,29	0,06	0,40
CT-08 BOX-10	46,00-47,00	0	5,70	52,11	27,37	4,78	0,60	0,31	0,11	8,30	0,04	0,69
CT-05 BOX-05	18,80-19,80	0,425	4,06	64,4	17,54	4,70	1,52	0,83	0,09	5,85	0,04	0,52
CT-02 BOX-04	17,50-19,00	0,025	3,26	34,56	34,17	8,74	0,94	0,83	0,36	16,02	0,11	0,96
CT-05 BOX-07	24,80-25,80	0,70	8,76	40,14	22,4	11,89	6,72	2,97	0,05	5,50	0,18	0,68
CT-05 BOX-06	20,80-21,80	0,525	7,31	21,52	35,34	9,63	10,22	4,63	0,08	9,68	0,13	0,92
CT-02 BOX-08	32,00-33,00	0,75	3,82	11,48	44,50	10,02	4,26	2,12	0,52	21,19	0,08	1,25

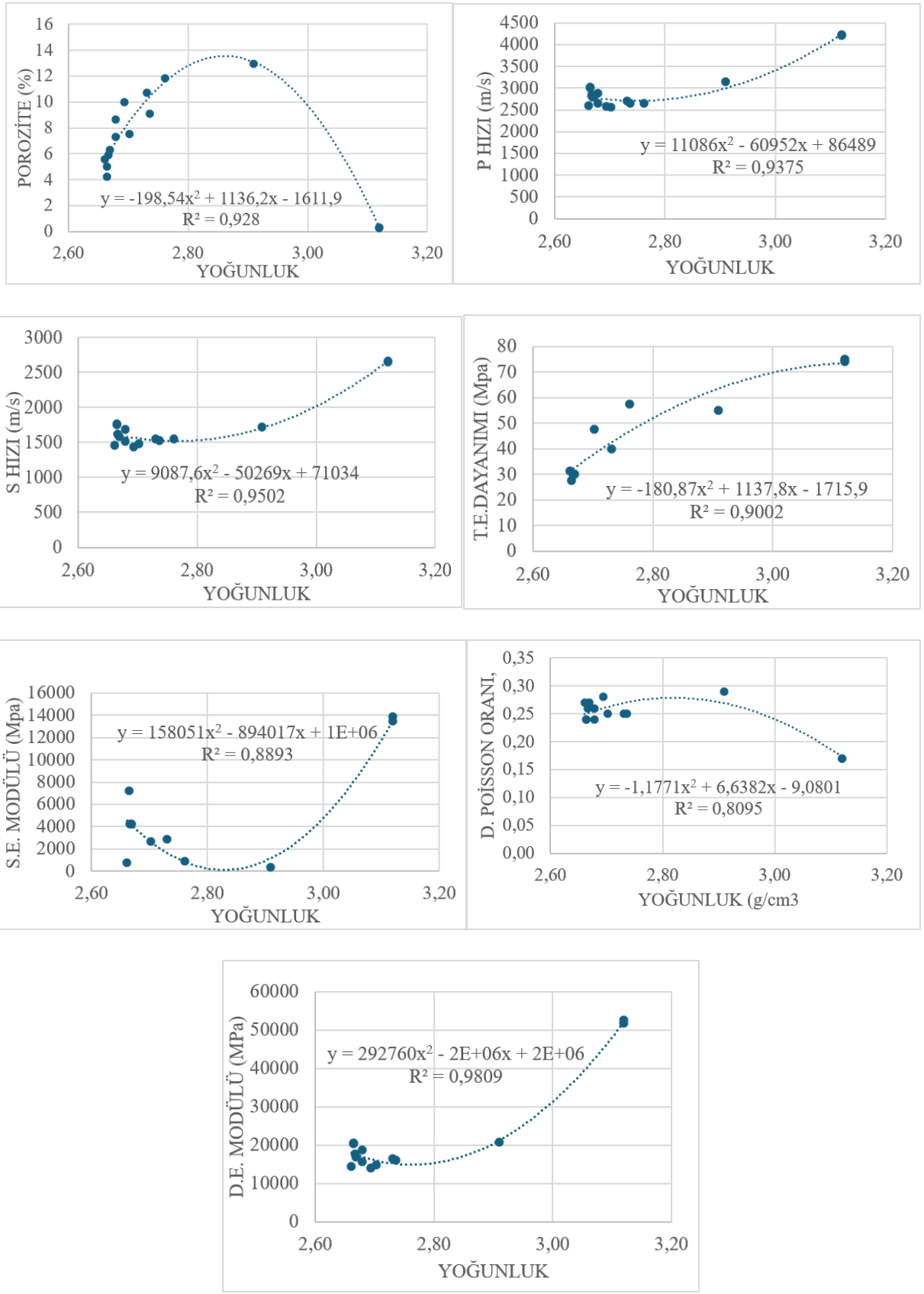
Çizelge 4. Saha sismograf kayıtlardan elde edilen veriler

Ölçüm Mesafe (m)	T (mm/s)	V (mm/s)	L (mm/s)	PVS (mm/s)	Dinamik Elastisite Modülü (MPa)
201,00	1,78	2,41	2,29	2,91	12536,47
290,00	1,40	2,16	1,91	2,29	9677,35
247,00	1,47	1,79	1,82	2,44	6720,78
60,00	11,56	2,79	3,30	4,17	1475296,82
110,00	11,56	8,26	15,37	16,73	612501,51
160,00	1,47	1,79	1,82	2,44	6720,78
200,00	1,78	2,41	2,92	3,15	20582,52
60,00	4,19	5,46	5,59	7,50	81298,45
60,00	10,67	10,67	10,54	18,40	13614391,11
110,00	4,83	4,19	7,24	7,96	138344,24
60,00	4,57	6,35	8,51	8,76	146408,05
100,00	8,13	4,95	8,00	8,63	6288028,88
40,00	3,56	5,08	8,26	8,45	94646,69
85,00	2,67	2,03	3,30	3,59	21574,75
43,00	4,19	3,43	4,95	6,37	22724,05
95,00	3,43	1,40	1,78	3,65	138661,06
220,00	0,76	0,64	0,64	1,05	9834,00
30,00	10,79	7,75	17,14	17,67	736685,02
40,00	13,29	20,72	19,76	23,86	1036753,43
85,00	3,18	4,06	7,62	8,61	75935,06
155,00	2,92	2,03	4,95	5,23	56826,27
17,00	85,59	51,41	156,50	167,20	50897184,32
65,00	5,84	4,45	4,70	6,48	537469,50
135,00	2,03	2,16	3,18	3,53	25710,73
225,00	1,02	1,02	1,27	1,51	3406,44
17,00	8,64	4,56	18,36	18,65	547111,57
65,00	0,64	0,89	1,65	1,67	3077,11
135,00	0,76	0,51	0,51	0,77	7525,15
28,00	11,18	12,45	15,87	18,94	679939,04
50,00	13,59	10,41	9,78	16,03	2530073,55
14,00	64,01	78,74	129,70	155,50	29625887,98
82,00	1,14	1,52	2,67	3,01	9788,57
38,00	34,04	17,65	12,70	34,29	13020096,20
13,00	51,05	95,50	76,71	99,24	15515781,46
35,00	36,45	35,81	66,42	67,55	9215790,88
100,00	17,43	16,55	28,08	28,22	1946661,37
117,00	1,27	1,02	1,14	1,55	35984,65
190,00	1,91	3,05	2,92	3,59	22143,02
100,00	11,28	8,50	16,90	19,99	754622,28
43,00	23,88	45,97	32,64	46,38	2845709,27
71,00	5,33	8,13	8,89	11,97	187246,80
158,00	3,30	4,32	4,06	4,77	31130,53
61,00	10,54	12,32	16,76	16,86	703608,45
56,00	12,83	13,84	19,43	21,97	989725,02
278,00	0,76	0,51	0,51	0,81	7525,15
34,00	32,38	30,23	26,54	36,54	17118285,62
20,00	8,76	12,45	14,73	16,10	508425,96
52,00	2,03	1,40	2,92	3,06	22990,95

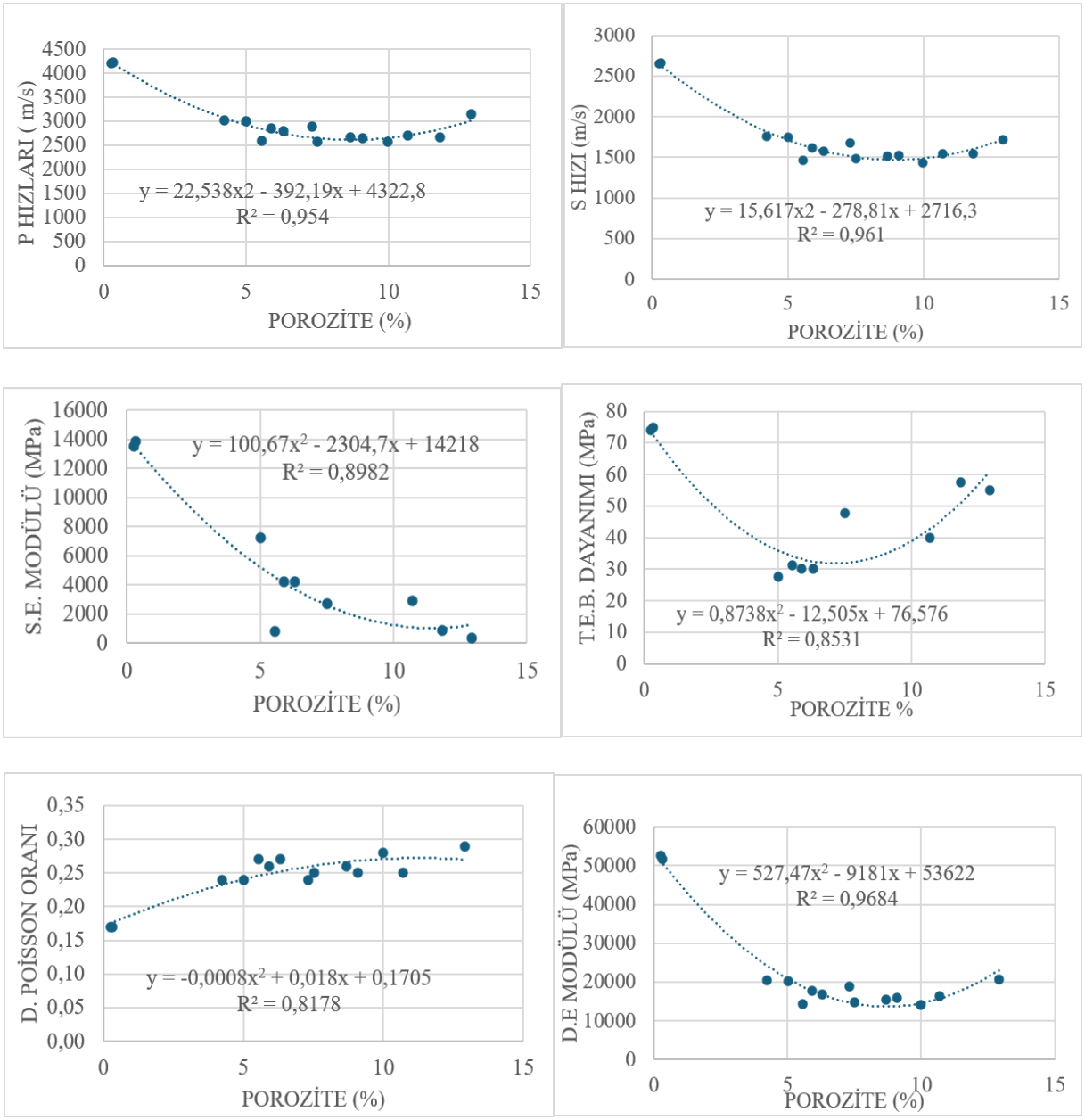
3. Bulgular ve Tartışma

Yoğunluk ile porozite, ultrasonik P ve S dalga hızları, tek eksenli basınç dayanımı, statik elastisite modülü, dinamik elastisite modülü ve dinamik poisson oranı arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yoğunluğun kayaçların fiziksel, mekanik ve dinamik davranışlarını kontrol eden temel parametrelerden biri olduğunu göstermiştir. Porozite artışına bağlı olarak yoğunluğun azaldığı; yoğunluk arttıkça ise dalga hızları, dayanım parametreleri ve elastisite modüllerinin de arttığı görülmüştür. Elde edilen R^2lerin yüksek olması bu ilişkinin güçlü ve anlamlı olduğunu göstermektedir. Parametreler arasındaki ilişkilerin grafiksel gösterimleri Şekil 2'de sunulmuş, oluşturulan ampirik matematiksel modeller ile bu modellere ait determinasyon katsayıları (R^2) Çizelge 5'te verilmiştir. Elde edilen bu ilişkiler, kayaç yoğunluğu arttıkça boşluk ve mikro çatlakların azalmasına bağlı olarak P dalgası hızının yükseldiğini bildiren Yaşar ve Erdoğan (2004) ile Kahraman (2002) tarafından elde edilen bulgularla uyumludur. Ayrıca, statik elastisite modülü değerlerinin dinamik elastisite modülü değerlerinden belirgin şekilde düşük çıkması, dinamik yöntemlerin kayacın elastik davranışını sistematik olarak daha yüksek değerlerde yansıttığını bildiren Brotons (2014) ile de tutarlı bulunmuştur.

Porozite ile kayaçların fiziksel, mekanik ve dinamik özellikleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde, porozitenin kayaç davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biri olduğu görülmüştür. Porozite artışına bağlı olarak ultrasonik P ve S dalga hızları, tek eksenli basınç dayanımı ile statik ve dinamik elastisite modüllerinin azaldığı, dinamik Poisson oranının ise artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen ilişkilerin grafiksel gösterimleri Şekil 3'te verilmiş olup, oluşturulan matematiksel modeller ve bu modellere ait R^2 değerleri Çizelge 5'te sunulmuştur. İlişkilere ait R2'lerin yüksek olması bu ilişkilerin güçlü olduğunu göstermektedir. Porozitenin kayaçların dalga iletim davranışı üzerindeki bu belirleyici etkisi, gözenek yapısının kayaçların fiziksel ve mekanik performansını kontrol eden temel unsurlardan biri olduğunu vurgulayan Bérest (2022) ile örtüşmektedir. Ayrıca, yüksek poroziteli kayaçlarda dalga enerjisinin gözeneklerde emilerek titreşimlerin daha hızlı sönümlendiğini bildiren Lu ve Tao (2023) tarafından elde edilen bulgular, bu çalışmada saptanan porozite-dalga hızı ilişkileriyle uyumluluk göstermektedir.



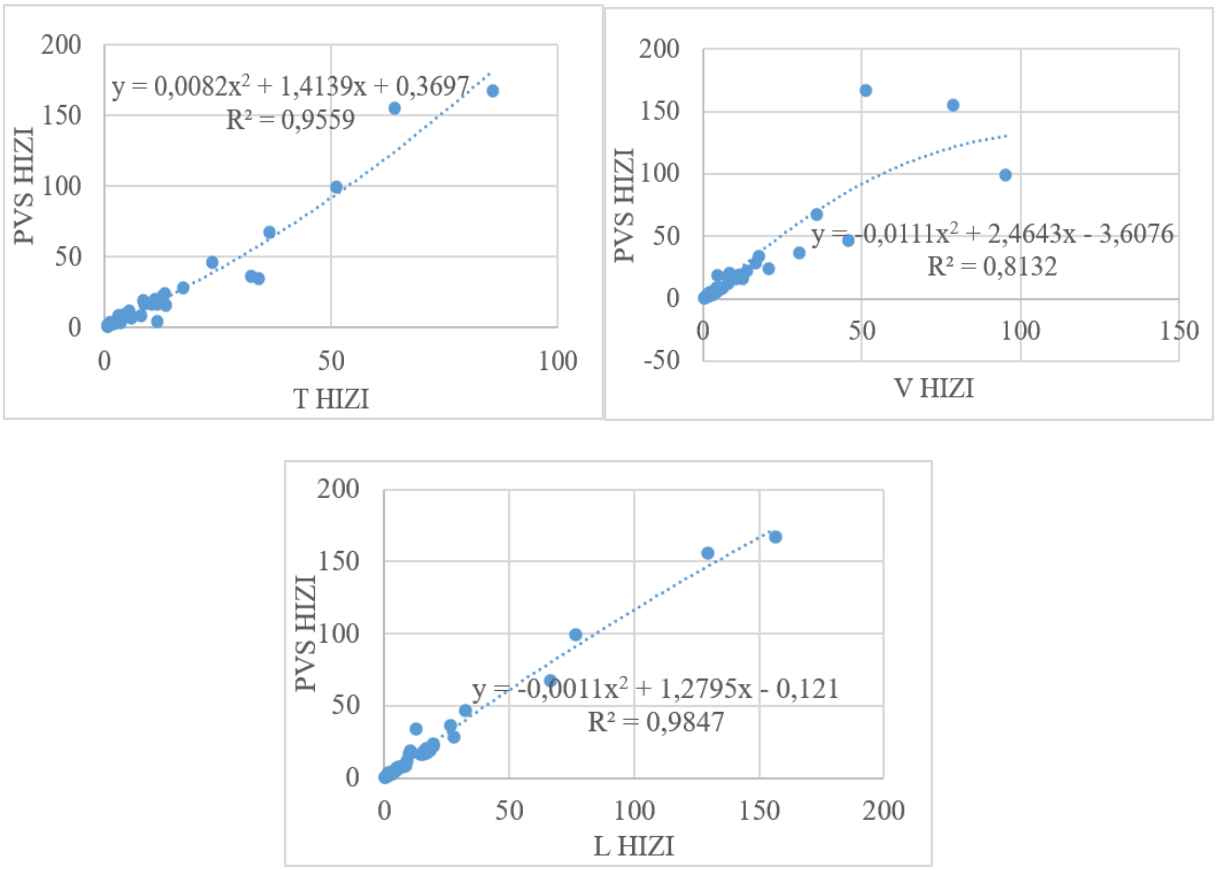
Şekil 2.Yoğunluk ve Diğer Kaya Özelliklerinin Grafiksel ilişkiler.



Şekil 3. Porozite ve Diğer Kaya Özelliklerinin Grafiksel ilişkiler.

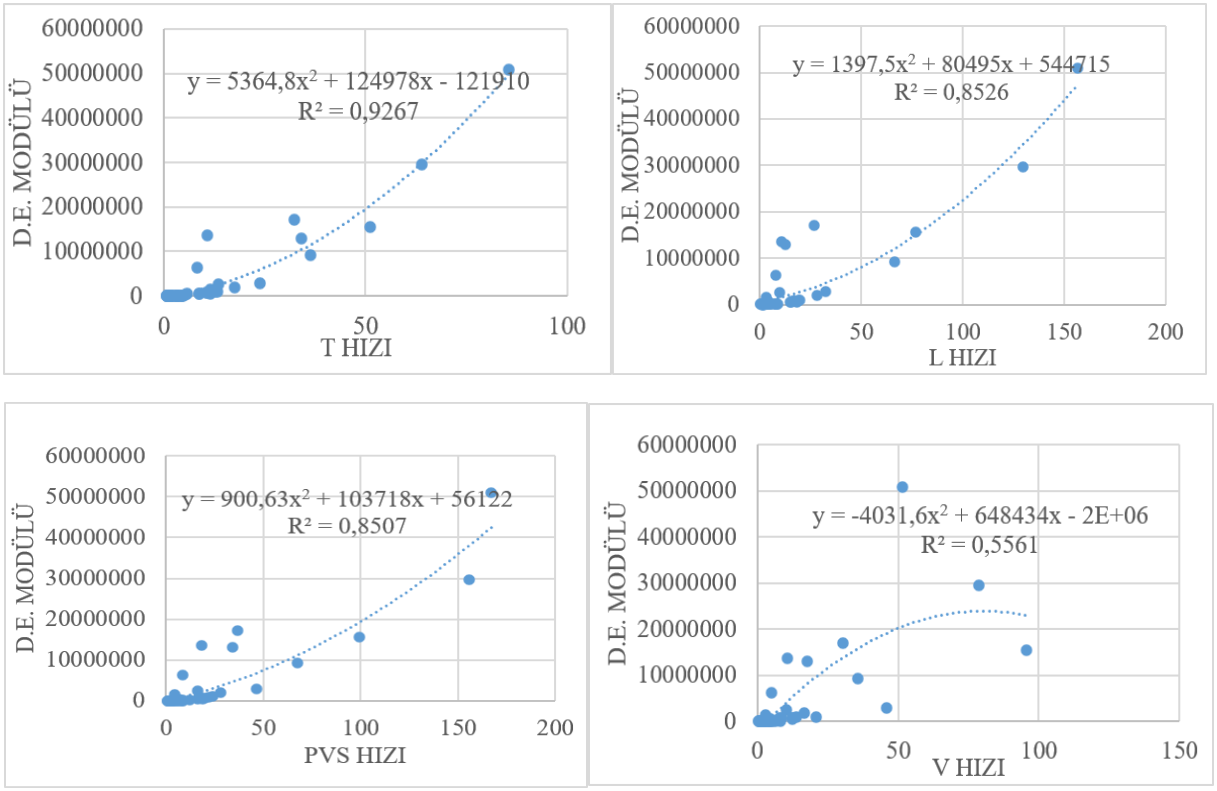
Patlatma çalışmaları sırasında farklı mesafelerde konumlandırılan sismograflardan elde edilen T, V ve L dalga hızları, PVS değerleri ve dinamik elastisite modülü verileri birlikte değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, T, V ve L dalga hızları ile PVS arasındaki ilişkiler incelenmiş; ayrıca T, V, L ve PVS parametreleri ile dinamik elastisite modülü arasındaki etkileşimler araştırılmıştır. İlgili parametreler arasındaki ilişkilerin ortaya konulabilmesi amacıyla her bir veri seti için grafiksel analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen dağılımlar Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Bununla birlikte, değişkenler arasındaki ilişkilerin matematiksel olarak ifade edilebilmesi amacıyla ampirik regresyon modelleri oluşturulmuş,

modellere ait denklemler ve determinasyon katsayıları (R^2) hesaplanmıştır. Oluşturulan matematiksel modeller ve bu modellere ait istatistiksel parametreler Çizelge 5'te verilmiştir.



Şekil 4. T, L, V ile PVS Hızları Arasındaki Grafiksel İlişkiler

Elde edilen sonuçlar, T ve L dalga hızları ile PVS arasında güçlü pozitif ilişkiler bulunduğunu, benzer şekilde T, L ve PVS değerlerinin artışına bağlı olarak dinamik elastisite modülünün de arttığını göstermiştir. V hızı ile PVS ve dinamik elastisite modülü arasında ise daha düşük seviyede ancak anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, saha sismik verileri kayaç ortamının elastik özellikleri ile dalga yayılım davranışı arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Yüksek R^2 değerleri, oluşturulan modellerin veri setini başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Laboratuvar ortamında belirlenen kayaç özelliklerinin saha ölçeğindeki davranışı önemli ölçüde temsil ettiğini göstermiştir. Bu sonuç, yüksek dayanımlı kayaçlarda patlayıcı enerjisinin büyük bir kısmının sismik dalgalara dönüştüğünü ve titreşim hızının hızla sönümlendiğini bildiren Xu vd. (2016) tarafından yapılan saha gözlemleriyle de tutarlıdır.



Şekil 5. T, L, V ve PVS Hızları ile dinamik elastisite modülü Arasındaki Grafiksel İlişkiler.

Elde edilen kimyasal analiz verileri, kayaçların fiziksel, mekanik ve dinamik özelliklerinin majör oksit bileşimi ile güçlü bir ilişki içerisinde olduğunu ortaya koymaktadır. Fe_2O_3, CaO ve MgO içeriklerinin arttığı numunelerde yoğunluk değerlerinde belirgin bir artış, buna karşılık porozitede azalma gözlenmiştir. Bu değişime paralel olarak ultrasonik P ve S dalga hızları, tek eksenli basınç dayanımı ile statik ve dinamik elastisite modüllerinin yükseldiği belirlenmiştir. Buna karşın, Al_2O_3 bakımından zengin numunelerde daha yüksek porozite değerleri ile düşük dalga hızları ve elastik parametreler tespit edilmiştir. SiO_2 içeriği yüksek kayaçlarda ise yoğunluk ve dayanım özelliklerinin orta düzeyde seyrettiği gözlenmiş olup, mühendislik davranışının yalnızca silika oranı ile açıklanamayacağı anlaşılmıştır. Suda dağılma dayanımı deney sonuçları, tüm numunelerin yüksek ve çok yüksek dayanım sınıfında yer aldığını göstermiştir. Bu durum, ayrışma dayanımının yalnızca kimyasal bileşimle sınırlı olmayıp, kayaç dokusu ve çimentolanma derecesi gibi petrografik özelliklerden de önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Majör oksit içerikleri ile fiziko-mekanik özellikler arasında gözlenen bu ilişkiler, jeokimyasal verilerin kayaç davranışının yorumlanmasındaki önemine dikkat çeken Rollinson (1993) ile uyumlu bulunmuştur. Kayaç dokusu ve mineral

bileşiminin mekanik davranış üzerindeki belirleyici rolü ise petrografi literatüründe de (Blatt, 2006) vurgulanmaktadır.

Çizelge 5. *Tüm Karşılaştırmalara Ait Matematiksel Model ve Determinasyon Katsayıları*

Karşılaştırmalar	**Matematiksel model**	**Determinasyon katsayısı (R^2)**
Yoğunluk ve Porozite	$y = -198,54x^2 + 1136,2x - 1611,9$	$R^2 = 0,9280$
Yoğunluk ve P Hızı	$y = 11086x^2 - 60952x + 86489$	$R^2 = 0,9375$
Yoğunluk ve S Hızı	$y = 9087,6x^2 - 50269x + 71034$	$R^2 = 0,9502$
Yoğunluk ve T. E. Basınç Dayanımı	$y = -180,87x^2 + 1137,8x - 1715,9$	$R^2 = 0,9002$
Yoğunluk ve Statik Elastisite Modülü	$y = 158051x^2 - 894017x + 1E+06$	$R^2 = 0,8893$
Yoğunluk ve Din. Elastisite Modülü	$y = 292760x^2 - 2E+06x + 2E+06$	$R^2 = 0,9809$
Dinamik Poisson Oranı	$y = -1,1771x^2 + 6,6382x - 9,0801$	$R^2 = 0,8095$
Porozite ile P hızı	$y = 22,538x^2 - 392,19x + 4322,8$	$R^2 = 0,9540$
Porozite ile S hızı	$y = 15,617x^2 - 278,81x + 2716,3$	$R^2 = 0,9610$
Porozite ile Statik Elastisite Modülü	$y = 100,67x^2 - 2304,7x + 14218$	$R^2 = 0,8982$
Porozite ile T. E. Basınç Dayanımı	$y = 0,8738x^2 - 12,505x + 76,576$	$R^2 = 0,8531$
Porozite ile Din. Elastisite Modülü	$y = 527,47x^2 - 9181x + 53622$	$R^2 = 0,9684$
Porozite ile Din. Poisson Oranı	$y = -0,0008x^2 + 0,018x + 0,1705$	$R^2 = 0,8178$
T Hızı ile PVS	$y = 0,0082x^2 + 1,4139x + 0,3697$	$R^2 = 0,9559$
L Hızı ile PVS	$y = -0,0011x^2 + 1,2795x - 0,121$	$R^2 = 0,9847$
V Hızı ile PVS	$y = -0,0111x^2 + 2,4643x - 3,6076$	$R^2 = 0,8132$
T Hızı ile Dinamik Elastisite Modülü	$y = 5364,8x^2 + 124978x - 121910$	$R^2 = 0,9267$
V Hızı ile Dinamik Elastisite Modülü	$y = -4031,6x^2 + 648434x - 2E+06$	$R^2 = 0,5561$
L Hızı ile Dinamik Elastisite Modülü	$y = 1397,5x^2 + 80495x + 544715$	$R^2 = 0,8526$
PVS ile Dinamik Elastisite Modülü	$y = 900,63x^2 + 103718x + 56122$	$R^2 = 0,8507$

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kayaçların fiziksel, mekanik, dinamik ve kimyasal özelliklerinin patlatma kaynaklı dalga yayılımı üzerindeki etkileri laboratuvar deneyleri ve saha sismik verileri birlikte değerlendirilerek araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, porozite artışıyla birlikte yoğunluğun azaldığını, buna karşılık yoğunluk arttıkça P ve S dalga hızları, tek eksenli basınç dayanımı ile statik ve dinamik elastisite modülü değerlerinin arttığını göstermiştir. Porozite artışı ise dalga hızları, dayanım ve elastik parametrelerde azalmaya neden olmuş, kayaçların dalga iletim kapasitesini olumsuz etkilemiştir.

Kimyasal analiz sonuçları, kayaçların mühendislik davranışlarının yalnızca fiziksel özelliklere değil, mineralojik ve kimyasal bileşime de bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle yoğunluk ve dayanımın yüksek olduğu numunelerde dalga yayılımının daha etkin gerçekleştiği belirlenmiştir. Saha sismik verilerinin değerlendirilmesi sonucunda T, V ve L dalga hızları, PVS ve dinamik elastisite modülü arasında anlamlı ilişkiler elde edilmiş; laboratuvar ve saha verileri arasındaki uyum kayaç özelliklerinin patlatma kaynaklı dalga yayılımını önemli ölçüde kontrol ettiğini göstermiştir.

Ayrıca geliştirilen ampirik matematiksel modellerin yüksek determinasyon katsayılarına sahip olması, kayaç özellikleri ile dalga yayılım parametreleri arasındaki ilişkilerin güvenilir şekilde temsil edilebildiğini göstermiştir. Sonuç olarak, kayaçların fiziksel, mekanik, dinamik ve kimyasal özelliklerinin birlikte değerlendirilmesinin patlatma performansının anlaşılması ve patlatma tasarımlarının optimize edilmesi açısından önemli katkılar sağlayacağı belirlenmiştir.

Çalışmanın bazı sınırlılıklarının belirtilmesi de gerekmektedir. Tek eksenli basınç dayanımı ve statik elastisite modülüne dayalı ilişkiler görece az sayıda numuneden (n=10-11) elde edilmiş olup, bu durum ilgili modellerin genellenebilirliğini sınırlandırabilir. Ayrıca çalışma tek bir maden sahasından elde edilen verilerle yürütülmüştür. Farklı jeolojik ortamlardan ve daha geniş numune gruplarından elde edilecek verilerle yürütülecek ileriki çalışmalar, geliştirilen ampirik modellerin geçerliliğinin sınanması ve genelleştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Bununla birlikte, elde edilen bulgular, düşük yoğunluklu ve yüksek poroziteli zonlarda dalga enerjisinin daha hızlı sönümlendiğine işaret etmesi bakımından, patlatma paternlerinin kayaç özelliklerine göre sahaya özgü şekilde optimize edilmesine yönelik pratik bir çıkarım da sunmaktadır.

KAYNAKLAR

ASTM D4644, 2016. Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D7012, 2021. Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Bérest, J.J., 2022. Porosity and Permeability of Rocks. ISTE Press–Elsevier.

Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications.

Blatt, H., 2006. Petrology, Igneous, Sedimentary, and Metamorphic. W.H. Freeman & Company, New York.

Brotons, V.T., 2014. Relationship between Static and Dynamic Elastic Modulus of Calcarenite. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 73:791–795.

Goodman, R., 1989. Introduction to Rock Mechanics.

ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.), Kozan Ofset, Ankara.

Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W., 2007. Fundamentals of Rock Mechanics.

Kahraman, S., 2002. Estimating the Direct P-Wave Velocity Value of Intact Rock from Indirect Laboratory Measurements. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39(1), 101-104

Komurlu, E., Kesimal, A., 2012. New Engineering Materials for Underground Constructions. 16th International Metallurgy and Materials Congress, pp. 307-319, İstanbul, Turkey

Lu, G., Tao, Y., 2023. Experimental Study into the Propagation and Attenuation of Blasting Vibration Waves in Porous Rock-Like Materials. Frontiers in Materials, 10:1-11

Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific and Technical.

Xu, Z.Y., Yu, Y.N., Guo, L.J., 2016. Influence of Rock Properties on Blasting Vibration Propagation. Journal of Mines, Metals & Fuels, 64(8), 360-366.

Yaşar, E., Erdoğan, Y., 2004. Correlating Sound Velocity with the Density, Compressive Strength and Young Modulus of Carbonate Rocks. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41(5), 871-875.