



PATLATMALI KAZI ÇALIŞMALARINDA TİTREŞİM YAYILIM EŞİTLİKLERİNİN SAHA ÖLÇÜMLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI, BİR İNŞAAT PROJESİ ÖRNEĞİ

Tuğçe ÖNGEN^{1*}

¹Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, 35390, İzmir, Türkiye

Özet: Günümüzde kaya kütlelerinin parçalanarak taşınabilir duruma getirilmesinde mekanik kazının uzun süreler alması bu sebeple ekonomik olmaması, maruz kalınan gürültü süresinin artması, sert kayalarda kırıcı makinelerin parçalama başarısının düşük olması gibi sebeplerden dolayı patlayıcı maddeler ve patlatma teknolojisi kaçınılmaz olarak uygulanmaktadır. Madencilik faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılan patlatma teknolojisi aynı zamanda inşaat projelerinde temel kazısı ve alan düzeltme amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. İnşaat projelerinin çoğunlukla yerleşim yerlerine yakın alanlarda olması patlatmalı kazı çalışmalarının çevresel etkileri açısından problem yaratabilmektedir. Özellikle patlatma kaynaklı titreşimlerin Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'nde izin verilen titreşim seviyesi limit değerlerine göre, proje alanına yakın yapılar üzerindeki etkisi titreşim yayılım denklemleri kullanılarak değerlendirilmelidir. Bu amaçla Muğla ili, Bodrum ilçesinde bir inşaat projesi alanında gerçekleştirilen patlatmalı kazı çalışmalarının çevre binalara etkisini değerlendirebilmek amacıyla titreşim ölçümleri gerçekleştirilerek titreşim yayılma eşitliği oluşturulmuştur. Saha özelinde elde edilen yayılım eşitliği ile Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan Patlatma Tasarımları ve Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler Kılavuzu'nda patlatma türü olarak inşaat alanı için verilen eşitlikler kullanılarak titreşim hızı tahminleri yapılmış ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda inşaat alanlarında kılavuzda verilen tahmin modellerinin kullanılarak çevresel etki değerlendirmesi yapılmasının uygun olmadığı, mutlaka sahada titreşim ölçümleri gerçekleştirilerek saha özelinde bir titreşim yayılım eşitliği elde edilmesinin çevre yapıları olası bir zararı önlemek için gerekli olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Patlatmalı kazı, Titreşim, Çevresel etki, Tahmin modelleri

Comparison of Vibration Propagation Equations with Field Measurements in Blasting Excavation Works: A Construction Project Case Study

Abstract: Explosive materials and blasting technology are inevitably employed in the fragmentation of rock masses to make them transportable. Blasting technology, widely used in mining activities, is also frequently utilized in construction projects for foundation excavation and site leveling. The proximity of construction projects to residential areas often creates challenges regarding the environmental impacts of blasting operations. In particular, the effects of blast-induced vibrations on structures near the project site should be evaluated using vibration propagation equations, by the vibration level limits permitted by the Environmental Noise Control Regulation. For this purpose, blast-induced vibration measurements were conducted at a construction project site in Bodrum to assess the impact of blasting activities on nearby buildings, and a site-specific vibration propagation equation was established. Using the propagation equation obtained specifically for the site, vibration velocity predictions were made and comparatively presented based on the equations provided for construction site blasting in the "Blasting Designs and Environmental Effects of Blasting Guide" published by the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change. The study's results indicate that using the prediction models provided in the guide for environmental impact assessment at construction sites is inappropriate. Instead, conducting on-site vibration measurements to derive a site-specific vibration propagation equation is essential to prevent potential damage to nearby structures.

Keywords: Blasting excavation, Vibration, Environmental impact, Prediction models

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, 35390, İzmir, Türkiye

E mail: tugce.ongen@deu.edu.tr (T. ÖNGEN)

Tuğçe ÖNGEN  <https://orcid.org/0000-0001-9783-7330>

Gönderi: 24 Aralık 2024

Kabul: 22 Mart 2025

Yayınlanma: 15 Mayıs 2025

Received: December 24, 2024

Accepted: March 22, 2025

Published: May 15, 2025

Cite as: Ongen T. 2025. Comparison of vibration propagation equations with field measurements in blasting excavation works: a construction project case study. BSJ Eng Sci, 8(3): 729-737.

1. Giriş

Giderek artan nüfusla birlikte şehirlerde inşaat projeleri de sürekli olarak artmaktadır. Bu projeler kapsamında, konaklama alanlarının yanı sıra altyapı çalışmaları, çevre düzenlenmelerini kapsayan inşaat alanlarında kapsamlı kazı çalışmaları yapılması gerekmektedir. Günümüzde kayaç kazısı çalışmaları teknik ve ekonomik açıdan ele

alındığında iki sistem ile gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu amaçla yapılacak kazı çalışmalarında kullanılan yöntemler iki ana başlıkla incelenebilir. Bunlardan birincisi kazıcı-kırıcı makineler ile gerçekleştirilen mekanik kazı, ikincisi ise patlayıcı maddelerin kaya kütleleri içerisinde belirli sistemlemlerle yerleştirilerek infilak ettirilmesi ve ortaya çıkan enerjinin kayacı parçalaması esasına dayanan patlatmalı kazı



çalışmalarıdır. Yüksek dayanımlı kayalar için teknik ve ekonomik açıdan değerlendirme yapılırsa patlatmalı kazı yöntemi öne çıkmaktadır. Şehir içi büyük ölçekli inşaat ve diğer altyapı projelerinin hemen hemen tamamında kaya kütlelerinin taşınabilir boyuta indirilmesi patlayıcı madde kullanılarak ekonomik olmaktadır. Patlayıcı madde kullanılarak kazı yapılacak şehir içi projesinde ise patlatma tasarımı proje çevresindeki yapıların patlatma sonucu oluşacak titreşimden olumsuz etkilenmemesi gözetilerek gerçekleştirilmektedir (Karakuş vd, 2018). Patlatma işlemleri sonucu patlayıcı madde enerjisinin bir kısmı kayacı parçalamak için kullanılırken bir kısmı da kaya kütlelerinin içerisinde kaya kütle özelliklerine bağlı olarak titreşimler oluşturmaktadır. Diğer taraftan patlatmalar sonucu gürültü oluşumu, taş savrulması ve toz emisyonu da meydana gelmektedir. Patlatma işlerinin kaçınılmaz olarak yapıldığı kazı çalışmalarında gerekli emniyetli çalışma koşullarının sağlanmasına dikkat edilmesi, özellikle patlatma kaynaklı çevresel titreşim etkilerinin göz önüne alınarak gerekli teknik ve ekonomik şartların sağlanması gerekmektedir. Patlatma sonucu oluşan çevresel titreşim etkilerin ölçülmesi ve ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi amacıyla literatürde çok sayıda farklı yaklaşımlar mevcuttur. Genel bir

değerlendirmeye 1940'lı yıllardan sonra konuyla ilgili çalışmalar yoğunlaşarak devam etmiştir. Ayrıca çok sayıda araştırmacı tarafından farklı yaklaşım modelleri kullanılarak patlatma kaynaklı titreşimin çevre yapılarına etkisi değerlendirilmiştir (Külekçi vd., 2017; Zhang vd., 2021; Öngen vd., 2018; Parida ve Mishra, 2015; Roy, 1991; Kuzu, 2011; Khandelwal ve Singh, 2006; Duvall ve Fogelson, 1962; Khan vd., 2025; Yuan vd., 2025; Saptono vd., 2024). Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde patlatma sonucu oluşan sismik dalgaların meydana getirdiği parçacık hızları ve frekans, çevreye olumsuz etki yaratmadaki en etkili parametrelerdir (Öngen vd., 2015). Patlatmalar sonucu oluşan yer sarsıntılarının yapılar üzerindeki etkisiyle ilgili ülkemizdeki yasal mevzuat Çevre ve Şehircilik Bakanlığının 30.10.2022 tarihinde Resmi Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe giren 32029 sayılı Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği ile düzenlenmiştir (ÇŞB., 2022). Bu yönetmelikte verilen değerler maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda yapılan patlatmalı kazı çalışmaları sonucu oluşan titreşim seviyelerinin sahaya yakın yerüstü yapıları için verilen yasal sınır değerlerdir. Tablo 1'de frekansa bağlı sınır değerler verilmektedir.

Tablo 1. Çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi yönetmeliği maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlama nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapıda yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri (ÇŞB, 2022)

Yapı Tipi	Binaların Temelinde En Yüksek Titreşim Hızı, (mm/sn) (frekansa göre, f=Hz)			Tüm frekanslar için en üst katın döşemesinde (tabanında) ²
	f=1-10	f=10-50	f=50-100 ¹	
1 Endüstriyel binalar	20	40	50	40
2 Evler,tuğla ve beton gibi dayanıklı yapılar	5	15	20	15
3 Titreşime duyarlı olup 1. ve 2. maddenin dışında kala binalar, tarihi ve doğal yapılar ³	2	8	10	8

¹100 devir/sn büyük frekanslar için, büyük titreşim düzeyine izin verilebilir.

²Birden fazla katlı binalar için, ölçümlerin hem binaların temelinde ham de en üst katın döşemesinde alınması gerekebilir.

³Tarihi ve doğal yapılar için belirlenen bu sınır değerler, yerinde yapılacak hassas, kapsamlı titreşim ölçümleri ve bilimsek çalışmalar ile kısıtlanabilir.

Ancak, ilgili Yönetmelikte sınır değerler tanımlanmış olsa da, patlatmalar sonucu oluşan titreşim seviyelerinin değerlendirilmesi ve etkisinin belirlenmesi çok değişkenli bir problemdir. Çevresel titreşim seviyesinin oluşmasında ve denetiminde temel değişkenler gecikme başına kullanılan patlayıcı miktarı ve patlatma yapılan nokta ile incelenen yapı arasındaki mesafedir. Bunların dışında patlatma paterni ve titreşimin yayıldığı kaya kütlesi ortamının özellikleri titreşimin iletileceği mesafe açısından önemli diğer değişkenlerdir. Özellikle titreşimin yayıldığı kaya kütlesi ortamının sayısallaştırılması ancak titreşim açısından incelenen bölgede yapılacak titreşim ölçümlerinin geri analizi ile belirlenebilmektedir. Bu çerçevede bir bölgede patlatma kaynaklı titreşimin dinamik yükün seviyesinin belirlenebilmesi için öncelikle o bölgede ön araştırma patlatması sırasında, titreşim

ölçümleri yapılması, ölçüm sonuçlarının anlık patlayıcı miktarı, mesafe, patlatma paterni ve kaya kütle ortamının jeolojik özelliklerini içeren analiz metotları kullanarak ortaya koyulması gerekmektedir (Karakuş ve Öngen, 2022). Patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin araştırılması, karakterize edilmesi ve etki mesafelerinin belirlenmesi için mesafe, şarj, jeolojik yapı ve yer sarsıntıları arasındaki ilişkinin önemi ile birlikte patlatmanın yönü ile incelenen bölgenin konumu göz önüne alınmalıdır. Bu ilişki, parametrelerin tümü kullanılarak eşitlik 1 ile ifade edilir (Duvall ve Fogelson, 1962)

$$PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\beta} \quad (1)$$

Burada; PPV : Bileşke parçacık hızı (mm/sn)

R : Titreşim ölçüm mesafesi (m)

Q : Gecikme başına düşen patlayıcı miktarı

K : Arazi katsayısı

β : Arazi sönümlenme katsayısı

Bu denklemde $R/\sqrt{Q}$ elamanına “ölçekli mesafe” denir. Patlatmalar sonucu oluşan titreşim seviyesi ve titreşim karakteristiği çok değişken olmakla birlikte ortaya koyulması, arazi ile ilgili K ve β katsayılarının tahmini veya bir başka yoldan hesaplanabilmesi sürekli yapılan titreşim ölçümleri ile mümkündür. Kısaca farklı ölçekli mesafelerde (farklı şarj miktarı ve farklı mesafelerde) yapılan atımlardan parçacık hız değerleri ölçülerek analizler yapılmakta ve böylece arazi ile ilgili K ve β katsayıları bulunmaktadır. ABD’nde, şimdi lağvedilmiş olan Birleşik Devletler Maden Genel Müdürlüğü (USBM) ve halen faal olan Açık Ocak Madencilik Rehabilitasyon ve Denetim Ofisi (OSMRE) tarafından yapılan veya yaptırılan veya yararlanılan çok sayıda titreşim ölçüm sonuçlarının analizi sonucunda bazı madencilik türleri ve patlatma yapılan işkollarında geçerli, yer titreşimi tahmin formülleri üretilmiştir. (ÇŞB, 2018). Patlatmadan kaynaklanan titreşim hızlarının değerlendirilmesi aşamasında, K ve β katsayılarından yararlanabilmek amacıyla bu tahmin formüllerine Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ÇED İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü tarafından 2018 yılında yayımlanan “Patlatma Tasarımları ve Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler Kılavuzu”nda da yer verilmiştir (Tablo 1). İnşaat kazılarında patlatma kaynaklı titreşimlerin çevresel etkileri, özellikle yerleşim alanlarına yakın projelerde önemli bir mühendislik problemidir. Mevcut literatürde, saha özelinde yapılan ölçümlerin gerekliliğine yeterince vurgu yapılmadığı görülmektedir. Özellikle Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan kılavuzdaki tahmin modellerinin her inşaat sahası için geçerli olup olmadığı konusu detaylı olarak incelenmemiştir. Bu çalışmada, Bodrum ili Yalıkavak ilçesinde bir inşaat projesi alanında temel kazısı amacıyla gerçekleştirilen patlatmalı kazı çalışmalarının çevre binalara etkisini değerlendirebilmek amacıyla titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiş ve saha özelinde titreşim yayılma karakteristiğini sunan matematiksel eşitlik elde edilmiştir. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan Patlatma Tasarımları ve Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler Kılavuzu’nda patlatma türü olarak inşaat alanı için verilen eşitlikler kullanılarak titreşim hızı tahminleri yapılmış ve sahaya ait titreşim yayılım eşitliği ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda şehir içi inşaat alanlarında Tablo 1’de verilen tahmin modellerinin kullanılarak çevresel etki değerlendirmesi yapılması ve patlayıcı miktarı belirlemenin uygun olmadığı, mutlaka sahada deneme atımları gerçekleştirilerek titreşim ölçümleri alınması ve saha özelinde bir titreşim yayılım eşitliği elde edilmesinin çevre yapılarına olası bir zararı önlemek için gerekli olduğu görülmüştür. Çalışma, inşaat projelerinde yönetmelik eşitliklerinin doğrudan kullanılmasının çevresel etki değerlendirmelerinde yetersiz kalabileceğini

göstermesi açısından literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, mevcut çalışmaların eksikliklerini gidermeye yönelik olarak saha ölçümlerine dayalı, daha güvenilir ve proje özelinde uygulanabilir yaklaşımların geliştirilmesi gerektiği ortaya konmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Bu araştırma Muğla ili, Bodrum ilçesi, Yalıkavak Mahallesinde bulunan inşaat sahasında gerçekleştirilmiştir. İnşaat temel kazısı amacıyla gerçekleştirilecek patlatma çalışmalarının proje sahasına yakın yerleşim yerlerine (binalara) etkisinin belirlenebilmesi için sahanın ve yerleşim birimlerinin bulunduğu bölgenin konumu ortaya konulmuştur (şekil 1).



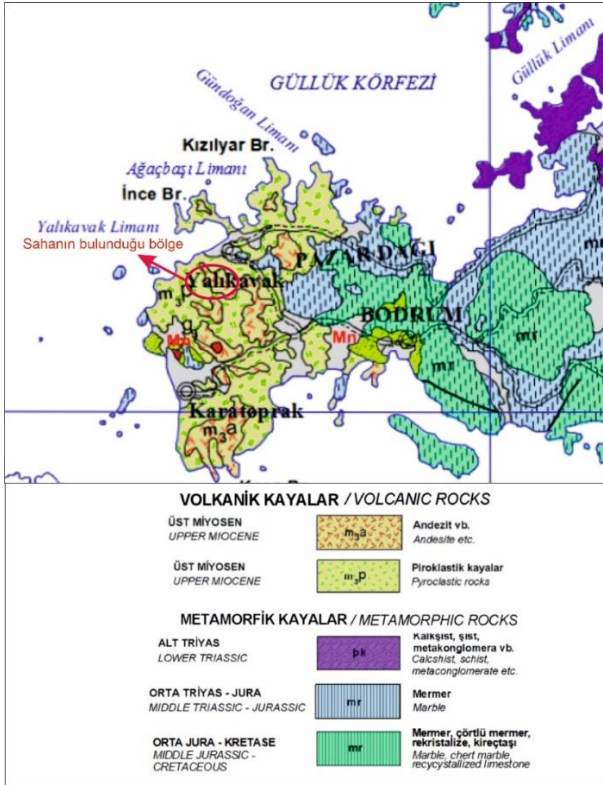
Şekil 1. İnşaat Sahası ve yakın binaların konumu.

Patlatmalı kazı çalışmaları yapılacak inşaat sahası konum olarak değerlendirildiğinde; sahaya yakın yapıların patlatmalı kazının çevresel titreşim etkisi açısından belirleyici olduğu görülmektedir. Ayrıca proje alanının doğuya doğru şevli bir yüzeyde bulunduğu görülmektedir. Bu gibi oluşumlar titreşim yayılma mekanizmasını ve taş savrulma ihtimalini etkilemektedir. Patlatmalar sonucu oluşan titreşimler arazinin topoğrafik yapısına göre farklı yayılım özellikleri göstermektedir. Özellikle hasar kriterlerinde etkili olan yüzey dalgaları, vadi, tepe gibi ani eğim değişikliklerinde farklı yayılma karakterizasyonu gösterebilmektedirler.

2.1. Bölgenin Genel Jeolojisi

Batı Anadolu’da yer alan Bodrum yarımadasında temel kayaları, Paleozoyik yaşta olan ve “Güllük formasyonu” olarak adlandırılan konglomera, kumtaşı ve şeyl araldanmasından oluşan hafif metamorfik bir birim oluşturur. Mesozoyik yaşlı kayalar ise Triyas-Liyas dönemine ait dolomitik kireçtaşları (Pazardağı formasyonu), Liyas-Malm dönemine ait siltli ve marnlı kireçtaşları (Karadağ formasyonu) ve Malm-Senomaniyen dönemine ait pelajik kireçtaşları (Kışladağı formasyonu) ile tanımlanır. Bu birimlerin üzerinde ise Üst Kretase-Paleosen yaşlı vahşi filiş (Bodrum formasyonu) yer alır. Senozoyik kaya birimlerine gelindiğinde, süreç Oligosen yaşlı çökellerle (Koyunbaba formasyonu) başlar. Oligosen sonrasında yarımadada yoğun bir magmatizma meydana

gelmiş ve bu süreçte farklı evrelerde plütonik ve volkanik kayalar oluşmuştur. İlk olarak Orta Miyosen'de bir monzonit intrüzyonuna rastlanır. Daha sonra bölgede kalkalkalin özellikte bir volkanizma etkili olmuş ve tüf-aglomera birikintileri ile andezit, trakiandezit, latit ve dasit türü lavlar meydana gelmiştir. Kabuksal malzemelerle başlayan bu kalkalkalin volkanizma, zamanla manto kökenli alkali olivin bazaltik oluşumlara dönüşmüştür. Böylelikle ikinci volkanik evre başlamış ve bu dönemde dayklar şeklinde bazalt, trakibazalt ve trakit türü lavlar meydana gelmiştir. Çalışma alanında, Üst Miyosen'de volkanizmanın sona ermesinin ardından Alt Pliyosen'de oluşmuş kireçtaşlarına rastlanır. Daha sonraki dönemde, Kuvaterner devrinde travertenler, yamaç molozları, alüvyonlar ve muhtemelen komşu Kos adasından taşınan süngertaşı parçaları ile tüfler birikmiştir (Ercan vd, 1982). Çalışma alanının genel jeolojisini gösterir harita şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi çalışma sahasında hakim kayalar andezit vb. volkanik kayalardan oluşmaktadır.



Şekil 2. Çalışma alanının genel jeolojisi (MTA 2024, Avşar vd 2012'den değiştirilerek).

2.2 Patlatmalı Kazı Çalışmaları ve Titreşim Ölçümleri

Günümüz teknolojisinde kayaç kazısı iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Birincisi hidrolik kırıcı ile mekanik kazı, ikincisi ise patlayıcı maddeler ile gerçekleştirilen patlatmalı kazıdır. Belirli sertliğin üzerinde ve belirli miktarlardaki kayaç kazısının ekonomik ve çevresel etki açısından değerlendirildiğinde patlatmalı olarak yapılması kaçınılmazdır. Bu bilgiler çerçevesinde çalışma sahasında hakim kayaç yapısının andezitik karakterdeki volkanik kayalar olduğu görülmektedir (Şekil 3). Bu

kayaçlar sert kaya sınıfında yer aldığından mekanik kazı ile diğer bir ifade ile hidrolik kırıcı ile kazı işlemi yapılması dayanımları yüksek olduğundan süre alacaktır. Ayrıca çevresel etki açısından değerlendirildiğinde mekanik kazıya maruziyet süresi patlatmalı kazı çalışmalarıyla kıyaslandığında süreklilik arz edeceğinden çıkan titreşim ve ses çevre yapılarında rahatsızlık verecektir. Patlatmalı kazı süresine maruziyet kısa olduğundan ve amaç inşaat projesine temel hazırlamak yani kayacı gevşetmek olduğundan meydana gelecek çevresel etkiler açısından da mekanik kazıya nazaran tercih edilmektedir. Çalışma sahasında da hakim kayaç andezit olduğundan mekanik kırıcılar ile kazı işlemi yapılması hem maliyet ve süre hem de çevreye sürekli ses kaynağı olarak verilecek zarar bakımından uygun değildir.



Şekil 3. Çalışma sahası hakim kayaç yapısı.

Sert, orta-sert kayaçların yerinden sökülmesi-kazılması için patlatmalı kazı çalışmaları yapılması kazı süresini kısaltacağı için çevreye ses açısından vereceği rahatsızlık daha az olacaktır. İnşaat alanlarında yapılan patlatmalar madencilikten farklı olarak gevşetme-çatlatma patlatması olarak yapılmaktadır. Dolayısıyla patlatma gruplarında delik sayıları daha az olup, kullanılan anlık patlayıcı miktarları da düşüktür. Ancak çalışma sahası içerisinde patlatmalı kazı çalışmaları yapılacak bölgeler riskli alanlara (yerleşim yeri binaları) çok yakın mesafede bulunmaktadır. Patlama kaynaklı titreşimlerin binalara zarar verip vermeyeceği değerlendirilmelidir. Bu amaçla söz konusu sahada 2022 Aralık ayında 4 adet 2023 Kasım ayında 4 adet olmak üzere toplam 8 adet patlatma operasyonu gerçekleştirilmiştir. Her ne kadar patlatmalar farklı yıllarda yapılmış olsa da yapıldıkları ay itibarıyla patlatma olayları aynı hava koşullarında (yağışsız, rüzgarlı ve kuru hava) gerçekleştirilmiştir. Sahada uygulanan patlatmalardan patlatma-1'e ait patlatma paterni ve patlatma bölgesi görüntüsü örnek olarak şekil 4'te verilmektedir. Gerçekleştirilen patlatmalara ait teknik veriler tablo 2'de verilmiştir. Patlatma bölgeleri tepelik kısımda yer almaktadır. Bu patlatmalar sırasında farklı mesafelerden toplam 24 adet titreşim ölçümü alınmıştır. Ölçüm istasyonları ve patlatma alanları şekil 5'te verilmiştir.



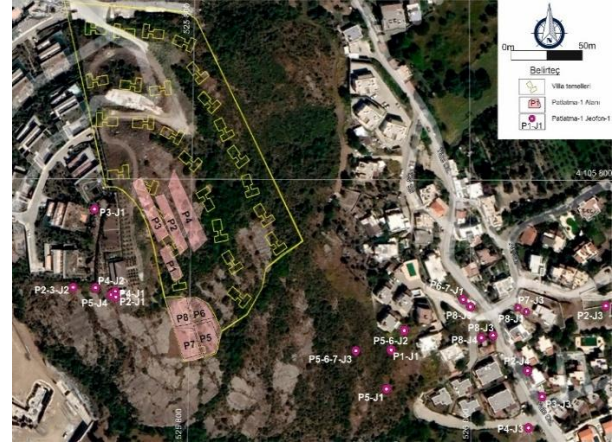
Şekil 4. Patlatma-1 bölgesi ve uygulanan patlatma paterni.

Tablo 2. Patlatmalara ait teknik veriler

Delik boyu (m)	3,0 - 7,5
Sıkılama boyu (m)	2,0-6,3
Delik Çapı (mm)	89
Dilim kalınlığı (m)	1,5
Deliklerarası Mesafe (m)	1,5
Anlık Patlayıcı Miktarı (kg/delik)	4,0-6,0

Ölçümler sırasında oluşturulan ölçüm istasyonlarının 6 adeti tepe bölgede kurulmuş olup, geriye kalan 18 adet ölçüm istasyonu vadi bölgesinde kurulmuştur. Tepe bölgede kurulan titreşim ölçüm cihazları patlatma bölgelerine en yakın konumda kalanlardır. Titreşim ölçümlerinde kalibrasyonu yapılmış olan Instantel marka 4 adet Minimate Blast ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu

cihazlar saniyede 1024 örnek kaydetme kapasitesine sahiptir. En düşük kayıt hızı 0.127 mm/sn olmak koşuluyla, 254 mm/sn titreşim hızlarına kadar okuma yapabilmektedir. Sahadaki titreşim hızı ölçümlerinde patlatmalı kazı alanı ile sahanın güneydoğusunda ve batı-güneybatısında yer alan yerleşim birimleri yönü esas alınmıştır. Bu patlatmalardan elde edilen sonuçlar tablo 2’de sunulmuştur (Karakuş ve Öngen, 2022; Karakuş vd., 2023). Tablo 3’ te görüldüğü gibi patlatma bölgesine en yakın 33 m’de titreşim ölçüm istasyonu kurularak 37,6 mm/sn bileşke parçacık hızı ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Patlatma bölgeleri, yerleşim birimleri ve titreşim ölçüm istasyonlarının konumları.

Tablo 3. Patlatmalarda kullanılan anlık patlayıcı miktarı, titreşim ölçüm mesafesi, ölçekli mesafe ve titreşim ölçümlerinden elde edilen bileşke parçacık hızları

Patlatma No	Ölçüm No	Titreşim hızı ölçüm mesafesi (m)	Jeofon yerleşim konumu	Anlık patlayıcı miktarı (kg)	Ölçekli mesafe	Bileşke parçacık hızı (PPV) (mm/sn)
1	1	165,0	Vadi	5,5	70,4	1,70
	1	65,0	Tepe	4,5	30,6	17,9
2	2	80,0	Tepe	4,5	37,7	16,0
	3	300,0	Vadi	4,5	141,4	1,84
	4	265,0	Vadi	4,5	124,9	7,04
3	1	33,0	Tepe	4,5	15,6	37,6
	2	73,0	Tepe	4,5	34,4	12,3
	3	310,0	Vadi	4,5	146,1	1,14
4	1	80,0	Tepe	4,0	40,0	11,59
	2	107,0	Tepe	4,0	53,5	7,91
	1	125,5	Vadi	6,0	51,2	1,58
5	2	131,0	Vadi	6,0	53,5	5,02
	3	99,1	Vadi	6,0	40,5	4,74
	4	65,3	Vadi	6,0	26,7	3,18
6	1	182,4	Vadi	6,0	74,5	1,49
	2	139,2	Vadi	6,0	56,8	5,60
	3	109,1	Vadi	6,0	44,5	4,43
7	1	192,5	Vadi	6,0	78,6	1,07
	2	230,8	Vadi	6,0	94,2	0,597
	3	112,9	Vadi	6,0	46,1	4,03
8	1	238,4	Vadi	6,0	97,3	0,298
	2	197,8	Vadi	6,0	80,8	0,897
	3	217,6	Vadi	6,0	88,8	0,755
	4	206,8	Vadi	6,0	84,4	0,63

2.3 Titreşim Ölçüm Sonuçlarının Analizi

8 adet patlatma operasyonu sırasında alınan 24 adet titreşim ölçümü sonucunda arazinin karakterize edilmesi amacıyla ölçekli mesafe-bileşke parçacık hızı grafiği çizilmiştir (Şekil 6). Sadece 6 adet ölçümün tepe bölgede olması ve vadi bölgesinde kurulan ölçüm istasyonlarının patlatma bölgesine çok yakın olmalarından dolayı, diğer bir ifade ile tepe ve vadi kısmında alınan ölçüm sayıları topografik etkiyi analiz etmek için yeterli sayıda olmadığından değerlendirme toplu olarak 24 adet ölçüm sonucuna göre yapılmıştır.

Yapılan analiz sonucunda araştırılan saha için arazi ve sönümlenme katsayıları $K=2787.8$ ve $\beta=1.674$ olarak $R^2=0.78$ ($R:0.86$) regresyon katsayısı ile belirlenmiştir. Veri analizi ve güç eğilim çizgisi (power trendline) oluşturma işlemleri Excel yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğilim çizgisi ile elde edilen katsayılar eşitlik olarak ifade edildiğinde aşağıdaki gibi elde edilir (eşitlik 2).

$$PPV = 2787.8 \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.674} \quad (2)$$

Ölçekli mesafe ile bileşke parçacık hızı arasındaki ilişkinin Eşitlik 2 kullanılarak bileşke parçacık hızı, sönümlenme mesafesi ya da anlık (gecikme başına düşen) patlayıcı miktarı bulunabilir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Tahmin Modelleri ile Saha Modelinin Karşılaştırılması

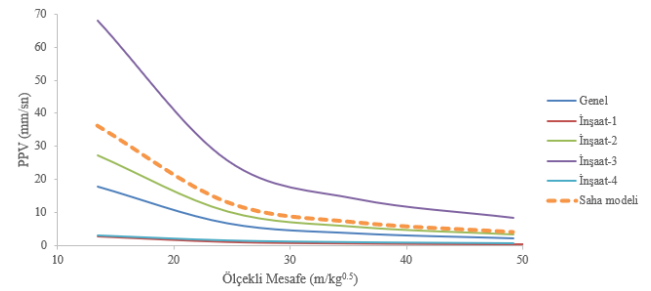
Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan Patlatma Tasarımları ve Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler Kılavuzu'nda önerilen titreşim yayılım formüllerinden Tablo 4'te verilen tahmin modellerinin inşaat sahalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla Tablo 4'te verilen titreşim yayılım tahmin modelleri ile saha ölçümleri neticesinde elde edilen model birbirleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda hakim kayaç yapısı andezit olan inşaat patlatmaları için titreşim yayılım karakteristik eşitliklerinin kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir. Tablo 4'te görüldüğü gibi kılavuzda verilen tahmin modellerinin arazi ile ilgili K ve β katsayıları saha özelinde bulunan modelle kıyaslandığında farklı olduğu

görülmektedir.

Yapılan değerlendirmede öncelikle anlık patlayıcı miktarını sabit tutarak, değişen mesafelerde meydana gelecek PPV değerleri elde edilmiş ve ölçekli mesafe ile arasındaki ilişkiyi göstermek için elde edilen sonuçlar grafik olarak ifade edilmiştir (Şekil 7). Şekil 6 incelendiğinde İnşaat-1, İnşaat-3 ve İnşaat-4 tahmin modelleri eğrisinin saha modelinden çok uzak olduğu görülmektedir. Genel tahmin modeli eğrisi ölçekli mesafe arttıkça saha modeli eğrisine yaklaşmaktadır. Grafiğe bakıldığında saha modeli eğrisine en yakın tahmin modeli eğrisi oluşturan tahmin modelinin İnşaat-2 olduğu görülmektedir. Ancak ölçekli mesafe değerinin 30'dan küçük olduğu durumlarda bu tahmin modeli eğrisi saha modeli eğrisinden uzaklaşmaktadır.



Şekil 6. Çalışma sahası ölçekli mesafe-bileşke parçacık hızı ilişkisi.



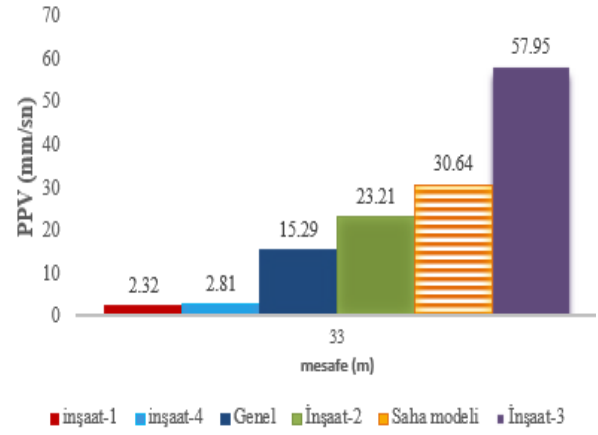
Şekil 7. Farklı tahmin modellerinden elde edilen "PPV-Ölçekli Mesafe" ilişkisi.

Tablo 4. Analiz için kullanılan tahmin modelleri

Tahmin modeli adı	Formül	Kaynak
Genel	$PPV = 1140 \times (SD)^{-1.6}$	Dupont (1978)
İnşaat-1	$PPV = 173 \times (SD)^{-1.6}$	Oriard (2005)
İnşaat-2	$PPV = 1730 \times (SD)^{-1.6}$	Oriard (2005)
İnşaat-3	$PPV = 4320 \times (SD)^{-1.6}$	Oriard (2005)
İnşaat-4	$PPV = 53 \times (SD)^{-1.09}$	US Dept of Interior (1980)
Saha Modeli	$PPV = 2787.8 \times (SD)^{-1.674}$	Saha ölçümleri

PPV= bileşke parçacık hızı (mm/sn), SD= ölçekli mesafe (m/kg^{0.5}).

Saha uygulamasında patlatma alanına en yakın titreşim ölçüm mesafesi olan 33 m için değerlendirme yapıldığında yakın mesafede meydana gelmesi öngörülen PPV değerleri şekil 8’ de verilmiştir. Saha çalışmasında 33 m mesafedeki titreşim ölçüm istasyonunda 30.64 mm/sn PPV değeri elde edilmiştir. Tahmin modelleri ile elde edilen değerler gerçek değerden uzaktır. Ancak İnşaat-3 modeli ile elde edilen değer gerçek değer %49.5 fazlası olmasına rağmen, bu model saha modeline kıyasla yüksek titreşim hızı tahmini yaptığı için olası riski (yapılara titreşim etkisi ulaşmasını) minimize etmek amacıyla yakın mesafelerde riskli yapılar var ise kullanılabilir tek tahmin modelidir. Böylece yönetmelikte verilen sınır değerlere göre bu model kullanılarak daha az anlık patlayıcı madde kullanılmış olacaktır. Saha modeli ile diğer tahmin modelleri arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını analiz etmek için SPSS (2024) programından faydalanılarak ANOVA testi yapılmıştır. Sonuçlar tablo 5 ve tablo 6’da sunulmaktadır.



Şekil 8. En yakın ölçüm istasyonunda meydana gelecek PPV değerleri.

Tablo 5. Tahmin değerleri

Tahmin modeli-PPV	Ortalama	Standart hata	% 95 Güven aralığı	
			Alt sınır	Üst sınır
Genel	2,517	,582	1,312	3,722
İnşaat-1	,381	,088	,199	,564
İnşaat-2	3,820	,884	1,992	5,648
İnşaat-3	9,540	2,206	4,975	14,104
İnşaat-4	,751	,107	,529	,972
Saha Modeli	4,731	1,163	2,326	7,136

Tablo 6. ANOVA testi-karşılaştırma sonuçları

Saha modeli-PPV(A)	Tahmin modeli-PPV(B)	Ortalama Fark (A-B)	Standart hata	P-değeri	Fark için %95 güven aralığı	
					Alt sınır	Üst sınır
Saha modeli	Genel	2,215*	0,580	0,013	0,314	4,115
	İnşaat-1	4,350*	1,074	0,007	0,833	7,867
	İnşaat-2	0,911	0,280	0,052	-,005	1,828
	İnşaat-3	-4,808*	1,044	0,002	-8,228	-1,389
	İnşaat-4	3,980*	1,058	0,015	0,518	7,443

*Ortalama farkı, %0.05 seviyesinde anlamlıdır.

Anova testi sonuçları incelendiğinde, en az ortalama farkın İnşaat-2 tahmin modelinde olduğu görülmektedir. P-değerine bakıldığında, P-değeri 0.05’ten küçükse, fark istatistiksel olarak anlamlıdır, yani iki grup birbirinden farklıdır. 0.05’ten büyükse, fark anlamlı değildir, yani iki grup birbirine benzerdir. Buna göre; İnşaat-2 modeline karşılık gelen p-değeri baz alınır, saha modeli ile aralarında anlamlı bir farklılık yoktur. Özetle, yakın mesafelerde (patlatma alanına 60 m uzaklıkta) meydana gelecek PPV değerini tahmin etmek için kılavuzda verilen tahmin modellerinin kullanılması gerçekçi sonuçlar elde etmek için uygun değildir. Mesafe arttıkça tahmin modelleri eğrileri birbirine yaklaşmakta olup, en uyumlu sonucu İnşaat-2 titreşim yayılım modeli verecek olsa da güvenli bölgede kalmak ve yapılara olası riski minimize etmek adına kılavuzda verilen modellerden en uygun

model İnşaat-3 modelidir. Bu farklar arazi tanımlayan katsayılarından gelmektedir. Bu sebeple en doğru yaklaşım patlatmalı kazı operasyonları sırasında titreşim ölçümleri olarak arazi modelini ortaya koymaktır.

4. Sonuçlar

Günümüzde çok sayıda inşaat projesi yapılmakta olup, proje alanlarında hakim kayaç özelliklerine göre kazı çalışmaları mekanik ya da patlatmalı olarak yapılmaktadır. Patlatmalı kazı çalışmalarında da en önemli unsur çevresel etkiler olup, proje alanlarının etrafındaki yapıların konumları belirleyici olmaktadır. Yapılan bu çalışma inşaat patlatmaları özelinde olduğu için, inşaat için olan tahmin modelleri ile genel model kullanılarak, sahadan alınan ölçümler neticesinde elde edilen saha modeli birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Her

modelde arazi ve sönümlenme katsayıları (k ve β) farklılık gösterdiğinden tahmin edilen PPV değerleri saha modeli ile elde edilen değerlerden farklıdır. Yapılan karşılaştırmaya göre yakın mesafelerde meydana gelecek PPV değerini tahmin etmek için kılavuzda verilen tahmin modellerinin kullanılması gerçekçi sonuçlar elde etmek için uygun değildir. Uzak mesafelerde bulunan yapılar için risk değerlendirmesi yaparken, İnşaat-2 titreşim yayılım modeli kullanılabilir olsa da, kısa mesafelerde bulunan yapılarda olası riski minimize etmek için kılavuzda verilen modellerden en uygun model İnşaat-3 modelidir. Etkilenilmesi düşünülen yapı ile sahanın konumları değişmeyeceğinden yapılacak tasarımlarda patlayıcı madde miktarının sınır titreşim değerlerine göre kısıtlanması gerekmektedir. Çalışma sonuçlarına göre İnşaat-2 ve İnşaat-3 eşitlikleri ve saha modeli kullanılarak

yönetmelikte evler için verilen frekanstan bağımsız en düşük sınır değer 5mm/sn için kullanılabilecek anlık (gecikme başına) patlayıcı madde miktarı farklı mesafeler için hesaplanmış ve tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de görüldüğü gibi sahaya ait bir model oluşturulmamış ise, tahmin modelleri kullanılarak yapılacak olan patlayıcı miktarı hesaplarında olası çevresel riskleri ortadan kaldırmak için hakim kayacı andezit olan inşaat projelerinde İnşaat-3 eşitliğinin kullanılması daha uygun olacaktır. Buna rağmen şehiriçi ve yerleşimlere yakın inşaat projelerinde patlatma çalışmaları başlamadan kılavuzda verilen tahmin modellerinden yararlanılsa bile, yapılacak patlatma çalışmaları sırasında titreşim ölçümleri alarak saha modelinin oluşturulması çevresel riskleri önlemek açısından önemlidir.

Tablo 7. Farklı mesafelerde 5 mm/sn sınır değer için anlık (gecikme başına) kullanılacak en fazla patlayıcı madde miktarı

Tahmin Modeli	Patlatma bölgesi ile yapı arasındaki mesafe			
	50 m	100 m	150 m	200 m
İnşaat-2	1,7 kg/delik	6,7 kg/delik	15,1 kg/delik	26,8 kg/delik
İnşaat-3	0,5 kg/delik	2,1 kg/delik	4,8 kg/delik	8,5 kg/delik
Saha modeli	1,3 kg/delik	5,2 kg/delik	11,8 kg/delik	20,9kg/delik

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	T.Ö.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	0

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çalışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Avşar Ö, Kurtuluş B, Kaçaroğlu F, Kuşcu G, Gürsu S. 2012. Muğla'nın jeotermal kaynakları ve doğal mineralli sularının envanteri projesi, sonuç raporu, Muğla Üniversitesi Rektörlüğü, Muğla, Türkiye, ss: 54.
- ÇŞB. 2018. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, ÇED İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, Patlatma tasarımları ve patlatma kaynaklı çevresel etkiler kılavuzu, Ankara, Türkiye, ss: 27.
- ÇŞB. 2022. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği. Resmi Gazete, Sayı: 32029, Ankara, Türkiye.
- Dupont A. 1978. Blasters Handbook 175th Anniversary 16th Edition, DUPONT, SBN-10: 1122712804, Wilmington, North Carolina, USA, pp: 145.
- Duvall WI, Fogleson DE. 1962. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibration. USBM-I 5968, OSTI ID:7128205.
- Ercan T, Günay E, Türkecan A. 1982. Bodrum yarımadasının jeolojisi. 36. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 10-14 Nisan, Ankara, Türkiye, ss: 37.
- Karakuş D, Öngen T, Kılınç ME. 2023. Muğla İli, Bodrum İlçesi, Yalıkavak Mahallesi 696 Ada 69 Parseldeki 27 villa yapım projesi kapsamında yapılacak patlatmalı kazı çalışmalarının çevresel etkisinin belirlenmesi ve uygun patlatma tasarımı. Döner Sermaye Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Müh Fakültesi, İzmir, Türkiye, ss: 15.
- Karakuş D, Öngen T, Özdoğan MV, Yenice H, Deliormanlı AH, İkiz U. 2018. Şehir içi patlatmalı kazı çalışmalarında çevresel titreşim limitlerine göre patlatma tasarımı. Madencilik, 57: 23-30.
- Karakuş D, Öngen T. 2022. AKFEN Gayrimenkul Yatırım Ortaklığı'nın Muğla İli Bodrum İlçesi Yalıkavak Mahallesi 696 ada 69 parseldeki projesi patlatmalı kazı çevresel etkisi. Döner Sermaye Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Müh Fakültesi, İzmir, Türkiye, ss: 63.
- Khan MFH, Hossain MJ, Ahmed MT, Monir MU, Rahman MA, Sweetey TS, Akash FA, Shovon SM. 2025. Ground vibration effect

- evaluation due to blasting operations. *Heliyon*, 11(2): <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41759>.
- Khandelwal M, Singh TN. 2006. Evaluation of blast-induced ground vibration predictors. *Soil Dynam Earthq Eng*, 27(2):116-125.
- Kuzu C. 2011. Taşocağı işletmeciliğinde patlatma kaynaklı etkiler. *Maden Yer Bilim Derg*, 2011: 64-72.
- Külekçi G, Çapık M, Yılmaz AO. 2017. Effects of blasting foundation building excavation studies on constructions. 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 13-17 August, Granada, Spain, pp: 39-49.
- MTA. 2024. 1/500.000 ölçekli jeoloji haritaları. [https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/DENIZ LI.pdf](https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/DENIZ_LI.pdf) (accessed date: November 23, 2024).
- Oriard LL. 2005. Explosives Engineering, Construction Vibrations and Geotechnology. *Intl Soc Explosives*, ISBN-13: 978-1892396136, Cleveland, USA, pp: 680.
- Öngen T, Karakuş D, Gönen A, Turan G. 2015. Hammadde ocaklarında patlatmalı kazı çalışmaları sonucu oluşan çevresel titreşimlerin iki farklı tahmin modeli ile değerlendirilmesi-örnek çalışma. 9. Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 14-15 Mayıs, İzmir, Türkiye, ss: 623-636.
- Öngen T, Karakuş D, Konak G, Onur AH. 2018. Assessment of blast-induced vibration using various estimation models. *J Afr Earth Sci*, 145: 267-273.
- Parida A, Mishra MK. 2015: Blast vibration analysis by different predictor approaches - a comparison. *Procedia Earth Planet Sci*, 11: 337-345. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.070>.
- Roy PP, 1991: Prediction and control of ground vibrations due to blasting. *Colliery Guard*, 239(7): 201-205.
- Saptono S, Wiyono B, Vergiagara V, Yulianto MR, Nova P, Pambayu AK, Suharyadi H. 2024. Analysis of the effect of blasting in the form of ground vibration and air blast on residents' houses around the CV Handika Karya mine. *AIP Conference Proceedings*, 2-6 December, Melbourne, Australia, 3019: 070003.
- SPSS Statics, 2024: Version 30.0.0, IBM.
- US Dept of Interior. 1980. Office of surface mining reclamation and enforcement. USBM RI 8507. Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting, United States Bureau of Mines Report of Investigation 8507, Pittsburgh, PA, USA, pp: 120.
- Yuan H, Zou Y, Li H, Ji S, Gu Z, He L, Hu R. 2025. Assessment of peak particle velocity of blast vibration using hybrid soft computing approaches. *J Comput Des Eng*, 12(2): 154-176.
- Zhang X, Nguyen H, Choi Y, Bui XN, Zhou J. 2021. Novel extreme learning machine-multi-verse optimization model for predicting peak particle velocity induced by mine blasting. *Nat Resour Res*, 30: 4735-4751. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09960-z>.