

BİR KALKER OCAĞINDA PATLATMA KAYNAKLI TİTREŞİMLERİN FARKLI REGRESYON MODELLERİ İLE TAHMİN EDİLMESİ

Hakan AK¹, Syamsul HIDAYAT²

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-5010-1382>

²Muhammadiyah Mataram Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Endonezya,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-9237-7902>

Anahtar Kelimeler	Öz
Patlatma Titreşim Çevresel Etkiler Çok Değişkenli Regresyon Analizi Ölçekli Mesafe	<i>İnşaat sektörüne hammadde sağlayan taş ve kalker ocakları genellikle maliyetleri en aza indirmek amacıyla şehirleşmenin yakın çevrelerinde yer almaktadır. Bu ocaklarda üretim yöntemi olarak yine ekonomik olması nedeniyle delme ve patlatma yöntemi tercih edilmektedir. Delme ve patlatma yöntemindeki teknolojik gelişmelere rağmen, bu yöntem ile kazı bazı çevresel olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Bu etkilerden olan titreşimler, jeolojik yapıya da bağlı olarak uzak mesafelerde de etkili olabilmesi nedeniyle oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Eskişehir ili sınırları içerisinde yer alan Yörükkaracaören köyü yakınında bulunan bir kalker ocağında yapılan patlatmalar bir adet titreşim ölçer cihazı ile izlenmiş ve toplam 31 adet titreşim olayı kaydedilmiştir. Kaydedilen bu olayların verileri daha sonra ölçekli mesafe ve çok değişkenli regresyon analizi tekniğine dayalı farklı titreşim tahmin modelleri uygulanarak istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Yapılan bu istatistiksel analizler sonucunda, ölçekli mesafeye dayalı Roy eşitliğinin bu saha için en iyi tahmin modeli olduğu belirlenmiş ve titreşim tahminleri bu eşitlik ile yapılmıştır. Çalışmada ayrıca, çok değişkenli regresyon analizi yönteminin patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmininde kullanılabilirliği ortaya konmuştur.</i>

ESTIMATION OF BLASTING-INDUCED VIBRATIONS IN A LIMESTONE QUARRY WITH DIFFERENT REGRESSION MODELS

Keywords	Abstract
Blasting Vibration Environmental Effects Multivariate Regression Analysis Scaled Distance	<i>Stone and limestone quarries which provide raw materials to the construction industry are generally located in the immediate vicinity of urbanization in order to minimize costs. In these mines, the drilling and blasting method is preferred as the production method because it is economical. Despite technological advances in the drilling and blasting method, excavation with this method may cause some adverse environmental effects. Vibrations, one of these adverse effects, are very important because they can be effective over long distances, depending on the geological structure. In this study, blasting in a limestone quarry located near Yörükkaracaören village within the borders of Eskişehir province was monitored with a vibration monitor and a total of 31 vibration events were recorded. The data of these recorded events were then subjected to statistical analysis by applying different vibration prediction models based on scaled distance and multivariate regression analysis technique. As a result of these statistical analyses, the Roy equation based on scaled distance is determined to be the best prediction model for this field and vibrations are predicted by using this equation. This study also demonstrates the usability of the multivariate regression analysis method in predicting blast-induced vibrations.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 11.10.2023

Kabul Tarihi

: 18.03.2024

Research Article

Submission Date

: 11.10.2023

Accepted Date

: 18.03.2024

* Sorumlu yazar: hak@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1374427>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Madencilik çalışmalarında örtü tabakasının veya cevherin kazısında delme ve patlatma teknolojisi kaçınılmaz olmaktadır. Gerek ekonomik faktörler gerekse zamandan tasarruf edilmesi bu teknolojinin geniş olarak kullanılmasına neden olmuştur. Bu kazanımlarının yanı sıra delme ve patlatma teknolojisi beraberinde birtakım çevresel problemlerin oluşmasına da sebebiyet verebilmektedir. Bu çevresel problemlerin en önemlisi ve daha uzak mesafelere taşınabilmesi nedeniyle titreşimler olmaktadır. 20. Yüzyıl ile birlikte belirli bir ivme kazanan kentleşme eğilimi, sanayileşme sürecinin de katkısı ile birlikte günümüzde daha da hızlanmıştır. Şehirler büyüdükçe bununla bağlantılı olarak hammadde ihtiyacını karşılamak amacıyla şehirlerin çevrelerinde giderek artan sayıda taş ve kalker ocakları açılmaya başlamıştır. Önceleri şehirden nispeten uzakta olan bu ocaklar şehirlerin genişlemesi ile giderek şehirlere yaklaşmıştır. Bu nedenle çevresel problemler ile ilgili şikâyetler de giderek artış göstermektedir.

Patlatma kaynaklı titreşimlerin büyüklüğünü belirlemede parçacık hızı değeri kullanılmaktadır. Parçacık hızı değerinin ölçülmesinde kullanılan sismograflar boyuna, düşey ve enine eksende ölçüm yapmaktadır. Bir sahada yapılan patlatmaların bir yerleşim yerine olan etkilerini değerlendirebilmek için o sahaya ait saha sabitlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunu yapabilmek için ise yapılan patlatmaların, yerleşim yerinin bulunduğu yöne doğru yerleştirilen sismograf cihazı ya da cihazları kullanarak izlenerek yeterli sayılarda parçacık hız değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra her bir patlatmaya ait basamak geometrisi parametreleri ile patlayıcı miktarları ile ilgili parametreler kayıt altına alınmalıdır. Sismograf ve atım noktası arasındaki mesafeleri belirleyebilmek için ise titreşim ölçüm istasyonlarının ve atım noktalarının koordinatları kayıt altına alınmalıdır. Genel olarak patlatma kaynaklı titreşimlerin hızını belirleyebilmek için gerekli olan iki temel parametre; atım yeri ve titreşim ölçüm cihazı arasındaki mesafe (D) ve gecikme aralığı başına kullanılan maksimum patlayıcı miktarı (W) olmaktadır. Araştırmacılar bu iki temel parametreyi kullanarak çeşitli ölçekli mesafe tanımları yaparak titreşim tahmininde regresyon analizi yöntemini önermişlerdir (Duval ve Petkof, 1959; Langefors ve Kihlström, 1963; Ambraseys ve Hendron, 1968; Hindistan Standartları, 1973; Roy, 1991). Sismograf cihazı ile kaydedilen parçacık hızı değeri ve ölçekli mesafe değeri kullanarak tek değişkenli regresyon analizi ile titreşimlerin tahmin denklemi üretilmektedir. Üretilen bu sahaya özgü denklemin katsayıları da o sahaya özgü arazi ve jeolojik sönümlenme katsayılarını vermektedir. Sahaya özgü üretilen regresyon denklemi kullanılarak ileriki zaman diliminde yapılacak olan patlatmaların çevredeki

yerleşim yerlerinde yapılar üzerindeki etkileri tahmin edilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Eskişehir ili sınırları içerisinde bulunan bir kalker ocağında yapılan üretim patlatmalarının, sahaya en yakın yerleşim yerleri olan Yörükkaracaören köyüne titreşim etkilerini doğru olarak tahmin edebilmektir. Bunu yapabilmek için geleneksel ölçekli mesafe kavramına dayalı bazı eşitlikler ve çok değişkenli regresyon analizi yöntemi kullanılarak yeni tahmin modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen tahmin modellerinin performanslarının belirlenmesi için farklı istatistiksel yöntemlerden yararlanılmıştır. Değerlendirme sonucunda ölçekli mesafeye dayalı eşitlikler içinde en iyi tahmin yapan eşitlik ve çok değişkenli regresyon modeli yardımıyla en yakın yerleşim yerindeki titreşim seviyeleri tahmin edilmiştir. Böylece bu saha için en uygun tahmin denklemleri belirlenerek, ileriki dönemlerde kalker ocağı sınırları genişleyip köye olan mesafe azaldığı durumda, ya da gerek gecikme aralığı başına kullanılan patlayıcı miktarlarındaki gerekse diğer bağımsız değişkenlerdeki değişimler söz konusu olduğunda titreşim etkilerinin gerçek değerlere en yakın şekilde tahmin edilmesi mümkün olabilecektir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışma sahasında yapılan patlatmaların oluşturacağı titreşimlerin olumsuz etkilerinin gözlenebileceği en yakın yerleşim yeri Yörükkaracaören köyüdür. Bu nedenle patlatma kaynaklı titreşim kayıtları White Seis II titreşim ölçer cihazı yardımıyla köy yönünde alınmıştır. Bunun yanı sıra tüm basamak geometrisi parametreleri özenle ölçülmüştür. Özellikle basamak yüksekliği, delikler arası mesafe, dilim mesafesi gibi bazı önemli parametreler bir drone yardımıyla çekilen ölçekli fotoğraflar üzerinden belirlenmiş ve her bir patlatma için ortalama değerleri kullanılmıştır. Çalışmada gerek verilerin toplanması ve gerekse istatistiksel çalışmaların ortaya konulması aşamasında araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Çalışma sahasında yapılan patlatmaların, özellikle ocağa en yakın yerleşim yeri olan Yörükkaracaören köyünde muhtemel oluşturacağı titreşimlerin en doğru şekilde tahmin edilmesi planlanmıştır. Bu amaçla öncelikle geleneksel ölçekli mesafeye dayalı ve oldukça yaygın olarak kullanılan eşitlikler kullanılarak sahaya özgü sönümlenme parametreleri ve dolayısıyla yayılım eşitliği belirlenecektir. Çok pratik olması nedeniyle ölçekli mesafeye dayalı eşitlikler ile titreşim tahminleri konusunda birçok araştırmacı çalışmalar yapmıştır (Kahriman, A., Özer, U., Aksoy, M., Karadoğan, A., Tuncer G., 2006; Ak, H. ve Konuk, A., 2008; Ak, H., Iphar, M., Yavuz, M., Konuk, A., 2009; Erarslan, K., Uysal, Ö., Arpaz, E., Cebi, M.A., 2008; Karakuş, 2010; Karadoğan, A., Özer, Ü., Kahriman, A., 2012; Aksoy ve Kahriman, 2014; Kalaycı ve Özyurt, 2014; Özer, Karadoğan, 2014;

Hüdaverdi ve Akyıldız, 2018; Ongen, T., Karakuş, D., Konak, G., Onur, A.H., 2018; Agrawal H, ve Mishra A.K., 2019; Paswan, R.K., Roy, M.P., Shankar, R., Singh, P.K., 2021). Patlatma kaynaklı üretilen yer sarsıntılarının toplam enerjisinin, gecikme aralığı başına patlatılan en yüksek patlayıcı miktarı ve patlatma noktasına olan mesafeye göre doğrudan değiştiği varsayımına dayalı olarak çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen ölçekli mesafeye dayalı denklemlerden bazıları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçekli Mesafeye Dayalı En Yaygın Kullanılan Titreşim Tahmin Denklemleri

Araştırmacı	Denklem
(Duval ve Petkof, 1959)	$ppv = K \cdot [D/\sqrt{W}]^n$
(Langefors ve Kihlström, 1963)	$ppv = K \cdot [\sqrt{W}/D^{3/4}]^n$
(Ambraseys ve Hendron, 1968)	$ppv = K \cdot [D/W^{1/3}]^n$
(Hindistan Standartları, 1973)	$ppv = K \cdot [W/D^{2/3}]^n$
(Roy, 1991)	$ppv = n + K \cdot [\sqrt{W}/D]$

Bu tahmin denklemlerinde kullanılan ppv; ölçülen maksimum parçacık titreşim hızını (mm/sn), D; patlatma noktası ve titreşim ölçüm istasyonu arasındaki mesafeyi (m), W ise gecikme aralığı başına kullanılan en yüksek patlayıcı miktarını (kg) ifade etmektedir. Denklemler içerisinde parantez içinde kalan kısımlar her bir denkleme ait ölçeklendirilmiş mesafeyi ifade etmektedir. Ayrıca, bu genel tahmin eşitliklerindeki K ve n katsayıları ise sahaya özgü arazi sabitlerini ifade etmektedir. Bu saha sabitleri yapılan her bir patlatmanın titreşim ölçüm cihazları ile farklı mesafelerden izlenmesinden sonra yapılan istatistiksel analizlerden elde edilmektedir.

Patlatma kaynaklı titreşimleri etkilediği bilinen atım parametrelerinin kullanıldığı, farklı analiz tekniklerinden oluşan birçok çalışma söz konusudur (Liang, Q., An, Y., Zhao, L., Li, D., Yan, L., 2011; Hüdaverdi, 2012; Hüdaverdi, 2015; Chandar, K.R., Sastry, V.R. ve Hegde, C., 2017). Bu çalışmada diğer tahmin yöntemi olarak patlatma parametrelerine bağlı çok değişkenli regresyon analizi yöntemi kullanılarak alternatif bir titreşim tahmin denklemi geliştirilmiştir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizinde doğrudan rastgele çok sayıda tahmin değişkenleri seçerek model oluşturmadan önce adimsal regresyon analizi yardımıyla değişkendeki değişimi en fazla açıklayan tahmin değişkeni veya değişkenleri belirlenmiştir.

Adimsal regresyon analizi yönteminde değişkenlerin modelde yer alabilmesi için öncelikle yeterli anlamlılık seviyesine olup olmadığı belirlenir. Daha sonra değişkenler modele sırayla eklenerek modelde kullanılıp kullanılmayacağına yine anlamlılık değerine göre kara verilmektedir. Belirlilik katsayısı (R^2) en iyi çoklu regresyon modelinin belirlenmesinde önemli bir yeterlilik ölçütüdür (Konuk, A., Aksoy, M., Ak, H., 2021).

Daha sonra çalışmada farklı regresyon modelleri oluşturularak geliştirilen tahmin eşitliklerinin performansı istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırılmış ve yöntemlerden en iyi tahminci eşitlik ile sahaya en yakın yerleşim yeri için titreşim tahminleri yapılmış ve aşağıda detayları verilmiştir.

3. Çalışma Sahası

Çalışma yeri, Eskisehir ili, Merkez ilçesi, Yörükkaracaören Köyü yakınlarında bulunan Selka Mad. İnş. Yapı Malz. Tic. ve San. Ltd. Şti. adına kayıtlı İR.200702379 İşletme Ruhsatlı kalker ocağı sahasıdır. Çalışma sahası Eskişehir ilinin doğusunda, Yörükkaracaören köyünün yaklaşık 1 km güney batısında yer almaktadır. Çalışma sahası Eskişehir merkezine yaklaşık 26 km uzaklıkta bulunmaktadır (Şekil 1). Köy ve ocağın genel çevresi engebeli ve kıraç bir arazi yapısına sahiptir.



Şekil 1. Çalışma Sahası ve Yörükkaracaören Köyü Google Earth Görüntüsü

Çalışma sahasında, kalker üretimi gerçekleştirilmekte olup, üretim delme ve patlatma yöntemi ile yapılmaktadır. Delme ve patlatma yöntemi kullanılarak sahada parçalanmış kalker cevheri kamyonlara yüklenerek kırma eleme tesisine nakledilmektedir. Tesis alanından stok alanına taşınan kalker daha sonra hazır beton santraline sevk edilerek inşaat-karayolu v.b. hammadde ihtiyacı için değerlendirilmektedir.

3.1. Çalışma Sahası Jeolojisi

Çalışma sahası civarında bulunan Yörükkaracaören Granodiyoriti, Tekke Tepe güneyindeki ofiyolit birimlerini keserek yüzeylenmiştir. Bu birim çoğunlukla porfiri ve nadiren ise taneli dokulu olup, arazi topoğrafyasına uygun bir morfolojik yapı göstermektedir. Sahadaki kayalar ileri derecede alterasyon göstermektedir. Feldspatlar genel olarak killeşmiş ve serisitleşmiş bir yapıdadır. Epidot gelişmelerine de rastlanmakta olup, kirli sarı ve açık gri renkte görünümüne sahiptirler. Yörükkaracaören Granodiyoriti Üst Kretase yaşlı olup, metamorfizmaya uğramış kayalarla olan sınırlarında skarn zonları

oluşturmuştur (Gözler, M., Cevher, F., Ergül, E. ve Asutay, H., 1997; Purtul, 2019).

3.2. Ölçümler

Titreşim ölçümlerinin gerçekleştirildiği Selka şirketine ait kalker ocağındaki patlatma yapılan bölgede, kayacın yoğunluğu $2,7 \text{ gr/cm}^3$ olup mohs sertlik değeri 4 civarındadır. Kayacın ortalama porozitesi %0,2'dir. Patlatma yapılan sahada kayacın ortalama basınç direnci 1019 kgf/cm^2 , ortalama çekme direnci 64 kgf/cm^2 olup elastisite modülü $6,91 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 'dir (Odak; 2011).

Çalışma sahasında kayaç birimi ocağın farklı noktalarında az da olsa değişimler göstermekle birlikte genel anlamda benzerlikler taşımaktadır. Ocak üst basamaklarında genelde gevşek kayaç tabakaları söz konusu olurken alt basamaklarda daha sağlam kayaç tabakaları gözlenmektedir. Ocakta yapılan toplam 31 atıma ait tasarım parametreleri patlatma öncesinde titizlikle kayıt edilmiştir. Özellikle dilim mesafesi, delikler arası mesafe ve basamak yüksekliği parametreleri bir drone yardımıyla ölçekli çekilen fotoğraflar üzerinden hesaplanmış ve ortalama değerleri kullanılmıştır. Sahada 4 farklı basamak kotunda yapılan patlatmalara ait tasarım parametreleri ile ilgili tanımlayıcı istatistikler Tablo 2'de, kayıt edilen titreşim değerleri ile ilgili istatistikler ise Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 2. Tasarım parametreleri tanımlayıcı istatistikleri

Değişken	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Delik Sayısı (n, adet)	8	72	34,2	15,5
Dilim Mesafesi (B, m)	1,7	3,7	2,33	0,473
Delik Aralığı (S, m)	1,6	4,6	2,48	0,572
Sıkılama Yüks. (hs, m)	2	4	3,01	0,394
Taban Payı (U, m)	0,7	1	0,95	0,090
Delik Uzunluğu (H, m)	4,7	15	10,55	2,809
Basamak Yüks. (L, m)	4	14	9,60	2,730
Sıra Sayısı (adet)	1	11	3,64	1,98
Özgül Şarj (kg/m^3)	0,293	1,485	0,95	0,274

Tablo 3. Titreşim Ölçüm Verileri İstatistikleri

Değişken	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Gecikme Başına Maksimum Şarj Miktarı (W, kg)	29	130	63	23,32
Titreşim Ölçüm Mesafesi (D, m)	62	709	289	150
Maksimum Parçacık Hızı (PPV, mm/sn)	1,016	20,066	5,93	5,489
PPV Frekans (Hz)	4,5	30,1	10,19	5,386

Tablo 2'de görüldüğü gibi patlatma faaliyetleri düşük ve orta basamak yüksekliklerinde dolayısıyla farklı delik uzunluklarında ve 8 ila 72 delik sayısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Patlatmalarda delik sıra sayıları değişkenlik göstermektedir. Atımların 16 tanesi 1,2 ve 3

sıralı, 14 tanesi 4, 5 ve 6 sıralı olup 1 atım ise 11 sıralı olarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'de ise patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin oldukça geniş bir mesafe aralığında kayıt edilmiş olduğu görülmektedir. Ayrıca, gecikme başına şarj miktarlarının, gerek delik boylarından kaynaklı gerekse gecikme tasarımından kaynaklı nedenlerle yine geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir.

Patlatma delikleri çapı tüm atımlarda 89 mm olarak kullanılmıştır. Ana şarj olarak ANFO ve suya dayanıklı kartuş emülsiyon patlayıcılar kullanılmıştır. Taban zorluğunu aşmak için detonasyon basıncı daha yüksek olan emülsiyon patlayıcılar 3-6 adet civarında olacak şekilde yemleyici üzerinde delik taban kısmında kullanılmış ve daha sonra sıkılama kısmına kadar ANFO şarjı yapılmıştır. Yemleyici olarak 1 kg ağırlığa sahip emülsiyon patlayıcılar tercih edilmiştir. Yemleyici dinamitlerin ateşlenmesinde elektriksiz ateşleme sistemi kullanılmıştır. Gecikme tasarımları genel olarak delikler arası 17 milisaniye, sıralar arası ise 42 milisaniye olacak şekilde planlanmıştır. Patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin ölçülmesinde ise WhiteSeis II model titreşim ölçer cihaz kullanılmıştır.

4. İki Farklı Yöntem Kullanarak Sahaya Özgü Titreşim Tahmin Denklemi Geliştirme

4.1. Ölçekli Mesafe Kullanan Geleneksel Modeller ile Sahaya Özgü Tahmin Yaklaşımı

Geleneksel patlatma kaynaklı titreşim denklemlerinde bulunan ölçekli mesafe (SD); mesafe (D) ve gecikme aralığı başına maksimum kullanılan şarj miktarı (W) gözetilerek yapılır. Bu bölümde, farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olan ve Tablo 1'de verilen geleneksel ölçekli mesafeye dayalı denklemler kullanılmıştır. Çalışma sahasında yapılan 31 adet patlatma olayında, farklı mesafelerden 31 adet titreşim kaydı ölçülmüştür. Ayrıca her bir patlatma olayındaki D ve W değerleri de titizlikle ölçülmüştür. Kayıt altına alınan bu verilerden yararlanılarak farklı yayılım eşitlikleri ile regresyon analizleri yapılmış ve her bir denkleme ait arazi katsayıları Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Ölçekli Mesafeye Dayalı Eşitliklerin Sahaya Özgü Arazi ve İlişki Katsayıları

Denklem	K	n	R ²	R
Duval-Petkof	398,65	-1,319	0,6869	0,8288
Langefors-Kihlström	142,77	1,696	0,6576	0,8109
Ambraseys-Hendron	1074,2	-1,341	0,7040	0,8390
Hindistan Standartları	2,42	1,293	0,4284	0,6545
Roy	200,01	-1,3013	0,6834	0,8267

Tablo 4'de görüldüğü gibi, beş denklem içerisinde üç tanesinin belirlilik katsayısı (R²) birbirine yakın sonuçlar verirken en yüksek belirlilik katsayısı Ambraseys-Hendron denkleminde elde edilmiştir. Daha sonra sırasıyla Duval-Petkof ve Roy eşitliği

gelmektedir. En kötü sonuç ise Hindistan Standartları eşitliği ile elde edilmiştir. Bu tür analizler sonucunda doğrudan belirlilik ve korelasyon katsayısına bakarak en iyi tahmin yapan eşitlik olduğuna karar vermek hatalı sonuçlara sebep olabilir. Bu nedenle ileriki bölümlerde her bir yayılım eşitliğinin tahmin performansı da değerlendirilecektir.

4.2. Çok Değişkenli Regresyon Analizi ile Sahaya Özgün Tahmin Yaklaşımı

Patlatma sahasına özgü geliştirilmesi düşünülen denklemde, öncelikle titreşim seviyelerini etkilemesi muhtemel olan patlatma parametreleri belirlenmiştir. Çok değişkenli regresyon analizi için belirlenen bu parametrelerden maksimum parçacık hızı (ppv) bağımlı değişken olarak seçilmiştir. Patlatma yeri ve ölçüm istasyonu arası mesafe (D), gecikme aralığı başına kullanılan maksimum şarj miktarı (W), dilim mesafesi (B), delikler arası mesafe (S), delik sıkılama yüksekliği (hs), delik uzunluğu (H), delik taban payı (U) ve son olarak özgül şarj miktarı (q) bağımsız değişken olarak kullanılmıştır.

Çok değişkenli regresyon modeli belirlenirken, parametrelerinin doğrudan modele dâhil edilmesi hatalı sonuçlara sebep olabileceğinden adimsal regresyon modeli yöntemi kullanılmıştır. Böylece, titreşim seviyelerini en çok etkileyen ve anlamlılık açısından açıklayan parametreler belirlenecek ve sırayla modele dâhil edilecektir. Bu çalışmada, SPSS yazılımı kullanılarak çok değişkenli adimsal regresyon modeli geliştirilmiş ve model sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Çok Değişkenli Adimsal Regresyon Modeli Özeti

Model	R	R ²	Ayarlanmış R ²	Tahmin standart hatası
1	0,701 ^a	0,492	0,474	3,9795
2	0,758 ^b	0,575	0,544	3,7054
3	0,798 ^c	0,637	0,597	3,4847

a. Bağımsız değişkenler: (Sabit), D

b. Bağımsız değişkenler: (Sabit), D, hs

c. Bağımsız değişkenler: (Sabit), D, hs, H

Tablo 5'de görüldüğü gibi, adimsal regresyon modeli yardımıyla maksimum parçacık hızı ile en yüksek kısmi korelasyona sahip olan parametreler sırasıyla D, hs ve H olarak belirlenmiştir. İlk adımda D modele dâhil olmuş ve R² değeri 0,492 olarak belirlenmiştir. İkinci aşamada modele hs de dâhil olmuş ve R² 0,575 değerine yükselmiştir. Son olarak modele H de dâhil olmuş ve R² değeri 0,637 olarak belirlenmiştir. Yapılan F testi sonucunda diğer bağımsız değişkenlerin anlamlılık seviyeleri 0,05'in üzerinde olduğundan modele dâhil edilmemiştir. Başka bir ifadeyle titreşim hızı değerleri ile diğer bağımsız değişkenler arasında lineer ilişki olduğunu öne süren hipotez %5 anlamlılık düzeyinde reddedilir. Tablo 6'da çok değişkenli adimsal regresyon modelinin varyans analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 6. Çok Değişkenli Adimsal Regresyon Modeli Varyans Analizi

Model	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Anlamlılık
1	444.489	1	444.489	28.068	.000
	459.249	29	15.836		
	903.737	30			
2	519.300	2	259.650	18.911	.000
	384.438	28	13.730		
	903.737	30			
3	575.875	3	191.958	15.808	.000
	327.862	27	12.143		
	903.737	30			

Tablo 6'da, her üç modelin de anlamlı olduğu görülmektedir. Model 3'de diğer iki modelden daha yüksek belirlilik katsayısı değeri olduğundan bu model seçilmiştir. Buna göre model katsayılarına bağlı olarak çok değişkenli regresyon modeli Eşitlik 1'de verildiği gibi yazılmıştır.

$$ppv = -7,55 - 0,025D + 5,036hs + 0,502H \quad (1)$$

Ölçekli mesafeye dayalı denklemlerde daima kullanılan gecikme başına maksimum şarj miktarının (W) çok değişkenli regresyon modelinde (Eşitlik 1) yer almaması dikkat çekicidir. Bu sahaya uygun belirlenen çok değişkenli regresyon modelinin performansı ölçekli mesafeye dayalı geliştirilen denklemler ile birlikte bir sonraki bölümde değerlendirilecektir.

4.3. Tahmin Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, sahaya özgü geliştirilen geleneksel ölçekli mesafeyi kullanan yayılım eşitlikleri ile çok değişkenli regresyon analizinden elde edilen eşitliğin performansı değerlendirilmiştir. Eşitlikler kullanılarak hesaplanan titreşim değerleri ile kayıt edilen gerçek titreşim değerlerin karşılaştırılması için iki farklı hata ölçütü olan Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve Hataların Kareleri Ortalamasının Karekökü (HKOK) kullanılmıştır. Ayrıca Varyans Oranları Yüzdesi (VOY) ile modelin başarısı değerlendirilmiştir. OMH ve HKOK değerlerinin sıfıra yakın olması tahminlerin gerçek değerlere daha yakın olduğunu, VOY değerinin yüz değerine yakın olması ise modelin daha başarılı olduğunu göstermektedir. Gerçek ölçüm değerleri ve modeller kullanılarak yapılan tahminlerinin karşılaştırma parametreleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Regresyon Modellerinin Karşılaştırılması

Denklem	OMH	HKOK	VOY	R	a	b
Duval ve Petkof	2,28	1,51	80,95	0,804	18	4
Langefors ve Kihlström	2,34	1,53	79,95	0,792	17	3
Ambraseys ve Hendron	2,25	1,50	81,81	0,812	20	3
Hindistan Standartları	2,91	1,71	61,87	0,618	17	5
Roy	2,23	1,49	85,37	0,827	20	2
Çok Değişkenli Reg. Mod.	2,55	1,60	85,90	0,798	17	2

a: <2 mm/s'den daha az hata ile yapılan tahmin sayısı

b: >6 mm/s'den daha büyük hata ile yapılan tahmin sayısı

Buna göre; tüm modellerin OMH ve HKOK değerini kıyasladığımızda Roy modelinin en küçük hata indisi değerlerini verdiği görülmektedir. Ona en yakın hata indisi değerleri Ambraseys-Hendron modelinde olmuştur. En büyük hata indisi değerlerinin ise Hindistan Standartlarında olduğu görülmektedir. Çok değişkenli regresyon modeli ise en büyük hata indisleri içinde sondan ikinci olmuştur. Kısacası ölçekli mesafeye dayalı eşitlikler içerisinde en düşük OMH ve HKOK değerini Roy eşitliği vermektedir. VOY değerlerine göre karşılaştırma yapıldığında ise 100 değerine en yakın sonuçlar veren çok değişkenli regresyon modeli ve Roy eşitliği olmaktadır. Tahmin ve gerçek değerler arasındaki korelasyon (R) katsayıları incelendiğinde de en yüksek korelasyonu Roy eşitliğinin ($R=0,827$) daha sonra ise Ambraseys-Hendron eşitliğinin ($R=0,812$) verdiği görülmektedir. Çok değişkenli regresyon analizinde ise korelasyon katsayısı $0,798$ 'de kalmıştır. Son olarak Tablo 7'de modeller içerisinde çok değişkenli regresyon denklemi ile yapılan tahminlerde 17 atım 2 mm/sn hız değerinden daha küçük bir hata ile tahmin edilirken, bu sayı Roy ve Ambraseys-Hendron eşitlikleri ile yapılan tahminlerde 20 olmuştur. Tablo 7'de ayrıca 6 mm/sn hız değerinden daha büyük hata ile yapılan tahmin sayıları da verilmiştir. Buna göre çok değişkenli regresyon denklemi ile yapılan tahminde 6 mm/sn değerinden daha büyük farkla hatalı tahmin sayısı 2 olurken, bu sayı Roy eşitliği ile yapılan tahminde 2, Ambraseys-Hendron eşitliğinde ise 3 olmuştur. Diğer modellerde bu sayı 4-5 arasında değişmektedir.

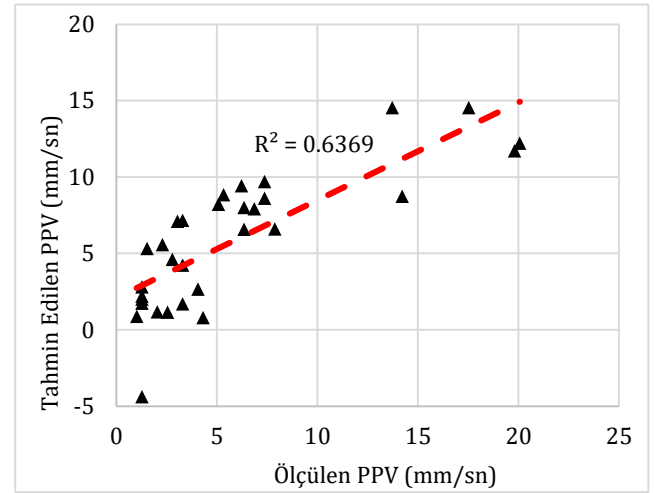
Tablo 7'de verilen hata indisleri, korelasyon katsayıları ve gerçeğe en yakın ve en uzak tahmin sayılarına göre yapılan karşılaştırma sonucunda; tüm modeller içerisinde en başarılı tahmin yapan modelin ölçekli mesafeye dayalı yayılım eşitliği olan Roy modeli olduğu görülmektedir. Tablo 7'de verilen bilgiler kıyaslandığında, çok değişkenli regresyon modelinin, Roy ve Ambraseys-Hendron modelinden sonra en iyi tahmin modeli olduğu söylenebilir. Sahaya özgü katsayıları belirlenen en başarılı tahmin modeli Roy yayılım modeli Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$ppv = -1,3013 + 200,01[\sqrt{w}/D] \quad (2)$$

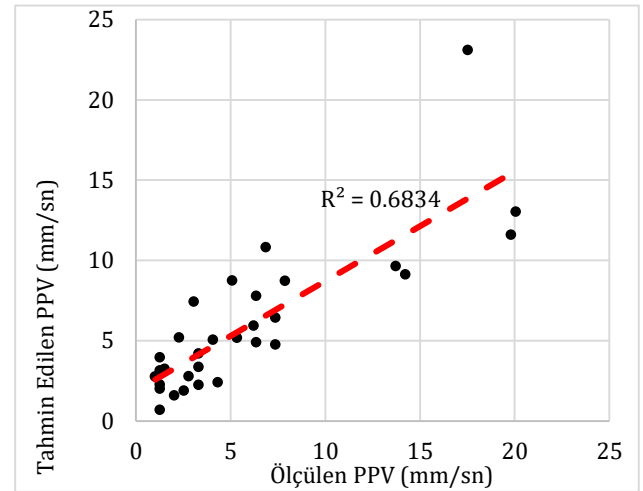
Roy eşitliğinin, belirlilik katsayısı ve korelasyon katsayısına göre Tablo 4'de diğer modeller arasında üçüncü iyi model olduğu görülmektedir. Modellerin tahmin performanslarının karşılaştırıldığı Tablo 7'de ise en iyi tahmin modeli olduğu belirlenmiştir. Buna göre; sadece belirlilik veya korelasyon katsayısına göre değerlendirme yapılmaması gerektiği, yayılım eşitliklerinin tahmin performansının da değerlendirilmesi gerektiği söylenebilir.

Çok değişkenli regresyon modeli yardımıyla elde edilen Eşitlik 1 kullanılarak tahmin edilen titreşim değerleri ile ölçülen değerler arasındaki ilişki grafiği Şekil 2'de

verilmiştir. En başarılı tahmin modeli olan Roy denkleminde sahaya özgü arazi katsayıları elde edilen Eşitlik 2 kullanılarak tahmin edilen titreşim değerleri ile ölçülen değerler arasındaki ilişki grafiği ise Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Çok Değişkenli Regresyon Modeliyle Tahmin Edilen ve Ölçülen Titreşim Değerleri Arası İlişki Grafiği



Şekil 3. Roy Eşitliği ile Tahmin Edilen ve Ölçülen Titreşim Değerleri Arasındaki İlişki Grafiği

4.4. Titreşim Tahmini

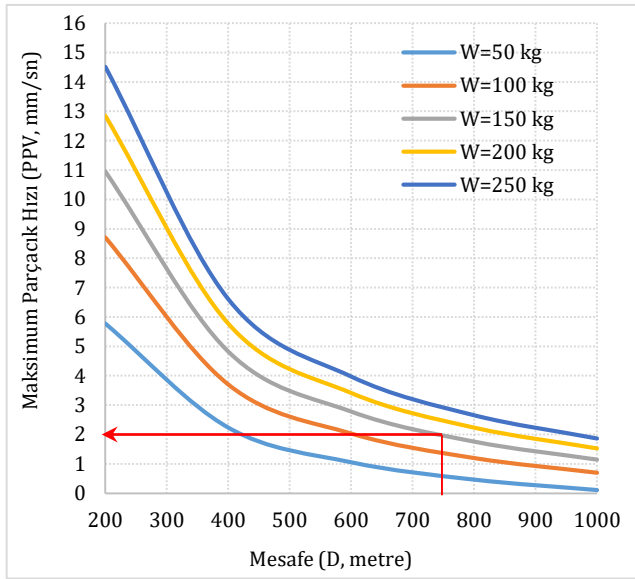
Bu çalışmada tüm regresyon modelleri içerisinde ölçekli mesafeyi dikkate alan eşitliklerden olan Roy eşitliğinin gerçek değerlere daha yakın tahminler yaptığı ve daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın amaçlarından bir tanesi kalker sahasına en yakın yerleşim yeri olan Yörükkaracaören köyünde patlatmalardan kaynaklı titreşim seviyelerinin tahmin edilmesidir. Kalker ocağı çalışma sınırının Yörükkaracaören köyüne olan mesafesinin, çalışmaların yapıldığı zaman diliminde yaklaşık 1000 metre olduğu

belirlenmiştir. Firma tarafından kapasite artış için hazırlanan ÇED raporunda ise ocak sınırının köye en yakın mesafesi 750 metre civarında olacaktır. Bu bilgilerden hareketle en başarılı tahmin modeli olan Roy modeli kullanılarak köy yönünde titreşim tahminleri yapılmıştır.

Sahaya özgü arazi katsayıları belirlenen Roy eşitliğinde, bağımsız değişkenler olan mesafe (D) ve gecikme başına maksimum şarj miktarına (W) farklı değerler verilerek maksimum titreşim (PPV) seviyeleri tahminleri yapılmış olup sonuçlar Tablo 8'de, grafiksel görünümü ise Şekil 4'de verilmiştir.

Tablo 8. Sahaya Özgü Roy Eşitliğiyle Maksimum Titreşim Hızı (PPV, mm/sn) Tahmini

Mesafe (D, m)	Gecikme Başına Maksimum Şarj Miktarı (W, kg)				
	50	100	150	200	250
200	5.77	8.70	10.95	12.85	14.52
400	2.24	3.70	4.83	5.77	6.61
600	1.06	2.03	2.78	3.42	3.97
800	0.47	1.20	1.76	2.24	2.65
1000	0.11	0.70	1.15	1.53	1.86



Şekil 4. Roy Eşitliği ile Yapılan Titreşim Tahmin Grafiği

Sahada yapılan patlatmalarda kayıt edilen titreşimlerin frekans aralıkları 4,5-30,1 Hz aralığında olup ortalama 10,19 Hz'dir. Ülkemizde 2022 tarihinde yürürlüğe giren "Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği"nde maden ve taş ocaklarında patlatma kaynaklı oluşan titreşimlerin, 10-50 Hz frekans aralığında tuğla ve beton benzeri evler için yapıda yaratacağı izin verilen en yüksek titreşim hızı seviyesi 15 mm/sn olarak belirtilmiştir. Tablo 8'den de görüldüğü gibi, Roy yayılım eşitliği kullanılarak yapılan tahminlerde 600 metre mesafe ve 250 kg gecikme başına maksimum şarj miktarında dahi maksimum titreşim hızı değeri 3,97 mm/sn olarak hesaplanmıştır. Çalışma sırasında sahada yapılan tüm

patlatmalar arasında en yüksek W değeri 130 kg olarak kullanılmıştır. Bu değere yakın 100-150 kg W değerleri kullanılarak yapılan tahminlerde, en yakın mesafe değeri olan 200 metre mesafede PPV sırasıyla 8,70-10,95 mm/sn olarak tahmin edilmiştir. Bu tahmin edilen değerlerin izin verilen limitlerin oldukça altında kaldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4 yardımıyla, ocak nihai sınırında yapılan bir patlatma operasyonunun 750 metre uzaklıktaki Yörükkaracaören köyünde oluşturacağı maksimum titreşim değeri, gecikme başına maksimum şarj miktarı 150 kg olsa dahi 2 mm/sn olacağını % 50 güven seviyesinde tahmin etmek mümkündür. Yayılım eşitliği gerektiğinde %95 güven seviyesinde tahmin yapılacak şekilde güncellenebilir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmininde araştırmacılar tarafından birçok titreşim tahmin denklemi geliştirilmiş olup en yaygın kullanılanları pratik olmaları nedeniyle ölçekli mesafe kavramını kullananlar olmuştur. Bunun yanı sıra çok değişkenli regresyon analizini tekniği kullanarak da titreşim tahmin modelleri geliştirilmektedir. Bu çalışmada, Eskişehir ili sınırları içerisinde yer alan Yörükkaracaören köyü yakınında bulunan bir kalker ocağında yapılan patlatmalardan kaynaklanan titreşimlerin tahmininde hangi regresyon modelinin daha uygun olacağı araştırılmıştır. En az hata ile tahmin yapan model kullanılarak titreşim tahminleri yapılmıştır. Araştırma sonunda aşağıdaki sonuçlar ve öneriler yazılabilir:

- Kalker ocağında yapılan 31 adet patlatma olayına ait veriler kullanılarak ölçekli mesafeye dayalı geleneksel denklemler yardımıyla ve çok değişkenli regresyon analizi tekniği kullanılarak farklı titreşim tahmin modelleri geliştirilmiştir.
- Ölçekli mesafeye dayalı tahmin eşitliklerinin sahaya özgü katsayıları belirlenmiş ve oluşturulan denklemlerin belirlilik ve regresyon katsayılarına bakıldığında Ambraseys-Hendron denkleminin diğerlerinin önüne geçtiği belirlenmiştir. Ancak, model performanslarının belirlenmesi aşamasında bu eşitlikler kullanılarak yapılan tahminlerin gerçek değerler ile yapılan kıyaslamasında ise Roy eşitliği en düşük tahmin hata indislerini vererek en iyi tahmin denklemi olarak belirlenmiştir. Buna göre, tahminlerde doğrudan en yaygın kullanılan eşitliğin seçilmesi yerine farklı araştırmacıların önerdiği eşitliklerin de kullanımı araştırılmalıdır. Ayrıca, tahmin eşitlikleri değerlendirilirken farklı hata ölçüm yaklaşımlarının kullanılması oldukça önemlidir.
- Çok değişkenli regresyon modelinin belirlenmesi aşamasında ise adimsal regresyon modeli kullanılmıştır. Ölçülen titreşim seviyelerini en çok temsil eden değişkenler sırasıyla D, hs ve H olmuştur.

Bu modelin performansının belirlenmesi sonucunda ise ölçekli mesafeyi dayalı Roy eşitliğinin gerisinde kaldığı belirlenmiştir. Ancak, çok değişkenli regresyon analizi yönteminin patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmininde kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Her ne kadar modele dâhil edilen tasarım parametrelerinin sayısındaki artış modeli ve tahminleri zorlaştırarak karmaşık hale getirirse de, titreşim tahminlerinde çok değişkenli regresyon modeli de araştırılmalıdır.

- Çalışmada, ayrıca, ileride yapılacak patlatmaların en yakın yerleşim yeri olan Yörükkaracaören köyünde oluşturacağı titreşim seviyeleri bu saha için en uygun olan Roy modeli kullanılarak tahmin edilmiştir. Sahada yapılan patlatmalarda kayıt edilen frekans değerleri ortalaması 10,19 Hz'dir. Ülkemiz "Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği"nde tuğla ve beton benzeri evler için bu frekans değerine karşılık izin verilen en yüksek titreşim hızı seviyesi 15 mm/sn'dir. Yapılan tahminlerde kalker ocağının köye en yakın olabileceği konumda (750 m), 150 kg gecikme başına şarj kullanımında dahi maksimum titreşim seviyelerinin yaklaşık 2 mm/sn civarında olacağı belirlenmiştir. Bu değer izin verilen hız limitlerinin oldukça altında kalmaktadır.

Son olarak, patlatma olayı madencilikte süreklilik içeren bir operasyondur. Sürekli genişleyen bir sahada arazi şartlarındaki değişim yeni titreşim ölçümlerinin yapılmasını gerektirebilir. Özellikle kritik projelerde sahaya özgü geliştirilen yayılım eşitliği de yeni ölçülen veriler ile daima güncellenmelidir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2022-2401 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Hakan AK, verilerin toplanması, bilimsel yayın araştırması, istatistiksel analizler, makalenin ve sonuçlarının oluşturulması; Syamsul Hidayat, verilerin toplanması, bilimsel yayın araştırması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Agrawal H, ve Mishra A.K., (2019). Modified scaled distance regression analysis approach for prediction of blast-induced ground vibration in multi-hole blasting, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 11, Issue 1, Pages 202-207.

Ak, H., Iphar, M., Yavuz, M., Konuk, A. (2009). Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(4), 669-676.

Ak, H., ve Konuk, A. (2008). The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: a case study. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 28(9), 686-694.

Aksoy, M., ve Kahriman, A. (2014). Akyol Taş Ocağına Özgün Titreşim Tahmin Formülünün Belirlenmesi, *Yer Bilimleri/Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi*, 35(2), 163-174.

Ambraseys, N. R., Hendron, A. J., (1968). Dynamic behavior of rock masses. in: *rock mechanics in engineering practice*, edi: Stagg, K.G. and O.C. Zeinkiewicz, Wiley, London.

Chandar, K.R., Sastry, V.R., Hegde, C. (2017). A Critical Comparison of Regression Models and Artificial Neural Networks to Predict Ground Vibrations, *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 573-583. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0126-3>

Duvall, W.I., Petkof, B., (1959). Spherical propagation of explosion generated strain pulses in rock, *US Bureau of Mines (USBM)*, RI 5483, Washington D. C.

Erarslan, K., Uysal, Ö., Arpaz, E., Cebi, M. A. (2008). Barrier holes and trench application to reduce blast induced vibration in Seyitomer coal mine. *Environmental Geology*, 54, 1325-1331.

Gözler, M., Cevher, F., Ergül, E., Asutay, H. (1997). Orta Sakarya ve güneyinin jeolojisi, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Rapor No.9973*, Ankara.

Hüdaverdi, T., (2012). Application of multivariate analysis for prediction of blast-induced ground vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 43, Pages 300-308.

Hüdaverdi, T., (2015). Farklı Regresyon Modelleri ile Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntısının Tahmin Edilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (1) , 141-150.

Hüdaverdi, T., ve Akyıldız, Ö., (2018). Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntısının Tahmini ve İnsanlar Üzerindeki Olası Etkilerinin Değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 817-828.

Indian Standards Institute, (1973). Criteria for safety and design of structures subjected to underground blast, *ISI Bulletin IS-6922*.

- Kahrıman, A., Özer, U., Aksoy, M., Karadoğan, A., Tuncer G., (2006). Environmental impacts of bench blasting at Hisarcık Boron open pit mine in Turkey, *Environmental Geology*, 50, 1015–1023.
- Karadoğan, A., Özer, Ü., Kahrıman, A. (2012). Patlatma Kaynaklı Titreşimlerin Tahmini İçin Farklı Kayaların Saha Sabitlerinin Belirlenmesi. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, C, 25, 1.
- Karakuş, D., (2010). Patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin yönsel değişiminin araştırılması, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 12(2), 30-43.
- Konuk, A., Aksoy, M., Ak, H., (2021). Çoklu bağlantı durumunda kentleşme göstergelerinden agrega üretim miktarının tahmini, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 60(2),97-106.
- Langefors, U., Kihlstrom B., (1963). The modern technique of rock blasting, Wiley Publisher, New York, 405p.
- Liang, Q., An, Y., Zhao, L., Li, D., Yan, L., (2011). Comparative study on calculation methods of blasting vibration velocity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44, 93–101.
- Odak Madencilik (2011), İR.200702379 no.lu kapasite artışı kalker ocağı ve kırma eleme tesisi ÇED raporu, Şubat, Eskişehir.
- Ongen, T., Karakus, D., Konak, G., Onur, A. H. (2018). Assessment of blast-induced vibration using various estimation models. *Journal of African Earth Sciences*, 145, 267-273.
- Özer, Ü., Karadoğan, A., Kalaycı, U., Özyurt, M.C., (2014). Bir şehir içi patlatmasında sismik verilerin değerlendirilmesi, *İstanbul Yer Bilimleri Dergisi*, 27(2) 89-101.
- Purtul, E. (2019). Eskişehir-Türkmentokat jeotermal sahasının hidrojeokimyasal incelemesi (Yüksek Lisans Tezi), Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Paswan, R. K., Roy, M. P., Shankar, R., Singh, P. K. (2021). Blast vibration and fragmentation control at heavily jointed limestone mine. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 3469-3485.
- Roy, P. P., (1991). Vibration control in an opencast mine based on improved blast vibration predictors. *mining science and technology*, 12: 157-165.