

Sıkılama Malzemesi Seçiminin Patlatma Performansına Etkisi: Taş Tozu ile Taş Tozu-Mıcır Karışımının Karşılaştırmalı Analizi

Meriç Can ÖZYURT ^{1,a}

¹*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

^a*ORCID: 0000-0002-7545-7756*

Makale Bilgileri

Geliş : 13.10.2025

Kabul : 23.02.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1802584

Sorumlu Yazar

Meriç Can ÖZYURT

meric.ozyurt@iuc.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Delme ve patlatma

Sıkılama malzemesi

Patlatma kaynaklı çevresel etkiler

Patlatma ile kaya parçalanması

Atıf şekli: ÖZYURT, M.C., (2026).

Sıkılama Malzemesi Seçiminin Patlatma Performansına Etkisi: Taş Tozu ile Taş Tozu-Mıcır Karışımının Karşılaştırmalı Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 181-194.

ÖZ

Patlatma uygulamalarında, zaman kısıtı veya özensizlik nedeniyle sıkılama genellikle yetersiz kalmakta ve uygun malzeme seçiminde belirsizlikler yaşanmaktadır. Mevcut literatür, yaygın olarak kullanılan taş tozu ve taş tozu-mıcır karışımının performansını kapsamlı ve karşılaştırmalı bir şekilde inceleyen çalışmalar açısından sınırlıdır. Bu bağlamda, bu çalışmanın temel amacı, söz konusu malzemelerin hem parçalanma performansı hem de titreşim/hava şoku gibi çevresel etkiler üzerindeki rolünü sistematik bir saha çalışması ile araştırmaktır. Elde edilen bulgular, taş tozu-mıcır karışımının, gaz kaçağını minimize etmede, enerji verimliliği sağlamada ve parçalanma performansını artırmada taş tozuna kıyasla belirgin bir üstünlük sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, titreşim ve hava şoku yayılımında daha kontrollü ve öngörülebilir bir davranış paterni oluşturduğu tespit edilmiştir.

The Effect of Stemming Material Selection on Blasting Performance: A Comparative Analysis of Pure Stone Dust and Stone Dust-Gravel Mixture

Article Info

Received : 13.10.2025

Accepted : 23.02.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1802584

Corresponding Author

Meriç Can ÖZYURT

meric.ozyurt@iuc.edu.tr

Keywords

Drilling and blasting

Stemming material

Blast-induced environmental effects

Rock fragmentation by blasting

How to cite: ÖZYURT, M.C., (2026). The Effect of Stemming Material Selection on Blasting Performance: A Comparative Analysis of Pure Stone Dust and Stone Dust-Gravel Mixture. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 181-194.

ABSTRACT

In blasting applications, stemming is often neglected or performed inadequately, leading to uncertainties in optimal material selection. While stone dust and stone dust-gravel mixtures are commonly used, a comprehensive, field-based comparison of their performance is lacking in the literature. This study systematically investigates the role of these two materials on both fragmentation performance and environmental effects through a secondary analysis of extensive field data from 10 quarries. The findings demonstrate that the stone dust-gravel mixture exhibits distinct superiority over pure stone dust in minimizing gas leakage, providing energy efficiency, and enhancing fragmentation performance. Furthermore, the mixture resulted in a more controlled and predictable behavior pattern in the propagation of ground vibration and air overpressure.

1. GİRİŞ

Patlatma, maden, taş ocağı ve inşaat sektörlerinde kayaların parçalanmasında vazgeçilmez bir yöntemdir. Hem Türkiye'de hem de dünyada milyar dolarlık iş hacmine sahiptir [1]. Verimli bir şekilde uygulandığında büyük ekonomik kazançlar sağlarken, verimsiz uygulamalar ise enerji kaybı, maliyet artışı ve istenmeyen çevresel etkilere yol açmaktadır [2]. Madencilik endüstrisinin sürdürülebilirliği ile doğrudan bağlantılı olan patlatma verimliliğinin artırılması, artan küresel mineral talebi karşısında kritik bir öneme sahiptir [3]. Ne var ki, kaya parçalanmasında kullanılan patlayıcıların enerji kullanım verimliliği halen düşük seviyelerde olup, patlama enerjisinin önemli bir kısmı titreşim veya hava şoku olarak israf olmaktadır [4-6].

Bu genel verimsizlik bağlamında, patlatma performansını iyileştirmede kilit rol oyun parametrelerden biri sıkılama. Patlatma deliğinin serbest yüzeye yakın kısmının patlayıcı olmayan malzemeyle tıkanması işlemdir [7,8]. Birincil işlevi, patlayıcı gazların kaya içinde bir kırık ağı oluşturup parçalanmayı sağlayacak yeterli süre boyunca delik içinde hapsedilmesidir. Snelling [9] tarafından yapılan öncü çalışmada, iyi bir sıkılamanın patlatma verimliliğini %40'a varan oranlarda artırabileceği belirtilmiştir. Sıkılamanın önemi, parçalanma verimliliğini artırmasının yanı sıra, çevresel etkileri minimize etmesiyle de ortaya konmuştur [10-12].

Sıkılama konusundaki bu önem, onu kapsamlı bir şekilde inceleyen değerli bilimsel çalışmaların odağı haline getirmiştir. Sıkılama boyunun optimizasyonu [12-16], sıkılama davranışı [17] ve sıkılama uygulamasının parçalanma ve titreşim üzerine etkileri [18,19] detaylıca incelenmiştir. Oates ve Spiteri [20] tarafından yapılan bir literatür incelemesi, madencilik endüstrisinde sıkılama ve en iyi uygulamaları kapsamlı bir şekilde özetlemiştir.

Pratikte ise sıkılama malzemesi seçimi büyük çeşitlilik göstermektedir. Sıkılama malzemesi olarak, başta delme makinesi pasası (taş tozu) ve taş tozu-mıdır karışımı (Şekil 1) olmak üzere çeşitli malzemeler yaygın şekilde kullanılmaktadır [21,22]. Taş tozunun temin kolaylığı ve sıfır maliyeti gibi avantajları bulunmakla birlikte [18], ince ve yuvarlak taneli yapısı nedeniyle yüksek gaz basıncı karşısında gaz kaçığına izin verme eğilimindedir. Buna karşılık, mıdırın kaba, köşeli ve geniş tane dağılımı, mekanik kenetlenme ve yüksek sürtünme direnci sağlayarak daha etkili bir bariyer oluşturur. Bu iki malzemenin karışımından oluşan taş tozu-mıdır, mıdırın oluşturduğu "iskelet" yapı ile mekanik mukavemeti, taş tozunun dolgu özelliği ile de geçirimsizliği bir arada sunarak üstün bir performans potansiyeli taşımaktadır.



Şekil 1. Sıkılama için kullanılan taş tozu ve mıdır

Ayrıca, literatürde alçı [7,23-26], su kartuşu, kauçuk tıkaçlar ve özel kimyasal karışımlar gibi alternatif malzemeler de araştırılmıştır [10,27]. Hatta Zhang ve arkadaşları [28] çelik sıkılama üzerine deneysel bir çalışma yürütmüştür. Ancak, bu malzemelerin bir kısmı maliyet, ulaşılabilirlik ve uygulama zorluğu gibi nedenlerle yaygın kabul görmemiştir. Kil ve kum gibi geleneksel malzemeler ise yaygın bulunurluk, düşük maliyet ve toksik olmama gibi avantajlara sahiptir, ancak bu malzemelerle ilgili araştırmalar halen sınırlıdır [3]. Son dönemde yapılan çalışmalar, sıkılama malzemesinin karakteristik empedansının patlama verimi üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Sıkılama malzemesinin empedansı patlayıcınıninkini aştığında, delik içindeki patlama basıncının arttığı, bunun da kaya parçalanmasını olumlu etkilediği gösterilmiştir [28-30]. Shi ve arkadaşları [3], kilin yüksek karakteristik empedansı sayesinde kum, su veya

sıkılama yapılmamasına kıyasla daha yüksek gerinim tepe değerleri ve kaya parçalanma verimi sağladığını deneysel olarak kanıtlamıştır.

Ancak, pratikte birçok maden sahasında zaman tasarrufu amacıyla veya özensizlik nedeniyle sıkılama ya yetersiz bırakılmakta, ayrıca uygun sıkılama malzemesi seçiminde belirsizlikler bulunmaktadır [3]. Mevcut literatür, özellikle yaygın olarak kullanılan taş tozu ve taş tozu-mıcır karışımının performansını, hem parçalanma verimi hem de titreşim/hava şoku gibi çevresel parametreler üzerinden kapsamlı ve karşılaştırmalı bir şekilde inceleyen çalışmalar açısından nispeten sınırlıdır. Bu bağlamda, bu çalışmanın temel amacı, sıkılama malzemesi olarak taş tozu ve taş tozu-mıcır karışımı kullanımının, bir yandan patlatma ile elde edilen parçalanma performansına, diğer yandan titreşim ve hava şoku gibi çevresel etkilere olan etkisini karşılaştırmalı olarak incelemektir. Bu çalışmanın bulguları, endüstride yaygın, ekonomik ve erişilebilir malzemeler kullanılarak patlatma optimizasyonu için somut veri ve öneriler sunmaktadır.

Bu amaçla, bu çalışmada mevcut saha verilerinin sistematik bir ikincil analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın analizleri, Arslan ve arkadaşları [31] ve Ozyurt ve arkadaşları [32] tarafından Trakya Bölgesi'ndeki 10 farklı taş ocağından toplanan kapsamlı bir ham veri seti üzerinden gerçekleştirilmiştir. Söz konusu önceki çalışmalar patlatma verimliliğinin genel değerlendirmesi ve patlatma ile kaya parçalanmasını yönelik tahmin modeli geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Mevcut çalışma ise, aynı veri setini, sıkılama malzemesi performansının karşılaştırmalı analizine odaklanarak yeniden değerlendirmiş; titreşim ve hava şoku verileri için yeni regresyon modelleri türetmiş, parçalanma verilerini sıkılama tipi temelinde kıyaslamış ve gaz kaçağı gözlemlerini sistematize etmiştir. Böylece, aynı ham verilerden yola çıkılarak özgün bir bakış açısı ve yeni sonuçlar elde edilmiştir.

2. ÇALIŞMA SAHALARI

Bu çalışma, Arslan ve arkadaşları [31] ve Ozyurt ve arkadaşları [32] tarafından Kırklareli, Trakya bölgesindeki 10 farklı taş ocağından toplanan bir ham veri setinin ikincil analizine dayanmaktadır. Söz konusu birincil çalışmalar, 19 patlatma atımına ait jeolojik, tasarım, parçalanma, titreşim ve hava şoku verilerini içermektedir. Mevcut çalışmanın amacı, aynı veri setini sıkılama malzemesi performansı odağında yeniden değerlendirmektir. Çizelge 1, bu çalışma sahalarının birincil çalışmalardan derlenen jeolojik ve mekanik özelliklerini özetlemektedir.

Çizelge 1. Çalışma sahalarının jeolojik ve mekanik özellikleri [31, 32]

Çalışma sahası	Formasyon	Kaya birimi	TEBD* (MPa)	Kaya sınıfı**	ρ^* (t/m ³)	D*** (mm)		
						En düşük	Ort. (D ₅₀)	En büyük
1	Pınarhisar	Kireçtaşı	89	Sağlam	2.54	1030	2515	5635
2	Pınarhisar	Kireçtaşı	98	Sağlam	2.52	930	3355	7520
3	Pınarhisar	Kireçtaşı	71	Sağlam	2.52	755	3665	4690
4	Süloğlu	Kumtaşı	95	Sağlam	2.55	365	3600	1865
5	Soğucak	Kireçtaşı	48	Sağlam	2.50	520	3430	2960
6	Soğucak	Kireçtaşı	42	Sağlam	2.44	1580	2705	4970
7	Trakya	Kireçtaşı	76	Sağlam	2.51	310	1925	3395
8	Süloğlu	Kumtaşı	55	Sağlam	2.50	330	1660	3200
9	İslambeyli	Marn	130	Çok sağlam	2.55	310	2170	4360
10	Süloğlu	Kireçtaşı	186	Çok sağlam	2.60	1430	1990	6135

T.E.B.D.: Tek eksenli basınç dayanımı, ρ : Birim hacim ağırlığı, D: Basamak aynasındaki blok Boyutu

Birincil verilere göre, incelenen kaya birimleri sağlam ve çok sağlam kaya sınıfına girmektedir. Ayrıca, kaya kütlelerindeki süreksizler ve bu süreksizliklerin oluşturduğu blok boyutlarında da belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Kayaların dayanımındaki (37-186 MPa) ve doğal blok boyutlarındaki (D₅₀: 1660-3665 mm) bu çeşitlilik, sıkılama malzemesinin etkilerinin farklı kaya kütlesi koşullarında incelenebilmesi için uygun bir zemin oluşturmaktadır.

Çalışma alanında yer alan formasyonların litolojik özellikleri ve stratigrafik ilişkileri şu şekilde özetlenebilir:

İslambeyli Formasyonu 30-100 m arasında değişen kalınlığıyla dikkat çekmektedir. Birim, temelde zayıf sıkışmış, kötü boylanmalı ve açısal bloklu yapıdaki volkanik klastik kumtaşı-konglomera ile başlamakta; üzerine sarı, krem-gri renkli karbonat çimentolu, sert ve sıkı bağlı kumtaşı, kilaşı-marn ve kireçtaşı

istiflenmektedir [33,34]. Ayrıca bu birimde marnlarla aralanmalı, konvolüt yapılı tuf ve tüfitler de bulunmaktadır.

Bölgedeki diğer bir önemli birim olan Pınarhisar Formasyonu (Oligosen) [35,36] ise kumtaşı, çakıllı kumtaşı, konglomera ve oolitik, kumlu ile killi kireçtaşı gibi farklı litolojilerden oluşmaktadır. Birim, gri ve boz renkli, ince-orta tabakalı ve yer yer oolitik yapıda olup, üst seviyelerinde manganezli konglomera ve kumtaşı seviyeleri ile balık dişi fosilleri içeren konglomera-kireçtaşı aralanması dikkat çekmektedir.

Soğucak Formasyonu [37,38] ise Geç Lutesiyen ile Erken Oligosen aralığındaki yaşıyla, Kuzey Trakya Havzası'nda sığ denizel ortamlardan derin açık denizel şartlara uzanan bir çökeltme ortamı sürecini yansıtmaktadır.

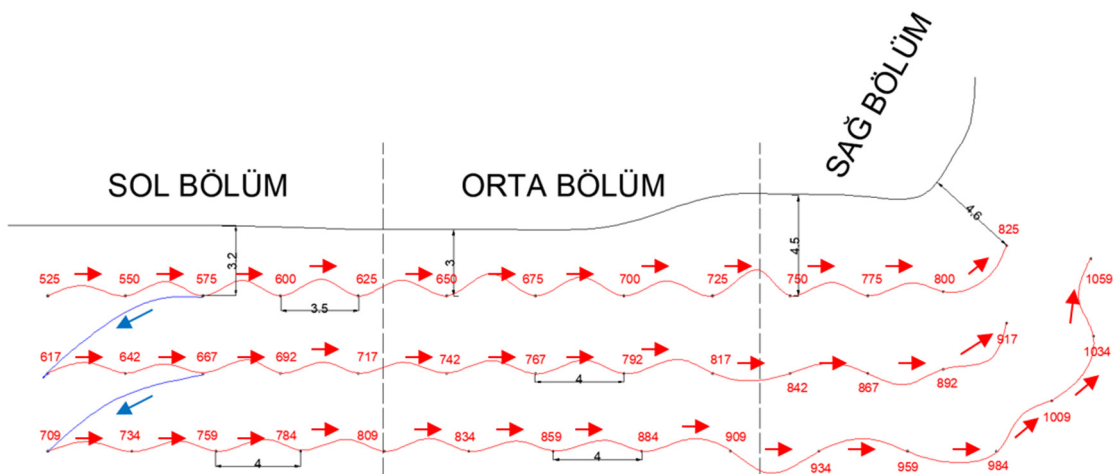
Bunu takiben Süloğlu Formasyonu (Orta-Üst Oligosen) [39] gelmektedir. Formasyon, tabanda gri, kirli sarı ve bej renkli, ince tabakalı, az karbonatlı şeyl ve silttaşı ile balık fosilli milttaşlarından oluşmakta; üste doğru ise sarımsı gri renkli, ince-orta tabakalı, orta-iri taneli ve yer yer sıkı bağlı kumtaşları ile yeşilimsi gri, masif görümlü kilttaşlarına geçiş yapmaktadır. Batı kesimlerde konkresyonlar ve linyit bantları gözlenirken, metamorfik temele yakın kesimlerde kömür bantları, taban seviyelerinde ise düşey konumlu manganez seviyeleri ve manganezli kumtaşları bulunmaktadır.

Son olarak, bölgede hâkim birim konumundaki Trakya Formasyonu [40] genellikle tabakalı bir yapı sergileyen kilttaşı ve kumtaşı istifinden oluşmakta olup, sahada gözlenen faylar ve sıkışma zonları nedeniyle birim içerisinde ezilmiş, çatlaklı ve kıvrımlı yapılar yaygın olarak karşılaşılan jeolojik unsurlar arasında yer almaktadır.

3. SAHA ÇALIŞMALARINI KAYNAKLI VERİ SETİ

3.1. Patlatma Tasarım Parametreleri

Bu çalışmada, birincil veri setindeki parametrelerin yüksek değişkenliğini kontrol altına almak ve sıkılama malzemesinin etkisini daha belirgin bir şekilde ortaya koymak amacıyla bölge temelli bir istatistiksel yöntem benimsenmiştir. Bu kapsamda, atım bölgesi; sol, sağ ve gerektiğinde orta bölge olmak üzere, kritik patlatma parametreleri için belirlenen eşik değerlere göre iki veya üç bölgeye ayrılarak ayrı ayrı analiz edilmiştir (Şekil 2). Bu doğrultuda, 19 atım istatistiksel olarak daha güvenilir 43 veri grubuna ayrılarak analiz edilmiştir. Bu ikincil işlem, parametrelerdeki standart sapma değerlerini önemli ölçüde azaltmış ve sıkılama malzemesi ile performans parametreleri arasındaki nedensel ilişkilerin belirlenmesini kolaylaştırmıştır.



Şekil 2. Bölge temelli analiz için atım paterninin şematik gösterimi [31]

Araştırmada 89, 102 ve 127 mm çaplarındaki delikler kullanılmıştır. Delik dizaynı incelendiğinde; dilim kalınlığının 1,5–4,6 m (ortalama $2,82 \pm 0,72$ m), delik aralığının 2,2–4,1 m (ortalama $3,24 \pm 0,45$ m), basamak yüksekliğinin 4–12 m (ortalama $8,52 \pm 2,31$ m) ve delik boyunun ise 4–13 m (ortalama $9,24 \pm$

2,15 m) aralıklarında değiştiği tespit edilmiştir. Özgül şarj değerleri 0,23–0,76 kg/m³ (ortalama 0,45 ± 0,13 kg/m³), özgül delme değerleri ise 0,06–0,25 m/m³ (ortalama 0,11 ± 0,05 m/m³) aralığında dağılım göstermiştir.

Sıkılama boyutunun tek başına yeterli bir gösterge olmaması nedeniyle, delik boyu ile ilişkili olarak değerlendirilmesi amacıyla "sıkılama oranı" parametresi tanımlanmıştır. Bu parametre, farklı delik boylarındaki sıkılama uygulamalarının ortak bir temelde karşılaştırılabilmesine olanak sağlamıştır. Sıkılama oranının artması, delik ağzından yüksek sıcaklık ve basınçtaki gaz kaçağının azalması anlamına gelmektedir. Çalışma kapsamında sıkılama oranı %17–36 aralığında değişmektedir.

Çizelge 2. Patlatma tasarım parametrelerinin temsili bir bölümü [31,32]

Saha atum		1		3		6		8		9				
		2		5		10		12		15				
Bölge	Sol	Orta	Sağ	Sol	Orta	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Orta	Sağ	Sol	Orta	Sağ
d (mm)	89	89	89	89	89	89	89	89	102	102	102	127	127	127
n (adet)	20	20	20	44	64	40	25	20	35	40	40	62	46	32
B (m)	3.4	4.6	3.8	1.8	1.7	1.9	1.5	1.6	1.9	1.6	1.8	3.2	3.5	3.2
S (m)	3.2	3.1	2.5	3	3.2	3.5	2.5	2.9	4.1	3.6	3.5	3.7	3.6	3.4
K (m)	9	9	9	4	4	4	4	4	9	9	9	10	10	10
U (m)	0.5	0.5	0.5	0	0	0	5	5	1	1	1	1	1	1
H (m)	9.5	9.5	9.5	4	4	4	9	9	10	10	10	11	11	11
S.M.*	T*	T*	T*	T*	T*	T*	K*	K*	T*	T*	T*	K*	K*	K*
h _o (m)	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3
h (m)	7.5	7.5	7.5	3	3	3	6	6	7	7	7	8	8	8
h _o /H (%)	0.21	0.21	0.21	0.25	0.25	0.25	0.33	0.33	0.30	0.30	0.30	0.27	0.27	0.27
P.M.*	A*	A*	A*	A*	A*	A*	E*	E*	A*	A*	A*	A*	A*	A*
VoD (m/sn)	4905	4905	4905	4905	4905	4905	4750	4750	4905	4905	4905	4830	4830	4830
I _b (kg/m)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	7.8	7.8	6.5	6.5	6.5	10.1	10.1	10.1
Q (kg)	38.3	38.3	38.3	15.9	15.9	15.9	94.3	94.3	46.7	46.7	46.7	82	82	82
W (kg)	153.2	153.2	153.2	47.8	47.8	47.8	377.1	377.1	46.7	46.7	46.7	164.1	164.1	164.1
b (m/m ³)	0.1	0.07	0.11	0.19	0.18	0.1	0.14	0.12	0.08	0.09	0.1	0.06	0.06	0.08
Q (kg/m ³)	0.42	0.39	0.45	0.35	0.39	0.31	0.61	0.58	0.38	0.4	0.46	0.51	0.51	0.55

d: Delik çapı, n: Delik adedi, B: Dilim kalınlığı, S: Delik aralığı, K: Basamak yüksekliği, U: Dip delgi, H: Delik boyu, h_o: Sıkılama boyu, h: Şarj boyu, h_o/H: Sıkılama oranı, VoD: Patlayıcı maddenin detonasyon hızı, I_b: Şarj konsantrasyonu (Bir metre delikteki patlayıcı madde miktarı), Q: Bir delikteki patlayıcı madde miktarı, W: Gecikme başına düşen en yüksek patlayıcı madde miktarı, b: Özgül delme, q: Özgül şarj

* S.M.: Sıkılama malzemesi, P.M.: Patlayıcı madde, T: Taş tozu, K: Taş tozu-Mıncır karışımı, A: ANFO, E: Emülsiyon

3.2. Patlatma Kaynaklı Titreşim ve Hava Şoku Ölçümü

Çalışmada, farklı sıkılama malzemelerinin çevresel titreşim düzeyleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, 19 atımdan kaydedilen 32 titreşim olayına ait veriler analiz edilmiştir. Analizlerde parçacık hızı bileşenleri, oluşum frekansları ve hava şoku değerleri (Çizelge 3) dikkate alınmıştır.

Titreşim büyüklüğünü normalize etmek ve tahmin modeli oluşturmak için ölçekli mesafe (SD) parametresi kullanılmıştır.

$$(\text{Titreşim için}) SD = \frac{R(m)}{\sqrt{W(kg)}} \quad (1)$$

$$(\text{Hava Şoku için}) SD = \frac{R(m)}{\sqrt[3]{W(kg)}} \quad (2)$$

Maksimum parçacık hızı ile ölçekli mesafe arasındaki ilişki, literatürde yaygın kabul gören üstel azalış modeli ile tanımlanmıştır.

$$PPV \left(\frac{mm}{sn} \right) = k \times SD^{-\beta} \quad (3)$$

Bu denklemde k ve β sahaya özgü sabitler olup, sismik enerji iletim özelliklerini ve zeminin sönümleme karakteristiğini temsil eder.

Çizelge 3'teki ham veriler incelendiğinde, her iki malzeme için de PPV, frekans ve hava şoku değerlerinin geniş bir aralıkta dağıldığı görülmektedir. PPV değerleri taş tozu için 1.143 mm/sn ile 45.57 mm/sn arasında değişirken, taş tozu-mıdır karışımı için 0.635 mm/sn ile 50.9 mm/sn arasındadır; ancak taş tozu-mıdır karışımı kullanılan Atım No 8'de ölçülen 50.9 mm/sn PPV değeri istisnai olarak yüksektir. Frekans değerleri taş tozu için 11.4 Hz ile 68.1 Hz, taş tozu-mıdır karışımı için ise 5.63 Hz ile 89.9 Hz aralığındadır. Hava şoku seviyeleri taş tozu için 112.8 dBL ile 137.8 dBL, taş tozu-mıdır karışımı için ise 88.0 dBL ile 134.1 dBL arasında ölçülmüştür.

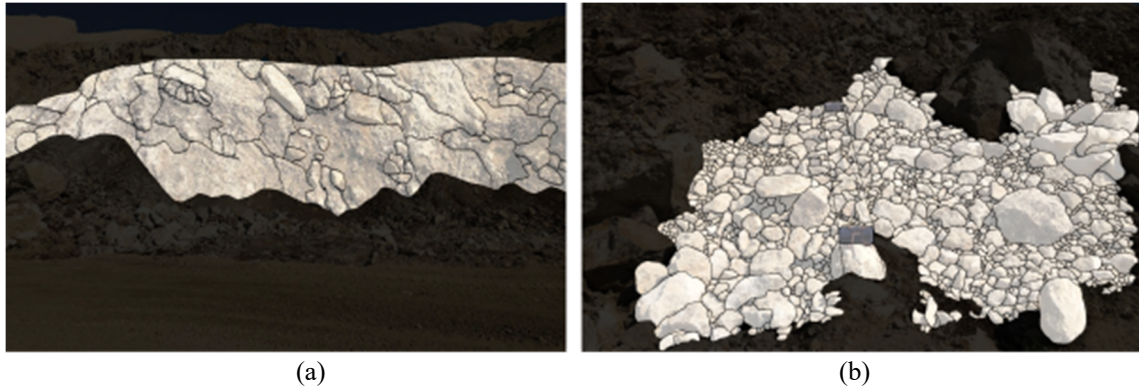
Çizelge 3. Patlatma kaynaklı titreşim ve hava şoku değerlerinin temsili bir bölümü [31]

Çalışma sahası	Atım	PPV (mm/s)	f (Hz)	AoP (dBL)	R (m)	$SD = R/\sqrt{W}$	$SD = R/\sqrt[3]{W}$
1	2	5.72	27.61	142.1	135.03	25.23	25.23
		27.8	46.5	142.3	75.77	14.16	14.16
3	5	1.143	42.67	114.3	300.73	93.90	93.90
		6.32	47.2	143.8	58.64	18.31	18.31
6	10	1.27	24.38	123.6	392.02	68.13	68.13
		2.794	17.07	130.9	268.9	46.73	46.73
8	12	17.1	89.9	132.0	83.36	14.49	14.49
		0.889	24.38	112.8	454.89	126.28	126.28
9	15	45.57	46.55	145.6	35.39	9.82	9.82
		2.286	17.66	108.0	381.61	70.00	70.00

PPV: Maksimum parçacık hızı, f: Frekans, AoP: Hava şoku, R: Ölçüm mesafesi, SD: Ölçekli mesafe, W: Gecikme başına düşen maksimum şarj miktarı

3.3. Kaya Parçalanma Performansı

Parçalanma performansının değerlendirilmesi için, orijinal çalışmalarda [32] fotogrametri yöntemiyle elde edilmiş veriler kullanılmıştır. Bu veri seti, basamak aynalarının ve yığınların temsili kesitlerine ait fotoğraflar üzerinde dijital görüntü işleme teknikleri uygulanması sırasında Split Engineering'in Split Desktop v2.0 programı kullanılarak analiz edilmesi sonucunda belirlenmiş patlatma öncesi yerinde blok boyutlarını (D_{20} , D_{50} , D_{80} , D_{100}) ve patlatma sonrası tane boyutları (P_{20} , P_{50} , P_{80} , P_{100}) içermektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Dijital görüntü işleme yöntemi ile (a) Basamak aynasındaki blok boyutu dağılımının belirlenmesi, (b) Patlatma sonrası oluşan yığının parça boyutu dağılımının belirlenmesi [32]

Parçalanma performansı, kaya boyutu küçültme oranı (F) kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu oran, patlatma sonrası ortalama tane boyutu (P_{50}) ve patlatma öncesi ortalama blok boyutu (D_{50}) ile ilişkili olarak tanımlanmıştır (Eşitlik 4). Daha yüksek kaya boyutu küçültme oranı (F), artırılmış parçalanma performansını işaret etmektedir.

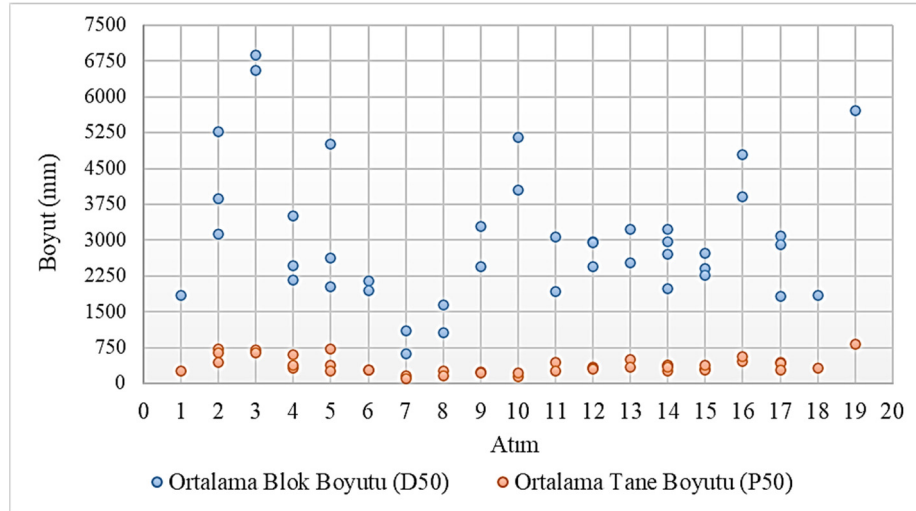
$$F (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{P_{50} (\text{mm})}{D_{50} (\text{mm})}\right) \quad (4)$$

Çalışmada elde edilen tüm parçalanma verileri sunulamayacağından, Çizelge 4'te temsili bir veri seti oluşturulmuştur. Bu çizelge, her bir atım için ölçülen parametrelerin ortalama değerlerini içermektedir. Bununla birlikte, her atıma özgü ayrıntılı sonuçlar şekillerde sunulmuştur: Şekil 4, fotogrametri ve dijital

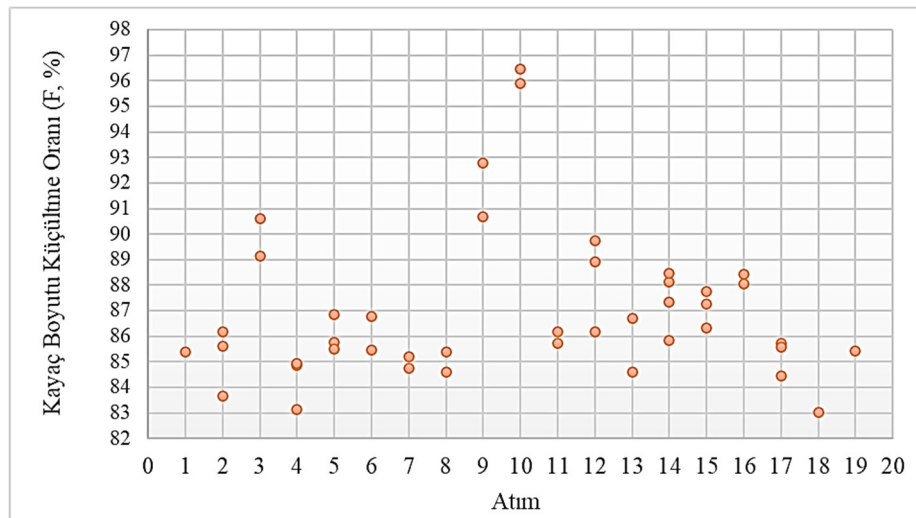
görüntü işleme ile belirlenen ortalama blok (D_{50}) ve tane (P_{50}) boyutlarını; Şekil 5 ise Eşitlik 4'den hesaplanan kaya boyutu küçültme oranlarını göstermektedir.

Çizelge 4. Fotogrametri ve dijital görüntü işleme yöntemi ile belirlenen ortalama blok ve tane boyutu verilerinin temsili bir bölümü [32]

Çalışma sahası	Atım	Bölge	D_{20} (mm)	D_{50} (mm)	D_{80} (mm)	D_{100} (mm)	P_{20} (mm)	P_{50} (mm)	P_{80} (mm)	P_{100} (mm)	F (%)
1	2	Sol	3170	5269	9012	11761	358	729	1204	1800	86.17
		Orta	2389	3875	5476	8445	341	634	955	1442	83.65
		Sağ	2014	3125	5344	6295	218	450	1157	1625	85.60
3	5	Sol	1814	2634	4383	5348	182	375	627	961	85.76
		Orta	1199	2032	3221	4379	161	267	389	633	86.84
		Sağ	3039	5017	7285	10475	453	728	1008	1457	85.49
6	10	Sol	2355	4043	5764	8511	90	143	209	330	96.47
		Sağ	3003	5143	7257	11054	118	212	367	644	95.88
8	12	Sol	1509	2452	3681	4952	205	339	545	892	86.19
		Orta	1921	2971	4902	6386	179	329	514	842	88.93
		Sağ	2105	2950	4376	6219	150	303	464	666	89.74
9	15	Sol	1840	2410	4066	5535	154	307	548	923	87.26
		Orta	1409	2256	3533	4639	154	276	421	717	87.75
		Sağ	1974	2732	4314	5804	184	373	577	814	86.33



Şekil 4. Farklı çalışma sahaları ve atımlar için patlatma öncesi ortalama blok boyutu (D_{50}) ve patlatma sonrası ortalama tane boyutu (P_{50}) dağılımı



Şekil 5. Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanan kaya boyutu küçültme oranları (F%)

Çalışma, tüm patlatmalarda %83.02 ile %96.47 arasında değişen ve ortalama %86.76 olan yüksek parçalanma değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, tutarlı bir şekilde etkili bir boyut küçültme sağlandığını, hatta bazı patlatmalarda neredeyse tamamen parçalanmaya (%96.47) yaklaşıldığını göstermektedir.

4. BULGULAR

4.1. Gaz Kaçağı Kontrolü ve Sıkılama Direnci

Araştırmaya konu olan 19 atımda kullanılan sıkılama malzemesi, sıkılama oranı ve gaz kaçağı ilişkisi incelendiğinde, her ne kadar gaz kaçağının tamamen önlemenin mümkün olmadığı bilinse de, kullanılan malzeme türü ve sıkılama oranına bağlı olarak kaçak miktarının önemli ölçüde kontrol altına alınabildiği görülmüştür.



Şekil 6. Patlatma sırasında (a) Atım 2'de, (b) Atım 6'da ve (c) Atım 12'de gözlemlenen delik ağzından gaz püskürmesi ile (d) Atım 4'te delik ağzından gaz kaçışının kontrol altına alınması



Şekil 7. Patlatma sırasında (a) Atım 7'de ve (b) Atım 8'de gözlemlenen delik ağzından gaz püskürmesi, (c) Atım 12'de ve (d) Atım 14'te delik ağzından gaz kaçışının kontrol altına alınması

4.2. Parçalanma Performansı ve Enerji Verimliliği

Verilerin karşılaştırmalı analizi, taş tozu-mıcır karışımının üstünlüğünün sadece genel bir eğilim olmadığını, aynı zamanda spesifik atım karşılaştırmalarında belirgin ve çarpıcı farklar şeklinde ortaya çıktığını göstermiştir.

Taş tozu-mıcır karışımının temel avantajı, patlayıcı enerjisini delik içinde etkin şekilde hapsetmesidir. Bu sayede aynı parçalanma düzeyine daha düşük özgül şarjla ulaşılabilir. Bu durum enerji verimliliği sağlamaktadır. Bu durum, Atım 1 ve Atım 2 karşılaştırmasında somut bir şekilde gözlemlenmektedir. Benzer kaya dayanımı (TEBD: 89.3 MPa) ve benzer delik çapına sahip olmalarına rağmen, taş tozu-mıcır karışımı kullanılan Atım 1'de özgül şarj 0.31 kg/m^3 iken, yalnızca taş tozu kullanılan Atım 2'de bu değer %35 daha yüksek olarak 0.42 kg/m^3 seviyesindedir. Buna karşın, küçültme oranları sırasıyla %85.38 ve %86.17 olarak ölçülmüş, kullanılan enerji miktarındaki bu belirgin farka rağmen parçalanma performansında yalnızca %0.79'luk marjinal bir fark oluşmuştur. Bu bulgu, taş tozu-mıcır karışımının patlayıcı enerjisini kaya kırma işleminde kullanma verimliliğinin önemli bir göstergesidir. Taş tozu ile sıkılamada ise benzer bir performans seviyesine ulaşmak için daha fazla özgül şarj kullanma gerekliliği doğmakta, bu durum ekonomik kayıpların yanı sıra artan iş yükü ve makine aşınması gibi problemleri de beraberinde getirmektedir.

Söz konusu enerji verimliliği, farklı koşullar altında gerçekleştirilen Atım 5 ve Atım 11 karşılaştırmasında da teyit edilmektedir. Taş tozu ile sıkılan Atım 5'te (TEBD=70.8 MPa, Özgül Şarj= 0.39 kg/m^3) küçültme oranı %86.84 olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, taş tozu-mıcır karışımı uygulanan Atım 11, hem daha yüksek kaya dayanımına (TEBD=75.7 MPa) hem de %25 daha yüksek özgül şarja (0.49 kg/m^3) rağmen,

benzer bir küçültme oranı (%86.16) elde etmiştir. Bu sonuç, taş tozu-mıcır karışımı, artan kaya mukavemeti gibi zorlu koşulları dengeleyebilme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Taş tozu-mıcır karışımı, özellikle düşük kaya direnci ile yüksek enerjili patlayıcıların bir arada bulunduğu durumlarda, performansı sinerjik bir şekilde artıran bir katalizör işlevi görmektedir. Bu etki, Atım 9 ve Atım 10'da belirgin olarak görülmektedir. Düşük dayanımlı kaya (TEBD=47.6 MPa) ve yüksek özgül şarj (0.52 kg/m^3) ile gerçekleştirilen ve taş tozu-mıcır karışımının kullanıldığı Atım 9'da, %92.80 gibi olağanüstü bir küçültme oranına ulaşılmıştır. Atım 10'da ise bu sinerji bir üst seviyeye taşınmış; daha düşük TEBD (42.5 MPa), daha yüksek enerjili bir patlayıcı (emülsiyon) ve çok yüksek özgül şarj (0.61 kg/m^3), taş tozu-mıcır karışımı ile birleşerek veri setindeki en yüksek küçültme oranı olan %96.47'yi üretmiştir. Kritik nokta, taş tozu-mıcır karışımının, yüksek detonasyon basıncına sahip patlayıcıların ürettiği aşırı gaz yükünü karşılayabilecek mekanik dayanım ve sızdırmazlığı sağlayan tek mekanizma olmasıdır. Geleneksel taş tozu kullanılması durumunda, bu yüksek enerjinin önemli bir kısmı sıkılama malzemesinin delikten fırlamasıyla heba olacak ve benzer bir performans elde edilemeyecektir.

Taş tozu-mıcır karışımı, yalnızca ideal senaryolarda değil, geniş bir parametre yelpazesinde daha tutarlı ve güçlü bir performans sergilemektedir. Örneğin, taş tozu ile sıkılan Atım 6'da, aynı TEBD (70.8 MPa) ve özgül şarj (0.36 kg/m^3) değerlerine rağmen küçültme oranları %85.46 ile %86.79 arasında değişkenlik göstermiştir. Buna karşın, taş tozu-mıcır karışımı uygulanan Atım 13-17 serisinde, 130 MPa gibi çok yüksek ve sabit bir TEBD değeri ile farklı özgül şarj ve sıkılama oranlarına rağmen, küçültme oranları oldukça dar ve tutarlı bir aralıkta (%84.5-88.5) kümelenmiştir. Bu karşılaştırma, taş tozu-mıcır karışımının kaya koşulları ve tasarım parametrelerindeki değişkenlere karşı daha dayanıklı olduğunu ve sonuçların daha öngörülebilir olduğunu kanıtlamaktadır.

Saha verilerinin detaylı analizi, taş tozu-mıcır karışımının iki temel üstünlüğünü ortaya koymaktadır. İlki enerji verimliliği olup, aynı parçalanma performansının daha düşük özgül şarj ile elde edilmesini sağlayarak, doğrudan patlayıcı maliyetlerinde tasarruf ve çevresel etkilerin azaltılmasına olanak tanır. İkincisi ise performans sinerjisi ve gürbüzlüktür. Özellikle düşük kaya dayanımı ile yüksek enerjili patlayıcıların birlikte kullanıldığı durumlarda olağanüstü yüksek küçültme oranlarına ulaşılmasını mümkün kılar. Aynı zamanda, değişken saha koşullarında daha tutarlı ve güvenilir bir performans sunar.

Ayrıca, taş tozu-mıcır karışımının mekanik mukavemeti ve geçirimsizliği, daha kısa sıkılama boylarında dahi yeterli enerji hapsedmesi sağlayabilmektedir. Veriler, taş tozu-mıcır karışımı kullanılan birçok atımda (örneğin Atım 1 ve Atım 9'da sırasıyla %0.28 ve %0.25 gibi düşük sıkılama oranları) yüksek performans elde edildiğini göstermektedir. Mühendislik perspektifinden bu durum, daha az malzeme kullanımıyla maliyet avantajı ve daha kısa deliklerde dahi operasyonel esneklik anlamına gelmektedir.

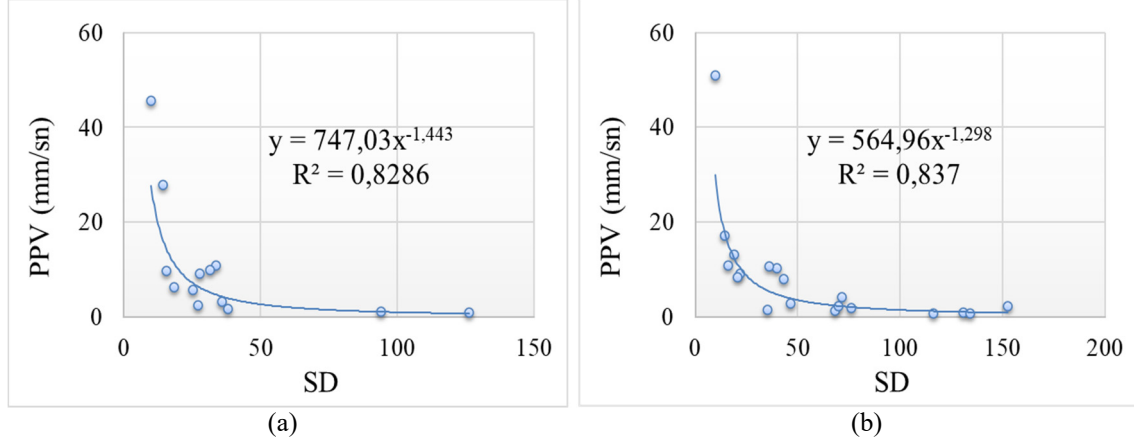
Sonuç olarak, önce mıcır ve ardından taş tozu ile boşluk doldurma prensibine dayalı taş tozu-mıcır karışımı, yalnızca taş tozu kullanımına kıyasla kaya küçültme oranı üzerinde belirgin bir üstünlüğe sahiptir. Bu üstünlüğün temel nedeni, taş tozu-mıcır karışımının ağırladığı üstün enerji hapsedme verimliliğidir. Mıcır iskeleti mekanik direnç sağlarken, taş tozu dolgu ise geçirimsizliği artırarak gaz kaçağını minimize etmekte ve böylece patlayıcı enerjisinin kaya kırma işinde kullanılma oranını maksimize etmektedir. Bu yöntem, özellikle yüksek performanslı patlayıcıların kullanıldığı, zorlu kaya koşullarının bulunduğu veya özgül şarjın optimize edilmeye çalışıldığı durumlarda vazgeçilmez bir tasarım bileşeni olarak değerlendirilmelidir.

4.3. Titreşim Yayılımı Üzerine Etkiler

Sıkılama malzemesinin parçalanma performansı üzerindeki etkisi incelendikten sonra, bir diğer kritik performans göstergesi olan patlatma kaynaklı titreşim etkileri analiz edilmiştir.

Saha özgün titreşim yayılımı trendini belirlemek ve parçacık hızını tahmin etmek amacıyla, gecikme başına düşen maksimum patlayıcı madde miktarı (W) ile ölçüm noktasına olan mesafenin (R) dikkate alındığı ölçekli mesafe ($SD=R/W^{0.5}$) parametresi kullanılmıştır. Kaydedilen maksimum parçacık hızları ile ölçekli mesafe değerleri arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş ve her bir sıkılama malzemesi (taş tozu ve taş tozu-mıcır karışımı) için ayrı ayrı olmak üzere, parçacık hızı tahmininde kullanılmak üzere iki farklı formül ve saha sabiti türetilmiştir (Şekil 8).

Bölgede titreşim ölçer kullanılmadığı durumlarda; taş tozu ile sıkılama yapılan herhangi bir atımdaki gecikme başına kullanılan belirli miktardaki bir patlayıcı maddenin yaratacağı titreşimin hızının belirli bir uzaklıktaki değerinin ne olacağını tahmin etmek için $PPV=747.93 \times SD^{-1.441}$ ($R^2=0.823$), taş tozu-mıcır karışımı ile sıkılama yapılan herhangi bir atım için ise $PPV=564.96 \times SD^{-1.298}$ ($R^2=0.837$) formülleri kullanılabilir.



Şekil 8. (a) Taş tozu ile **(b)** Taş tozu-mıcır karışımı ile sıkılama yapılan atımlarda kaydedilen maksimum parçacık boyutu (PPV, mm/sn) ile ölçekli mesafe (SD) ilişkisi

Elde edilen regresyon modelleri, sıkılama malzemesinin maksimum parçacık hızı-ölçekli mesafe ilişkisi üzerinde belirgin ve mesafeye bağlı bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Taş tozu için türetilen denklemdeki daha yüksek k sabiti (747.93), taş tozu-mıcır karışımınıninkine (564.96) kıyasla, genel olarak aynı ölçekli mesafe değeri için daha yüksek titreşim seviyeleri üretildiğini işaret etmektedir. Ancak, bu ilişkinin dinamik doğası, mesafe aralığına göre değişkenlik göstermektedir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Farklı sıkılama malzemelerinin titreşim değerlerine mesafe ile etkisi.

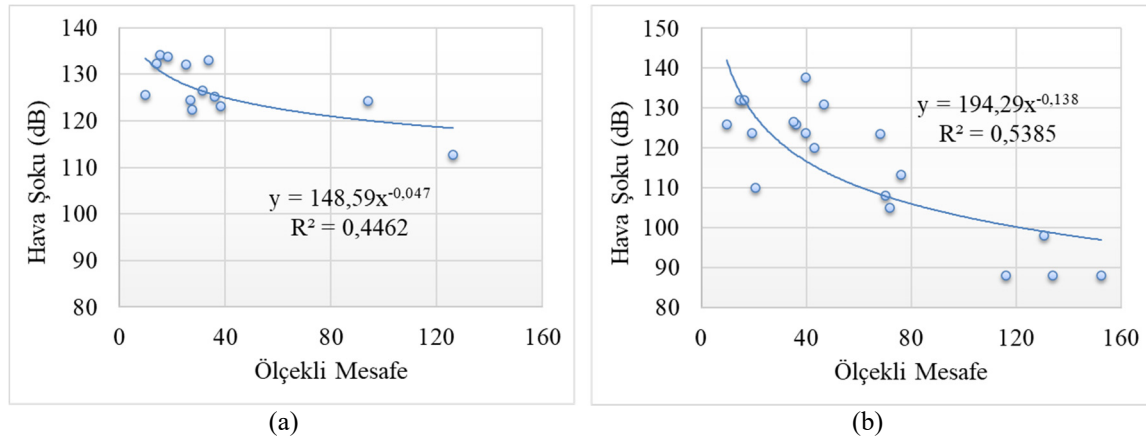
R (m)	W (kg)	Sıkılama malzemesi		W (kg)	Sıkılama malzemesi		W (kg)	Sıkılama malzemesi	
		Taş tozu	Karışım		Taş tozu	Karışım		Taş tozu	Karışım
10		350.25	285.84	453.05	360.29		747.03	564.96	
20		128.82	116.25	166.63	146.53		274.76	229.76	
30		71.76	68.68	92.82	86.57		153.06	135.74	
40		47.38	47.28	61.29	59.59		101.06	93.44	
50		34.34	35.39	44.42	44.61		73.24	69.94	
60		26.39	27.93	34.14	35.21		56.29	55.20	
70	35	21.13	22.87	27.33	28.82	50	45.07	45.19	100
80		17.43	19.23	22.54	24.23		37.17	38.00	
90		14.70	16.50	19.02	20.80		31.36	32.61	
100		12.63	14.39	16.34	18.14		26.94	28.45	
200		4.65	5.85	6.01	7.38		9.91	11.57	
300		2.59	3.46	2.59	3.46		5.52	6.83	
400		1.71	2.38	1.71	2.38		3.64	4.70	
500		1.24	1.78	1.24	1.78		2.64	3.52	

Yapılan analizler, yaklaşık 60-70 metreye kadar olan nispeten yakın mesafelerde, aynı ölçekli mesafe için taş tozu ile sıkılamanın, taş tozu-mıcır karışımına göre daha yüksek maksimum parçacık hızı değerlerine neden olduğunu açıkça göstermiştir. Bu durum, taş tozunun sahip olduğu yüksek k sabitinin, yakın mesafelerdeki titreşim tepkisine baskın şekilde hâkim olmasıyla açıklanabilir. Bununla birlikte, daha yüksek mesafelerde (yaklaşık 70 metrenin üzeri ve dolayısıyla daha yüksek ölçekli mesafe değerleri) bu ilişki tersine dönmekte ve aynı ölçekli mesafe değeri için taş tozu-mıcır karışımı ile yapılan sıkılama, taş tozundan daha yüksek maksimum parçacık hızı tahminleri üretmektedir. Bu davranış, taş tozuna ait daha yüksek β üssünün (-1.441) bir sonucudur. Daha dik olan β eğimi, taş tozunun neden olduğu titreşim şiddetinin mesafe ile çok daha hızlı azalmasına yol açarken; taş tozu-mıcır karışımının daha sığ eğime sahip β üssü (-1.298), titreşimdeki azalma hızının daha düşük olmasına ve belirli bir ölçekli mesafe eşliğinden sonra taş tozu-mıcır karışımının mutlak maksimum parçacık hızı değerinin taş tozunu geçmesine neden olmaktadır.

Bu davranış farklılığı, sıkılamanın temel işlevi düşünüldüğünde anlaşılabilir: yüksek basınçlı patlayıcı gazları, kaya kırımı ve parçalanmayı sağlayacak süre boyunca delik içinde hapsedmek. Taş tozu-mıdır karışımı malzemesi, bu gazları taş tozuna kıyasla çok daha uzun süre ve etkin biçimde tutabilmektedir. Gazların daha uzun süre hapsedilmesi, patlatma enerjisinin delik ağzından atmosfere kaçarak hava şokuna dönüşen kısmını azaltırken, enerjinin çok daha büyük ve verimli bir bölümünün kaya içinde sismik enerjiye (titreşim) dönüşerek yayılmasına olanak tanır. Taş tozu-mıdır karışımının yüksek enerji verimliliği, titreşim enerjisinin uzak mesafelere daha etkin iletilmesini sağlar. Sonuç olarak, taş tozu-mıdır karışımı yakın mesafelerde titreşim kontrolünde daha etkili performans gösterirken, enerjinin kaya kırımına daha fazla kanallanması, titreşim enerjisinin daha verimli açığa çıkmasına ve dolayısıyla uzak mesafelerde ölçülen parçacık hızı değerlerinin taş tozuna kıyasla daha yüksek olmasıyla sonuçlanmaktadır.

4.4. Hava Şoku Davranışı

Hava şoku değerlerinin ölçekli mesafe ile ilişkisi incelendiğinde, her iki sıkılama malzemesi için de belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Her iki malzeme için de mesafe arttıkça hava şoku seviyelerinde genel bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu azalmanın eğilim sıkılama malzemesine göre farklılık göstermektedir. Taş tozu ile sıkılamada hava şokunun ölçekli mesafe ile daha hızlı azalma eğiliminde olduğu, buna karşılık taş tozu-mıdır karışımındaki azalma eğiminin daha yumuşak olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. (a) Taş tozu ile (b) Taş tozu-mıdır karışımı ile sıkılama yapılan atımlarda kaydedilen hava şoku (AoP, dB) ile ölçekli mesafe (SD) ilişkisi

Regresyon analizleri önemli bir bulgu ortaya koymuştur: Taş tozu-mıdır karışımı ile yapılan sıkılamada, hava şoku ile ölçekli mesafe arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı ($R^2 = 0.539$), taş tozu için olan değerden ($R^2 = 0.446$) belirgin şekilde daha yüksektir. Bu, taş tozu-mıdır karışımı kullanıldığında hava şoku değerlerinin ölçekli mesafe ile çok daha tutarlı ve öngörülebilir bir ilişki sergilediğini kanıtlamaktadır.

Ancak hava şokunun yayılım dinamikleri, titreşimden farklı olarak çok daha karmaşık bir yapı sergilemektedir. Hava şokunun şiddeti ve yayılımı, yalnızca ölçekli mesafenin bileşenleri olan mesafe ve patlayıcı şarj miktarı ile sınırlı kalmamakta; atmosferik basınç, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve yönü gibi meteorolojik koşulların yanı sıra, arazinin topoğrafik yapısı ve geometrisi gibi pek çok parametreden doğrudan etkilenmektedir. Bu çok değişkenli ve doğrusal olmayan ilişki ağı, hava şokunun titreşime kıyasla modellenmesi ve tahmin edilmesini oldukça güçleştirmektedir. Her iki malzeme için de hava şoku ile ölçekli mesafe arasında gözlemlenen nispeten düşük korelasyon katsayılarının temel nedeni de bu çok faktörlü ve dinamik doğada yatmaktadır. Buna rağmen, taş tozu-mıdır karışımının daha yüksek korelasyon değeri, bu malzemenin hava şoku üzerindeki kontrol edilebilirliğinin daha iyi olduğuna işaret etmektedir. Taş tozu ile sıkılamada düşük ölçekli mesafe değerlerinde (9.82-38.17 aralığı) hava şoku seviyeleri 122.4-134.1 dBL gibi nispeten yüksek değerlerde seyrederken, taş tozu-mıdır karışımı kullanılan atımlarda aynı ölçekli mesafe aralığında hava şoku seviyelerinin 123.6-137.8 dBL arasında değiştiği, ancak daha geniş bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

Yüksek ölçekli mesafe değerlerinde (70 ve üzeri) her iki malzeme için de hava şoku seviyelerinde belirgin düşüşler kaydedilmiştir. Taş tozu-mıdır karışımı kullanılan atımlarda bu düşüşün daha belirgin olduğu,

ölçekli mesafe > 100 değerlerinde hava şoku seviyelerinin 88.0-113.4 dBL aralığına kadar indiği görülmüştür. Buna karşılık, taş tozu ile sıkılamada yüksek ölçekli mesafe değerlerinde (93.90-126.28) hava şoku seviyelerinin 112.8-124.3 dBL aralığında kaldığı gözlemlenmiştir.

Bu davranış farklılığının temel nedeni, sıkılama malzemesinin gaz sızdırmazlık özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Taş tozu-mıcır karışımının daha yüksek yoğunluk ve kohezyona sahip olması, patlayıcı gazların delik içerisinde daha uzun süre hapsedilmesini sağlamakta, böylece enerjinin büyük bölümü kaya kırımında kullanılmakta ve atmosfere kaçarak hava şokuna dönüşen enerji miktarı azalmaktadır. Taş tozuun gözenekli yapısı ise gaz sızıntısına daha elverişli olup, enerjinin önemli bir bölümünün delik ağzından atmosfere kaçmasına ve dolayısıyla daha yüksek hava şoku seviyelerine yol açmaktadır.

Özellikle düşük ölçekli mesafe değerlerinde taş tozu-mıcır karışımının sağladığı hava şoku azaltım avantajının daha belirgin olduğu, yüksek ölçekli mesafe değerlerinde ise her iki malzeme için de hava şoku seviyelerinin düştüğü, ancak taş tozu-mıcır karışımının mutlak değerlerdeki avantajını koruduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmanın bulguları, taş tozu-mıcır karışımının, taş tozuna kıyasla sıkılama malzemesi olarak belirgin bir üstünlüğe sahip olduğunu göstermiştir. Trakya bölgesindeki 10 farklı ocaktan elde edilen verilerin ikincil analizi, karışımın gaz sızdırmazlık ve enerji hapsedme verimliliğinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın kapsamı ve ulaşılan bulguların geçerliliği, araştırılan parametrelerin belirli aralıkları ile sınırlandırılmıştır. İncelenen veri aralıkları, Langefors ve Kihlström [41], Olofsson [42] ve Jimeno ve arkadaşları [43] gibi alanında otorite kabul edilen kaynakların önerdiği patlatma kılavuzlarıyla uyum içerisindedir. Arazi çalışmaları, başlıca kireçtaşı, kumtaşı ve marn birimlerinden oluşan formasyonlarda yürütülmüş olup, bu kayaların basınç dayanımı 37-186 MPa, yoğunlukları ise 2.44-2.60 t/m³ aralığında değişmektedir. Çalışmada 89, 102 ve 127 mm çaplarındaki delikler kullanılmış; dilim kalınlığı (1.5-4.6 m), delik aralığı (2.2-4.1 m), basamak yüksekliği (4-12 m) ve özgül şarj (0.23-0.76 kg/m³) parametreleri belirtilen aralıklarda değişkenlik göstermiştir. Sıkılama uygulaması ise %17-36 aralığında bir oranla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, yukarıda belirtilen tüm parametre aralıkları için geçerli olarak değerlendirilmelidir.

Bulgular, taş tozu-mıcır karışımının gaz sızdırmazlık ve enerji hapsedme açısından taş tozundan belirgin şekilde üstün olduğunu göstermiştir. Bu sayede aynı parçalanma performansı daha düşük özgül şarjla elde edilebilmiştir. Titreşim analizleri, yakın mesafelerde taş tozu-mıcır karışımının daha düşük parçacık hızları ürettiğini, ancak enerjinin kaya içinde daha verimli kullanılması nedeniyle uzak mesafelerde titreşim değerlerinin daha yavaş azaldığını ortaya koymuştur. Hava şoku değerlerinin ise taş tozu-mıcır karışımı kullanıldığında ölçekli mesafe ile daha tutarlı ve öngörülebilir bir ilişki sergilediği belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular ışığında, optimum patlatma verimliliği, düşük maliyet ve minimize edilmiş çevresel etki hedefleri doğrultusunda, sıkılama uygulamasında taş tozu-mıcır karışımının standart bir prosedür olarak benimsenmesi önerilmektedir.

Gelecek çalışmalar için, bu çalışmanın bulgularını daha da genellemek amacıyla, farklı kaya türlerinde, daha geniş bir veri yelpazesi üzerinde çalışılması önerilir. Ayrıca, optimal taş tozu-mıcır karışım oranlarının belirlenmesine yönelik detaylı araştırmalar yapılabilir. Hava şoku modellemesini iyileştirmek için meteorolojik ve topoğrafik faktörlerin daha detaylı dikkate alındığı, daha geniş bir veri seti üzerinden ileri istatistiksel modellemelerin yapılması faydalı olacaktır.

6. TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın saha çalışmaları, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından finansal olarak desteklenmiştir.

Yazar, bu araştırmanın gerçekleştirilmesinde sağladığı finansal destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) içten şükranlarını sunar. Çalışmanın saha aşamasındaki değerli katkılar

için ayrıca; Ento Maden İnşaat Sanayi & Ticaret Ltd. Şti.'nden Sayın Abdulkadir ARSLAN'a saha çalışmalarındaki desteği için, Tessan Maden İnşaat Sanayi Turizm Ve Ticaret Anonim Şirketi'nden Sayın Hilal Erem MUTLU ve Erdemir Maden Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den Sayın Taki Can ODABAŞI'na saha çalışmaları ve verilerin birincil değerlendirilmesindeki özverili katılımları için, NITRONET Patlayıcı Madde Ticaret Ltd. Şti. Trakya Bölge Sorumlusu Sayın Ünal GÜNDÜZ ve Nobel Patlayıcı Sanayi A.Ş. Marmara Bölge Sorumlu Yardımcısı Sayın Cevdet Burkay ZAİF'e ise çalışma sahalarına erişim ve gerekli izinlerin sağlanmasındaki destekleri için müteşekkirdir.

7. KAYNAKLAR

1. Kalaycı Şahinoğlu, Ü. (2024). Patlatma sonucu meydana gelen hava şoku ve partikül madde yayılımı arasındaki ilişkinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 831-837.
2. Kadem, B. ve Karadoğan, A. (2025). Basamak patlatma tasarımı ve analizi yapabilen bir mobil uygulama yazılımının geliştirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(3), 725-741.
3. Shi, X., Zhang, Z., Qiu, X. & Luo, Z. (2023). Experiment study of stemming length and stemming material impact on rock fragmentation and dynamic strain. *Sustainability*, 15, 13024.
4. Peng, J., Zhang, F., Du, C. & Yang, X. (2020). Effects of confining pressure on crater blasting in rock-like materials under electric explosion load. *International Journal of Impact Engineering*, 139, 103534.
5. Sanchidrián, J.A., Segarra, P. & López, L.M. (2007). Energy components in rock blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 130-147.
6. Ouchterlony, F., Nyberg, U., Olsson, M., Bergqvist, I., Granlund, L. & Grind, H. (2004). Where does the explosive energy in rock blasting rounds go? *Science and Technology of Energetic Materials*, 65, 53-64.
7. Cevizci, H. (2010). Açık ocak patlatmalarında sıkılama parametresinin patlatma verimliliğine etkisi. *Yüksek lisans tezi*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
8. Boshoff, D. & Webber-Youngman, R.C.W. (2011). Testing stemming performance, possible or not? *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 111, 871-874.
9. Snelling, W. & Hall, C. (1912). The effects of stemming on the efficiency of explosives. *USBM-TP*, 17, 1-20.
10. Choudhary, B.S. & Agrawal, A. (2022). Minimization of blast-induced hazards and efficient utilization of blast energy by implementing a novel stemming plug system for eco-friendly blasting in open pit mines. *Natural Resources Research*, 31, 3393-3410.
11. Sari, M., Ghasemi, E. & Ataei, M. (2014). Stochastic modeling approach for the evaluation of backbreak due to blasting operations in open pit mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 771-783.
12. Zhang, Z., Hou, D., Guo, Z. & He, Z. (2020). Laboratory experiment of stemming impact on rock fragmentation by a high explosive. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103257.
13. Fourney, W.L., Barker, D.B. & Holloway, D.C. (1981). Model studies of explosive well stimulation techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18, 113-127.
14. Choudhary, B.S. & Rai, P. (2013). Stemming plug and its effect on fragmentation and muckpile shape parameters. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 4, 296-311.
15. Prasad, S., Choudhary, B.S. & Mishra, A.K. (2017). Effect of stemming to burden ratio and powder factor on blast induced rock fragmentation-A case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 225, 012191.
16. Shahrin, M.I., Abdullah, R.A., Jeon, S., Jeon, B., Sa'ari, R. & Alel, M.N.A. (2019). Numerical simulation on the effect of stemming to burden ratio on rock fragmentation by blasting. In *Proceedings of the International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future*, Okinawa, Japan, 1-4.
17. Chen, M., Ye, Z., Wei, D., Lu, W. & Yan, P. (2021). The movement process and length optimization of deep-hole blasting stemming structure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 146, 104836.
18. Cevizci, H. & Özkahraman, H.T. (2012). The effect of blast hole stemming length to rockpile fragmentation at limestone quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53, 32-35.
19. Mpofu, M., Ngobese, S., Maphalala, B., Roberts, D. & Khan, S. (2021). The influence of stemming practice on ground vibration and air blast. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121, 1-10.

20. Oates, T.E. & Spiteri, W. (2021). Stemming and best practice in the mining industry: A literature review. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121, 1-11.
21. Cevizci, H. (2012). A newly developed plaster stemming method for blasting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(8), 1071-1078.
22. Kojovic, T. (2005). Influence of aggregate stemming in blasting on the SAG mill performance. *Minerals Engineering*, 18, 1398-1404.
23. Cevizci, H. (2013). A new stemming application for blasting: A case study. *Rem: Revista Escola de Minas*, 66(4), 513-519.
24. Cevizci, H. (2014). Fragmentation, cost and environmental effects of plaster stemming method for blasting at a basalt quarry. *Archives of Mining Sciences*, 59, 835-846.
25. Cevizci, H. (2019). Comparison of the efficiency of plaster stemming and drill cuttings stemming by numerical simulation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119, 465-470.
26. Cevizci, H. & Sürücüoğlu, H. (2021). Alçı sıkılama yöntemi için arazide uygulama kolaylığının araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 36-43.
27. Sharma, S.K. & Rai, P. (2015). Investigation of crushed aggregate as stemming material in bench blasting: A case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 1449-1463.
28. Zhang, Z., Qiao, Y., Chi, L. & Hou, D. (2021). Experimental study of rock fragmentation under different stemming conditions in model blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 143, 104797.
29. Zhang, Z. (2016). *Rock fracture and blasting: Theory and applications*. Butterworth-Heinemann/Elsevier, Oxford, UK.
30. Zhang, Z., Gong, F., Kozlovskaya, E. & Aladejare, A. (2023). Characteristic impedance and its applications to rock and mining engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56, 3139-3158.
31. Arslan, A., Mutlu, H.E., Odabaşı, T.C. ve Özyurt, M.C. (2024). *Trakya Bölgesinde gerçekleştirilen patlatmalı kazı çalışmalarının verimlilik açısından değerlendirilmesi*. TÜBİTAK 2209A Projesi.
32. Özyurt, M.C., Karadogan, A., Kalayci Sahinoglu, U., Ozer, U., Mutlu, H.E. & Odabasi, T.C. (2025). Establishment of a novel fragmentation prediction model incorporating rock's response time to blasting. *Applied Sciences*, 15, 9447.
33. Yurtsever, A. (1996). *1/200.000 scale exploratory Thrace geological map promotion report*. MTA Genel Müdürlüğü, İstanbul.
34. Guler, O. & İskân, B. (2021). *Kırklareli province – Vize district – Evrencik village, TRAÇİM Çimento San. ve Tic. A.Ş. Vize Cement Factory geological and hydrogeological research of mining license areas (IR 64145, IR 20062296, IR 20062297, IR 20062298) and their surroundings* (Teknik Rapor).
35. Keskin, C. (1971). Geology of the Pınarhisar area. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 14(1), 31-83.
36. Uçankuş, T., Koyuncu, F.T., Göveli, A., Büyüktanir, S.A., Taştan, F. ve Dursun, K. (2014). *Limak Batı Çimento San. ve Tic. A.Ş. kalker ocağı, ruhsat no: 200901722, nihai ÇED raporu*. Ankatek Çevre Mad. Mühendislik Ltd. Şti., Ankara.
37. Atalık, E. (1987). *Thrace Basin Soğucak Formation sedimentary environments and microfacies analysis* (Yayımlanmamış teknik rapor No: 2305). TPAO Arama Grubu Arşivi.
38. Atalık, E. (1992). Depositional systems of the Osmancık Formation in the Thrace basin. *Doktora tezi*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
39. Celikkurt, K.C. (2020). *The sedimentology of coal and uranium bearing sequences in the Saray and Vize area. Yüksek lisans tezi*. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
40. Uz, B. (2007). *Study and evaluation report of the geological/structural, mineralogical-petrographical and physico-mechanical properties of the crushed stone quarry of Akdağlar Madencilik A.Ş. located in Ayazağa Village Cendere Locality*. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
41. Langefors, U. & Kihlström, B. (1962). *The modern technique of rock blasting* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York.
42. Olofsson, S.O. (1988). *Applied explosives technology for construction and mining* (2nd ed.). Applex, Arla, Sweden.
43. Jimeno, C.L., Jimeno, E.L. & Carcedo, F.J.A. (1995). *Drilling and blasting of rock*. A.A. Balkema, Rotterdam.