

**Araştırma / Research**

## PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISININ TAHMİNİ VE İNSANLAR ÜZERİNDEKİ OLASI ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Türker HÜDAVERDİ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-9326-9935)\*  
Özge AKYILDIZ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-5538-4211)

<sup>1</sup>Maden Mühendisliği Bölümü, Maden Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Geliş / Received: 22.02.2018

Kabul / Accepted: 04.05.2018

### ÖZ

Bu çalışma literatürde nispi olarak az yer bulmuş olan patlatma kaynaklı yer sarsıntısının insanlar üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Öncelikle İstanbul bölgesinde bulunan bir agrega ocağında patlatma kaynaklı yer sarsıntısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler kullanılarak dokuz farklı yer sarsıntısı tahmin denklemi oluşturulmuştur. En uygun tahmin denkleminin seçimi için mutlak hata, yüzde hata ve ölçekli hata ölçütleri kullanılmıştır. Küp kök ölçekli mesafe konseptine dayanan denklemin en başarılı denklem olduğu tespit edilmiştir. Seçilen denklem ile mesafelere göre yer sarsıntısı tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilen değerler göz önüne alınarak yer sarsıntısının insanlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yer sarsıntısı seviyelerini değerlendirmek için parçacık hızı, frekans ve sarsıntı süresini birlikte kullanan kriterin daha güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak, kazık çakma faaliyeti için geliştirilen bir yaklaşımın, patlatma kaynaklı yer sarsıntısı değerlendirilirken alternatif olarak kullanılabilmesi öngörülmüştür. Son olarak çalışılan ocakta belirli yer sarsıntısı limit değerlerinin altında kalmak için kullanılacak patlayıcı miktarları hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Patlatma, yer sarsıntısı, insan tepkileri, tahmin hatası

## PREDICTION OF BLAST INDUCED GROUND VIBRATION AND EVALUATION OF PROBABLE HUMAN RESPONSE

### ABSTRACT

This study focuses on a relatively neglected topic of the effect of the blast induced vibrations on humans. The vibration monitoring was performed in an Istanbul region quarry. Nine different predictor equations were created for ground vibration. Absolute errors, percentage errors and scaled errors were applied to determine the most successful equation. The equation, which relies on cube root scaled distance concept, was determined as most successful predictor. The blast vibration was estimated by the selected equation considering the measurement distance. Human response to ground vibration was evaluated based on the predicted values. The criterion, which considers particle velocity, frequency and vibration duration together, was found to be reliable for evaluation. Additionally, a criterion proposed for pile driving was suggested for evaluation of blast induced ground vibration. The amount of maximum instantaneous explosive charge was calculated to meet the requirements of the vibration limits for the studied quarry.

**Keywords:** Blasting, vibration, human response, prediction error

### 1. GİRİŞ

Patlatma operasyonu maden işletmeciliğinde cevher ve örtü kazısı için temel faaliyetlerden biridir. Patlatma faaliyetinin çevresel etkileri arasında yer sarsıntısı, hava şoku, taş savrulması ve zehirli gaz oluşumu sayılabilir.

\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 212 285 63 06; e-mail / e-posta: hudaverdi@itu.edu.tr

T. HÜDAVERDİ, Ö. AKYILDIZ,

Özellikle açık ocak patlatmalarında en önemli çevresel olumsuz etki yer sarsıntısıdır. Yer sarsıntısı atım yapılan noktaya çok uzak mesafelerde dahi etkili olabilmektedir. Yer sarsıntısı kontrolünde her şeyden önce yer sarsıntısının önceden tahmin edilerek önlem alınması önem arz etmektedir.

Patlatma kaynaklı yer sarsıntısı incelenirken frekans, deplasman, ivme gibi farklı büyüklükler ölçülür. Ancak genellikle yer sarsıntısı parçacık hızı değeriyle karakterize edilmektedir. Parçacık hızının birimi milimetre/saniye'dir. Değerlendirmeler yapılırken öncelikle sarsıntı şiddetini etkileyen iki temel büyüklük göz önüne alınır. Bunlar, ölçüm mesafesi (D) ve anlık patlayan maksimum patlayıcı miktardır (W).

Patlatma kaynaklı yer sarsıntısı araştırılırken çoğunlukla sarsıntının yapılara olan etkisine odaklanılmıştır. Yer sarsıntısının insanlar üzerindeki etkisiyle ilgili araştırmalar zorlukları nedeniyle daha nadiren gerçekleştirilmektedir [1]. Türkiye'de mevcut yönetmelik de patlatma kaynaklı yer sarsıntısının yapılara olan etkisini inceleyip sınırlandırmaktadır [2]. Oysaki sürdürülebilir madencilik konsepti çerçevesinde yer sarsıntısının insanlar üzerindeki psikolojik etkisi de değerlendirilmelidir. Gerektiğinde insanların şikâyetleri gözetilerek patlatma tasarımında düzenlemeler yapılmalıdır.

Özellikle Türkçe kaynaklarda da yer sarsıntısının insanlar üzerindeki etkisini (veya insan tepkileri—human response) inceleyen araştırmalar nispeten azdır. Bu çalışma nispeten gözden kaçmış olan patlatmanın insanlar üzerindeki etkisi konusunu detaylı olarak ele almaktadır. Araştırma, yerleşim yerlerine çok yakın olan bir agrega ocağında gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın katkı oluşturmak istediği diğer bir unsur, yer sarsıntısı tahmin denklemlerinin değerlendirme kriterleridir. Yer sarsıntısı tahmin denklemlerinin başarısı birkaç hata kriteri ile üstünlükü değerlendirilmektedir. Bu çalışmada farklı hata ölçütlerinin kullanımı açıklanacaktır.

Araştırma, mümkün olduğunca bütünlük bir yapı üzerine oturtulmaya çalışılmıştır. İstanbul bölgesinde bulunan bir kumtaşı ocağında uzun süreli yer sarsıntısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler kullanılarak farklı uzmanların önerileri doğrultusunda yer sarsıntısı tahmin denklemleri oluşturulmuştur. Denklemlerin başarısı çeşitli hata ölçütleriyle incelenmiş, çalışılan agrega ocağı için en başarılı denklem seçilmiştir. Seçilen denklem ile farklı mesafeler için yer sarsıntısı tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilen yer sarsıntısı seviyelerine insanların göstereceği olası tepkiler literatür ışığında detaylı olarak incelenmiştir. Bu makalenin ilerleyen sayfaları araştırmanın yapısıyla uyumlu bir şekilde düzenlenmiştir.

## 2. ÇALIŞMA SAHASININ TANITIMI VE YER SARSINTISI ÖLÇÜMLERİ

Araştırmaya kaynak teşkil eden ölçümler İstanbul Kemerburgaz Cendere Bölgesi'nde bulunan Akdağlar agrega ocağında gerçekleştirilmiştir. Çalışılan kumtaşı ocağının yıllık üretim kapasitesi 5 milyon tondur. Ocakta üretilen ürün agrega olarak satılmakta, aynı zamanda ocak içinde bulunan beton ve asfalt tesislerinde kullanılmaktadır. Bölgedeki hakim kayaç yapısı Trakya formasyonudur. Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu genel olarak kumtaşı tabakalarından meydana gelmektedir. Bununla birlikte şeyl, silttaşı ve çamurtaşı tabakalarına da rastlanmaktadır. Formasyonun tipik rengi bozunma ve ayrışmaların da etkisiyle koyu gri-yeşil veya gri-kahverengidir. On metre kalınlığa ulaşan yeşil-kahverengi renkli andezitik dayklar sıklıkla görülebilir. Genel olarak denizel kökenli olan formasyonun kalınlığı 600-1700 metre arasında değişmektedir. Trakya formasyonu Hersiniyen ve Alpin orojenezi kaynaklı çatlak sistemleri ile yer yer parçalanmış, bükülmüş ve deforme olmuştur [3-4].

**Tablo 1.** Patlatma tasarımı ve yer sarsıntısı ölçümleri için tanımlayıcı istatistikler

	Min.	Maks.	Değişim aralığı	Medyan	Mod	Ortalama	Standart Sapma	Varyans
B (m)	1,8	2,5	0,7	2,2	2,0	2,18	0,227	0,051
S (m)	2,0	3,0	1,0	2,5	2,5	2,61	0,213	0,045
H (m)	5,5	11,0	5,5	7,0	7,0	7,11	1,134	1,287
PF(kg/m <sup>3</sup> )	0,44	0,99	0,55	0,69	0,69	0,67	0,125	0,016
W (kg)	65,0	164,9	99,9	107,0	142,7	113,8	29,571	874,431
D (m)	55,0	550,0	495,0	135,0	65,0	171,78	119,326	14238,807
ppv (mm/s)	1,8	33,1	31,3	12,25	12,1	13,29	8,699	75,669
Frekans (Hz)	6,8	47,0	40,2	18,15	18,0	19,22	7,249	52,542
Sarsıntı süresi (s)	0,27	1,36	1,09	0,663	0,66	0,70	0,254	0,065

B: Dilim kalınlığı, S: Delikler arası mesafe, H: Basamak yüksekliği, PF: Özgül şarj, W: maksimum anlık patlayıcı miktarı, D: Yer sarsıntısı ölçüm mesafesi, ppv: En yüksek parçacık hızı.

**PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISININ TAHMİNİ VE İNSANLAR ÜZERİNDEKİ OLASI ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Patlatma faaliyetleri ANFO kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Yemleme emülsiyon tip patlayıcıdır. İhtiyaç duyulması durumunda kimi zaman sulu deliklerde ANFO-emülsiyon karışımı kullanılmaktadır. Ateşleme için gecikmeli elektrikli kapsüller kullanılmaktadır. Bu araştırma kapsamında toplam 42 patlatma faaliyeti gözlenmiştir. Patlatma tasarım parametrelerinden dilim kalınlığı (B), delikler arası mesafe (S), basamak yüksekliği (H) ve özgül şarj (PF) ölçümlerine ait detaylı istatistikler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1’de yer sarsıntısı tahmini ile ilgili olarak maksimum anlık şarj miktarı (W), ölçüm mesafesi (D) ve ölçülen en yüksek parçacık hızı (ppv) verilmiştir. Bunlara ek olarak parçacık hızının frekans değeri ve ölçülen sarsıntı süresi de sunulmuştur. Frekans ve sarsıntı süresi değerleri yer sarsıntısının insanlar üzerindeki etkisi değerlendirilirken kullanılacaktır. Yer sarsıntısı büyüklüklerinin ölçümü için en güncel ekipmanlardan olan Instantel Micromate™ model titreşim ölçer kullanılmıştır (Şekil 1). Analizler, 2017 yılında piyasaya sürülen Thor™ yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Titreşim ölçer cihaz yer sarsıntısını 254 mm/s değerine kadar ölçebilmektedir. Parçacık hızının enine, boyuna ve düşey bileşenleri kayıt edilebilmektedir. Ocakta gerçekleştirilen ölçümler sırasında, Uluslararası Patlayıcı Mühendisleri Birliği’nin (ISEE) önerilerine uyulmuştur [5].



**Şekil 1.** Yer sarsıntısı ölçüm cihazının arazide görünümü

### 3. YER SARSINTISI TAHMİN DENKLEMLERİNİN OLUŞTURULMASI

Yer sarsıntısının kestirimi için ölçekli mesafe göz önüne alınarak tahmin denklemleri oluşturulur. Zaman içinde farklı yaklaşımlar önerilse de, ölçekli mesafe konsepti yer sarsıntısı tahmininde temel teşkil etmektedir. Literatürde en sık kullanılan karekök ölçekli mesafe yaklaşımı ABD Madencilik Bürosu (USBM) araştırmacıları tarafından geliştirilmiştir [6]:

$$SD = \frac{D}{\sqrt{W}} \quad (1)$$

Burada  $SD$  ( $m/kg^{1/2}$ ) ölçekli mesafedir.  $D$  ( $m$ ) ölçüm noktası ile patlatmanın yapıldığı lokasyon arasındaki uzaklıktır.  $W$  ( $kg$ ) gecikme başına maksimum anlık patlayıcı miktarıdır. Ölçekli mesafe ile parçacık hızı arasındaki regresyon analizi ile yer sarsıntısı tahmin denklemi oluşturulur:

$$ppv = K(SD)^{-\beta} \quad (2)$$

Bu denklemde  $ppv$  en yüksek parçacık hızıdır.  $K$  ve  $\beta$  arazi sabitleridir. Matematiksel olarak tahmin denklemi, “y” ekseninin parçacık hızını ve “x” ekseninin ölçekli mesafeyi temsil ettiği logaritmik koordinat sisteminde çizilen doğrunun denklemidir.  $K$  sabiti doğrunun y eksenini kestiği noktadır.  $\beta$  ise doğrunun eğimidir [7]. Patlatma tekniği açısından,  $K$  ve  $\beta$ , yerel kayaç özelliklerinin yer sarsıntısı yayılımı üzerindeki etkisini gösterir.

T. HÜDAVERDİ, Ö. AKYILDIZ,

Konya ve Walter [8] arazi sabitlerinin kayaç tipi, yerel jeoloji, tabaka kalınlığı ve diğer bazı faktörler tarafından belirlendiğini belirtir. Persson ve diğ. [9] kayaç özelliklerinin yanı sıra, patlatma geometrisi ve patlayıcı tipinin de  $K$  ve  $\beta$ 'nin değişiminde etkili olabileceğini ifade etmiştir.

Ölçekli mesafe konsepti merkezde kalmak koşuluyla farklı araştırmacılar denklemlere farklı yorumlar getirmişlerdir. Ambraseys & Hendron [10] küp kök ölçekli mesafe denklemini ortaya koymuştur (Tablo 2). Langefors & Kihlstrom [11] ile Indian Standard'ın [12] ölçekli mesafe yorumları farklıdır. Ghosh & Daemen [13] ve Gupta ve diğ. [14] denkleme bir inelastik yayılma faktörü ( $\alpha$ ) eklemişler ve denklemleri çok değişkenli hale getirmişlerdir. Bu denklemler de ölçekli mesafe kavramına dayanmaktadır. Bu çalışmada göz önüne alınan tüm yer sarsıntısı tahmin denklemleri Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Farklı araştırmacılar tarafından önerilen yer sarsıntısı tahmin yaklaşımları

<b>USBM [6]</b>	$ppv = K \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-\beta}$
<b>Ambraseys &amp; Hendron [10]</b>	$ppv = K \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{\beta}$
<b>Langefors &amp; Kihlstrom [11]</b>	$ppv = K \left( \frac{W}{D^{3/2}} \right)^{\beta}$
<b>Indian standard [12]</b>	$ppv = K \left( \frac{W^{3/2}}{D} \right)^{\beta}$
<b>Ghosh and Daemen I [13]</b>	$ppv = K \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{\beta} e^{-\alpha D}$
<b>Ghosh and Daemen II [13]</b>	$ppv = K \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{\beta} e^{-\alpha D}$
<b>Gupta ve diğ. I [14]</b>	$ppv = K \left( \frac{W}{D^{3/2}} \right)^{\beta} e^{-\alpha D}$
<b>Gupta ve diğ. II [14]</b>	$ppv = K \left( \frac{W^{3/2}}{D} \right)^{\beta} e^{-\alpha D}$
<b>Gupta ve diğ. III [15]</b>	$ppv = K \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{\beta} e^{-\alpha(D/W)}$

Tablo 1'de detaylı istatistiksel değerleri verilen atımlar kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizi sonucunda elde edilen denklem katsayıları Tablo 3'de toplu halde sunulmuştur. Analiz için SPSS 19 yazılımı kullanılmıştır. Denklemlerin determinasyon katsayıları ( $R^2$ ) birbirlerine son derece yakındır. En yüksek  $R^2$  değeri, Ghosh and Daemen I-II [13] denklemleri için elde edilmiştir.

**Tablo 3.** Regresyon analizi sonucu hesaplanan denklem katsayıları

	<b>K</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
USBM [6]	347,35	-1,358		0,768
Ambraseys & Hendron [10]	881,29	-1,319		0,766
Langefors & Kihlstrom [11]	125,23	1,8424		0,761
Indian standard [12]	125,23	1,3818		0,761
Ghosh and Daemen I [13]	442,7	-1,494	0,001	0,770
Ghosh and Daemen II [13]	1728	-1,584	0,001	0,770
Gupta ve diğ. I [14]	118,3	1,760	0,000	0,761
Gupta ve diğ. II [14]	118	1,322	0,000	0,760
Gupta ve diğ. III [15]	397,4	-1,441	0,055	0,769

*PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISININ TAHMİNİ VE İNSANLAR ÜZERİNDEKİ OLASI ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ*

**4. TAHMİN DENKLEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE UYGUN DENKLEMİN SEÇİMİ**

Elde edilen formüllerin başarısını incelemek ve en uygun denklemi seçmek için farklı hata analiz ölçütleri kullanılmıştır. Patlatma kaynaklı yer sarsıntısı tahmin çalışmalarında sıklıkla rastlanan önemli eksiklik, hata analizinin üstün körü, bir veya birkaç hata ölçüm tekniğiyle gerçekleştirilmesidir. Bu çalışmada öncelikle lietratürde sıklıkla kullanılan mutlak hata ölçüleri kullanılmıştır. Ek olarak, üç farklı yüzde hata değerlendirme yapılmıştır. Son yıllarda literatürde yer edinen, Hyndman ve Koehler’in [16] önerdiği ölçekli hata kriterleri de hata analizine eklenmiştir. Bütün hata ölçüm yaklaşımları Tablo 4’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Her hata ölçüm kriterinin bir diğerine göre üstünlükleri ve eksiklikleri mevcuttur [17]. Farklı hata kriterlerinin kullanımı analizin güvenilirliğini artıracaktır.

**Tablo 4.** Hata ölçüm yaklaşımları

Hata sınıfı	Hata tipi	Formül
Mutlak Hata	Ortalama Mutlak Hata [18]	$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  m_i - p_i $
	Medyan Mutlak Hata [18]	$MMH = \text{medyan}_{i=1,n}  m_i - p_i $
	Ortalama Karekök Hata [18]	$OKH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - p_i)^2}$
Yüzde Hata	Ortalama Mutlak Yüzde Hata [19]	$OMYH = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ m_i - p_i }{m_i}$
	Medyan Mutlak Yüzde Hata [19]	$MMYH = 100 \text{median}_{i=1,n} \frac{ m_i - p_i }{m_i}$
	Ortalama Karekök Yüzde Hata [19]	$OKYH = 100 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i - p_i}{m_i}\right)^2}$
Ölçekli Hata	Ortalama Mutlak Ölçekli Hata [16]	$OMÖH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ m_i - p_i }{\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n  m_i - m_{i-1} }$
	Ortalama Karekök Ölçekli Hata [16]	$OKÖH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{ m_i - p_i }{\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n  m_i - m_{i-1} }\right)^2}$
m <sub>i</sub> =Ölçülen parçacık hızı değeri (mm/s), p <sub>i</sub> =Tahmin edilen parçacık hızı değeri (mm/s), n=Ölçüm sayısı		

Tablo 5’de yer sarsıntısı tahmin formülleri için hesaplanan hata değerleri verilmiştir. Son sütunda bulunan “≤2 mm/s tahmin hatası”, denklemlerin 2 mm/s’den daha düşük hata ile gerçekleştirdiği tahmin sayısını vermektedir. En düşük *ortalama mutlak hata* (OMH) Ambraseys & Hendron [10] denklemi ile 3,60 olarak elde edilmiştir. Mutlak hata açık bir şekilde yapılan hatanın büyüklüğünü vermektedir. Bununla birlikte aşırı değerlerden yüksek seviyede etkilenmektedir. Yüzde hata, hesaplanan hatayı yüzde olarak ifade ettiği için sıradan kullanıcılar için daha tercih edilir bir ölçüttür. Tablo 5 incelendiğinde genel olarak *medyan yüzde hatanın* (MMYH) *ortalama mutlak yüzde hatadan* (OMYH) daha düşük değerlere sahip olduğu görülür. *Ortalama mutlak ölçekli hatanın* (OMÖH) değişim aralığı oldukça dardır (0,43–0,45). Başarılı denklemlerde OMÖH 0,43 değerindedir. En başarısız denklemlerde 0,45 değerini almıştır. Bununla beraber, hassas bir değerlendirme için ölçekli hata yeterli olmayabilir. Örneğin mutlak hata ve yüzde hata değerlerine bakıldığında Gupta ve diğ. III [15] denklemi Gupta ve diğ. I [14] denkleminden büyük ölçüde daha başarılıdır. Gupta ve diğ. III [15] denklemi 14 tahmini 2 mm/s’den küçük hata ile gerektirmişken; bu değer Gupta ve diğ. I [14] denklemi için 12’dir. Buna karşın ortalama mutlak ölçekli hata her iki denklem için de 0,44’dür. Dokuz farklı hata kriteri göz önüne alındığında en başarılı formüllerin USBM [6] ve Ambraseys & Hendron [10] formülleri olduğu görülmektedir. Yapılan denemelerde her iki denklemin de birbirine yakın tahminlerde bulunduğu tespit edilmiştir. Göreceli olarak

T. HÜDAVERDİ, Ö. AKYILDIZ,

literatürde daha az yer bulmuş olan ve daha yeni tarihli olan Ambraseys & Hendron [10] denkleminin seçilmesine karar verilmiştir.

**Tablo 5.** Denklemler için hesaplanan hata değerleri

	Mutlak Hata			Yüzde Hata (%)			Ölçekli Hata		≤2 mm/s tahmin hatası
	OMH	MMH	OKH	OMYH	MMYH	OKYH	OMÖH	OKÖH	
USBM [6]	3,62	2,72	4,48	35,73	32,96	43,61	0,43	0,53	13
Ambraseys & Hendron [10]	<b>3,60</b>	<b>2,77</b>	<b>4,50</b>	<b>35,60</b>	<b>32,57</b>	<b>43,97</b>	<b>0,43</b>	<b>0,54</b>	<b>14</b>
Langefors & Kihlstrom [11]	3,69	2,47	4,57	36,47	31,31	44,79	0,44	0,55	14
Indian standard [12]	3,69	2,47	4,57	36,45	31,35	44,75	0,44	0,55	14
Ghosh and Daemen I [13]	3,76	2,90	4,58	38,54	29,43	48,48	0,45	0,55	12
Ghosh and Daemen II [13]	3,73	2,91	4,78	33,31	31,57	39,02	0,45	0,57	14
Gupta ve diğ. I [14]	3,67	2,98	4,49	38,95	29,15	50,04	0,44	0,54	12
Gupta ve diğ. II [14]	3,67	2,90	4,49	38,69	29,25	49,50	0,44	0,54	13
Gupta ve diğ. III [15]	3,66	2,73	4,53	35,70	32,63	43,47	0,44	0,54	14

Bu noktadan sonra gerçekleştirilecek hesaplamalarda Ambraseys & Hendron'un [10] küp kök ölçekli mesafeye dayanan denklemi kullanılacaktır. Bu denklem yoluyla farklı mesafeler için yer sarsıntısı seviyeleri hesaplanacaktır. Hesaplanan yer sarsıntısı seviyelerinin insanlar üzerindeki etkisi farklı yaklaşımlar kullanılarak incelenecektir.

## 5. YER SARSINTISINA İNSAN TEPKİLERİNİN İNCELENMESİ

İnsanlar düşük seviyedeki yer sarsıntısı seviyelerini rahatlıkla algılayabilirler. Yer sarsıntısının değerlendirilmesinde yine en önemli parametre en yüksek parçacık hızıdır. Bununla birlikte, sarsıntı süresi ve sarsıntının frekans değerlerini göz önüne alan yorumlar da yapılmıştır. Yer sarsıntısı seviyelerinin insanlar üzerindeki etkileri ISEE [20], Konya & Walter [8] ve Oriard & Emmert'in [21] çalışmaları göz önüne alınarak Tablo 6'da sunulmuştur. Burada özellikle hissedilebilir seviye önem kazanmaktadır. Yer sarsıntısı için hissedilebilir seviye 0,51 mm/s'dir. Konya & Walter [8] hissedilir, sorun yaratabilir ve tahammül sınırı olmak üzere üç değer üzerinden insan tepkilerini incelerken; Oriard & Emmert'in [21] araştırması hissedilebilir seviyeyi kendi içinde üçe bölerek 7 farklı limit önermiştir. Buna karşın her iki araştırmacının düşük seviye için sınır değerleri birbiriyle uyumludur. Yalnızca tahammül sınırı olarak nitelenen değerde Konya & Walter [8] daha muhafazakâr davranmış, Oriard ve Emmert'in [21] 30,5 mm/s önerisine karşın 17,8 mm/s değerini önermiştir.

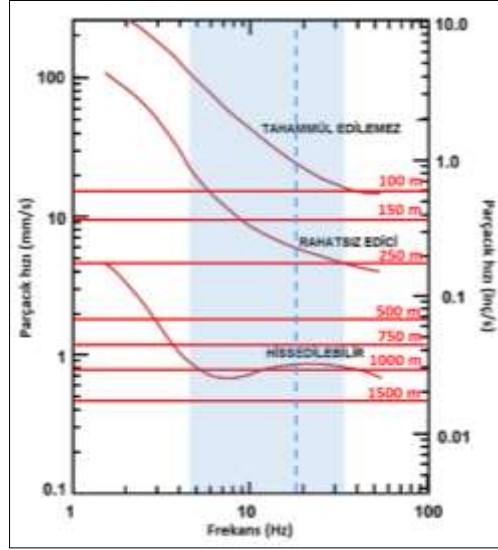
**Tablo 6.** Yer sarsıntısı seviyelerinin insanlar üzerindeki etkileri

	ISEE [13]	Konya & Walter [8]	Oriard & Emmert [21]
Güçlülkle hissedilir			0,25 mm/s
Hissedilir	0,51 mm/s	0,51 mm/s	
Rahatlıkla hissedilir			1,5 mm/s
Şiddetle hissedilir			2,5mm/s
Sorun yaratabilir		5,1 mm/s	
Rahatsız edici			10,2 mm/s
Çok rahatsız edici			25,4 mm/s
Tahammül sınırı		17,8 mm/s	30,5 mm/s
Fiziksel zarar risk başlangıcı			50,8 mm/s

Bundan sonraki incelemeler grafikler üzerinden gerçekleştirilecektir. Şekil 2'deki grafik parçacık hızı ve frekansı göz önüne alan bir değerlendirme sunmaktadır. Bu grafik ilk defa ABD ordusu mühendisleri tarafından önerilmiştir [22]. Şekil 2'deki inceleme tekniği diğer grafiklerde de aynı şekilde uygulanmaktadır. Kırmızı çizgiler farklı mesafeler için Ambraseys & Hendron [10] denklemi ile hesaplanan parçacık hızı (ppv)

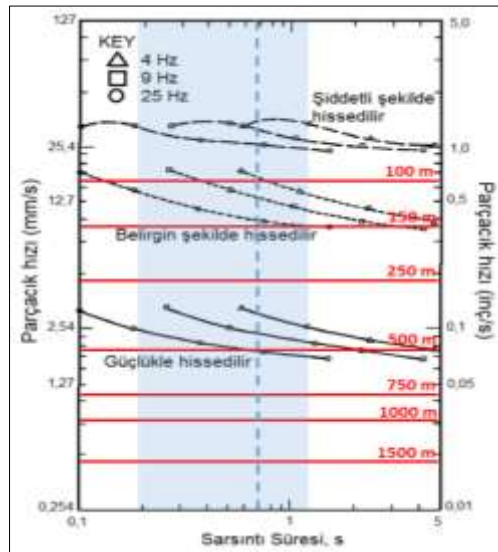
*PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISININ TAHMİNİ VE İNSANLAR ÜZERİNDEKİ OLASI ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ*

seviyelerini göstermektedir. Dikey mavi kesikli çizgi ölçülen ortalama frekans değeridir (Tablo 1). Açık mavi alan ölçülen frekansların %95 güven aralığına göre alabileceği değerleri göstermektedir.



**Şekil 2.** Frekans ve parçacık hızını göz önüne alan bir değerlendirme

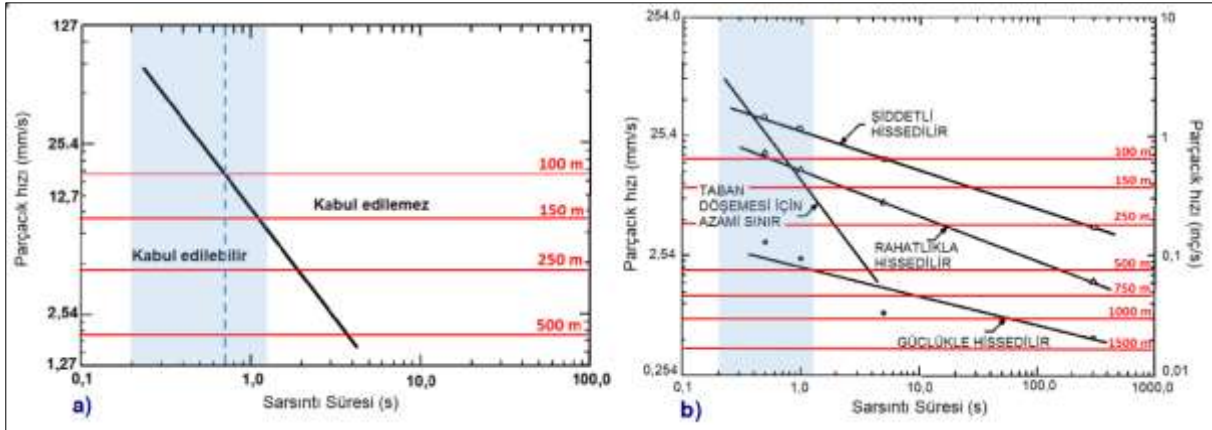
Yüz metre mesafe için hesaplanan sarsıntı seviyesi 16,26 mm/s'dir. Buna göre, ortalama frekans değeri gözetilirse 100 m gibi kısa mesafede dahi tahammül edilemez bir yer sarsıntısı oluşmamaktadır. 150-250 m arasında rahatsız edici bir yer sarsıntısının oluşması mümkündür. Bir kilometre mesafe için hesaplanan parçacık hızı 0,78 mm/s'dir. Beklenen frekans aralığı gözetilirse gerçekleştirilen atımlar büyük ihtimalle 1 km mesafede dahi hissedilir olacaktır. Şekil 3'de daha karmaşık bir değerlendirme sunulmaktadır. Bu değerlendirmeye kaynak oluşturan olan temel araştırma Wiss ve Parmelee'ye [23] aittir. Daha sonra Siskind ve diğ. [24] tarafından geliştirilmiştir. Şekil 3'de yer sarsıntısına insan tepkileri incelenirken parçacık hızı, frekans değerleri ve sarsıntı süresi birlikte kullanılmaktadır. Mavi kesikli çizgi ortalama sarsıntı süresidir. Açık mavi taraflı alan ölçülen sarsıntı süresinin %95 güven aralığına göre alabileceği değerleri göstermektedir. Bu araştırmaya göre ocakta gerçekleştirilen atımlar 100 metre mesafede dahi şiddetle hissedilir bir yer sarsıntısı oluşturmamıştır. 100-150 m mesafe aralığında (9,53–16,26 mm/s) belirgin şekilde hissedilme olasılığı mevcuttur. Bu değerlendirme, Şekil 2'deki değerlendirmeye göre daha ılımlıdır. 750 metrede dahi yer sarsıntısı seviyeleri insanlar tarafından hissedilemez bir seviyeye düşmektedir.



**Şekil 3.** Parçacık hızı, sarsıntı süresi ve frekansı esas alan değerlendirme

T. HÜDAVERDİ, Ö. AKYILDIZ,

Şekil 4’de iki farklı araştırma sunulmaktadır. Bu araştırmalar frekans değerini kullanmamakta, parçacık hızı ve sarsıntı süresi üzerinden yorumda bulunmaktadır. Şekil 4a temel olarak Murray’ın [25] ölçümlerine dayanmaktadır. Murray [25] beton zeminde meydana gelen titreşimlere insanların verdiği tepkiyi incelemiştir. Bu amaçla 91 adet ölçüm gerçekleştirmiştir. Siskind ve diğ. [24] Murray’ın [25] ölçümlerini Wiss ve Parmelee’nin [23] verileriyle birleştirmiş ve çeşitli dönüşüm formülleri ve regresyon analizi yardımıyla Şekil 4a’daki grafiği ortaya koymuşlardır. Burada da göz önüne alınan parametreler parçacık hızı ve zamandır.



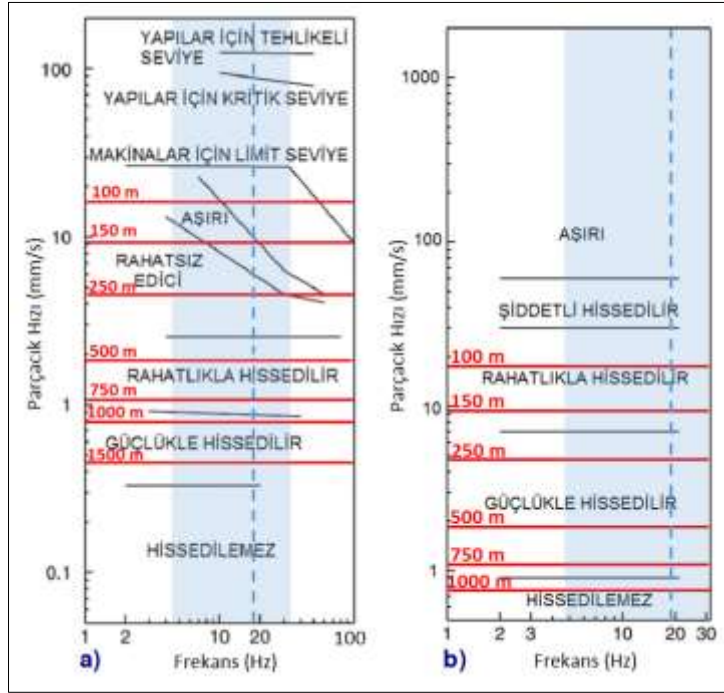
Şekil 4. Parçacık hızı ve sarsıntı süresini göz önüne alan iki farklı kriter

Şekil 4a nispeten basit bir değerlendirmedir. Yer sarsıntısı seviyeleri etki süreleri gözetilerek kabul edilebilir ve kabul edilemez şeklinde ikiye ayrılmıştır. Ortalama ölçülen sarsıntısı süresi gözetilirse (0,7 saniye), yaklaşık 100 m mesafeden sonra (16,26 mm/s) oluşan yer sarsıntısı seviyeleri kabul edilebilir bulunmuştur. Burada Murray’ın [25] hissedilebilir seviyeye odaklanmadığına dikkat edilmelidir. Sınır değer gibi görülen 16,26 mm/s değeri, Tablo 1’de verilen Konya & Walter’ın [8] tahammül sınırı değerine ( 17,8 mm/s) çok yakındır. Şekil 4b ise farklı araştırmacıların çalışmaları bir araya getirilerek oluşturulmuştur [24]. Burada görüldüğü üzere sarsıntı süresi ne olursa olsun güçlükle hissedilir seviye 2,54 mm/s’nin altındadır. 1500 metreden sonra (0,46 mm/s) yer sarsıntısı hissedilemez duruma gelmektedir. Bu sonuç, Şekil 2 ve 3’de ortaya konan frekans değerini de gözetilen yaklaşım ile uyumludur.

Bu kısımda, farklı titreşim kaynakları için geliştirilen yer sarsıntısı kriterlerinin patlatma kaynaklı yer sarsıntısı için kullanılabilirliği araştırılacaktır. Benzeri incelemeler Bommer ve diğ. [26] ve Majer ve diğ. [27] tarafından da gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada kullanılan titreşim ölçer ekipman benzeri cihazlar patlatmanın yanı sıra trafik, kazık çakma ve belirli inşaat faaliyetlerinden kaynaklanan yer sarsıntısını da ölçebilmektedir [28]. Şekil 5a Barneich [29] tarafından araç trafiği kaynaklı yer sarsıntısını incelemek için önerilmiştir. Şekil 5b kazık çakma faaliyetinin oluşturduğu titreşim seviyesini değerlendirmek için Athanasopoulos ve Pelekis [30] tarafından ortaya konmuştur. Bu grafiklerde de belirli mesafeler için hesaplanan yer sarsıntısı seviyeleri kırmızı yatay çizgiler ile gösterilmiştir. Trafik değerlendirmesi gerçekleştiren grafiğe göre, 500 ve 750 metreler için ortaya çıkan değerler (1,95 ve 1,14 mm/s) rahatlıkla hissedilebilecek düzeydedir. Bu sonuç Şekil 3’de patlatma için ortaya konan limit değerlerle belirli ölçüde çelişmektedir. Trafik grafiğinin (5a) patlatma kaynaklı yer sarsıntısını inceleyen grafiklerden temel farkı uzak mesafede oluşan titreşimlerle ilgilidir. Şekil 5a’ye göre 1500 m için tahmin edilen 0,46 mm/s değerinin bile hissedilebilme olasılığı mevcuttur. Buna karşın kazık çakma değerlendirmesi (5b) 500-750 m için hesaplanan değerleri güçlükle hissedilebilir olarak nitelemiştir. Kazık çakma grafiği uzak mesafeler için patlatma kaynaklı titreşimi inceleyen grafiklerle daha uyumludur. Yaklaşık 1 km mesafede yer sarsıntısı (0,78 mm/s) hissedilemez durumu gelmektedir.

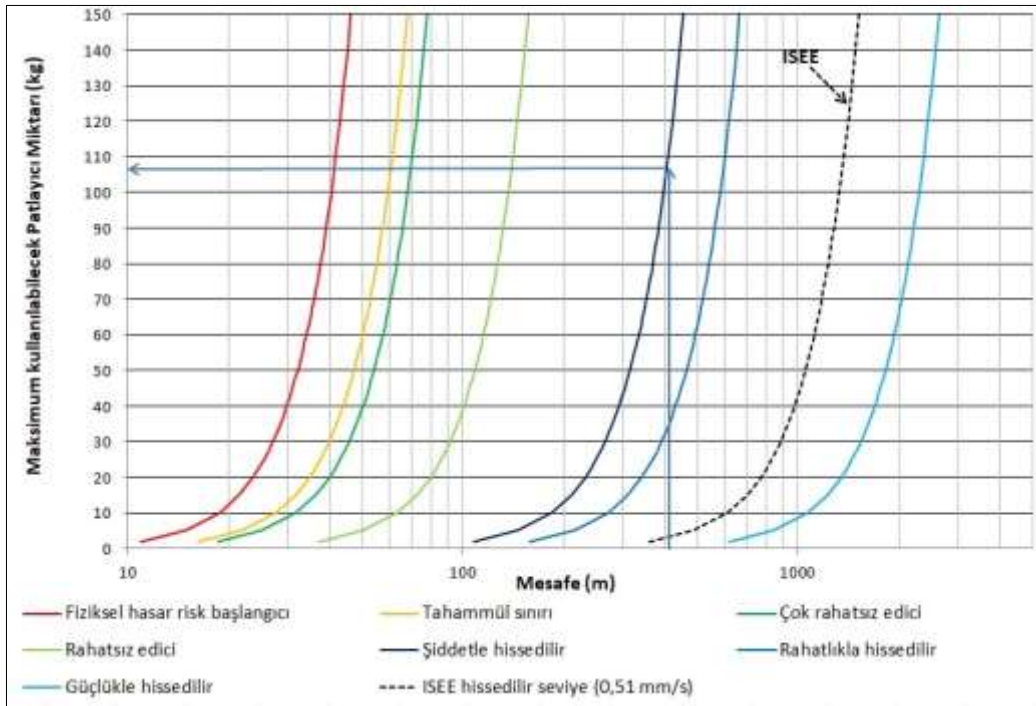


*PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISININ TAHMİNİ VE İNSANLAR ÜZERİNDEKİ OLASI ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ*



**Şekil 5.** Parçacık hızı ve frekans değerini göz önüne alan iki farklı kriter

Patlatma sırasında oluşacak yer sarsıntısının değerlendirilmesinin yanı sıra, ocakta çalışan mühendisler için pratik grafiklerin üretilmesinde de fayda vardır. Şekil 6’da sunulan grafik belirli yer sarsıntısı seviyeleri için patlatılabilecek maksimum patlayıcı miktarını vermektedir.



**Şekil 6.** Mesafelere göre gecikme başına kullanılabilir maksimum patlayıcı miktarı

Bu tür grafikler yardımıyla, hassas bir durumda ne kadar patlayıcı kullanılabileceği kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Şekil 6, Tablo 2’de sunulan Oriard & Emmert’in [21] önerdiği tepe değerler kullanılarak

T. HÜDAVERDİ, Ö. AKYILDIZ,

çizilmiştir. Ek olarak, ISEE'nin hissedilebilir seviyesi (0,51 mm/s) için oluşturulan eğri, grafiğe eklenmiştir. Sunulan grafik çalışılan ocağa özgüdür. Grafik ocak için geliştirilen Ambraseys & Hendron [10] denklemi kullanılarak hazırlanmıştır. Burada örnek olarak ocak idare binası için bir değerlendirme yapılmıştır. Ocak idari binalarının güneydoğu basamaklarında gerçekleştirilen atım noktasına uzaklığı yaklaşık 405 metredir. 405 m mesafeden çizilen dikey bir çizgi koyu lacivert renkli eğri ile kestirilip "y" eksenine gidilirse; şiddetle hissedilebilir seviyenin altında titreşim oluşturmak için, maksimum 107 kg anlık patlayıcı şarjı kullanılabileceği görülebilir. Çalışanların rahatsız olmaması için patlayıcı miktarı hesaplanan seviyenin altında olmalıdır. Bu örnek Şekli 6'da mor renkli oklar ile gösterilmiştir.

## 6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Patlatma kaynaklı yer sarsıntısının tahmini ve sarsıntının insanlar üzerindeki etkisi bu çalışmada bütünlük olarak değerlendirilmiştir. Yapılan literatür incelemeleri 0,51 mm/s civarı değerlerin insanlar için hissedilebilir seviye olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte sorun yaratabilir seviye ve rahatsız edici seviye konusunda tam bir uzlaşma söz konusu değildir. Yer sarsıntısı tahmini için ölçekli mesafeye dayanan en az üç denklemin denenmesi genel olarak önerilebilir. Bu çalışmada Ambraseys & Hendron [10] denklemi kullanılmıştır. Bununla birlikte literatürde sıklıkla kullanılan USBM [10] denklemi bu çalışmada da başarısını ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, mutlak hata ve yüzde hatanın yanı sıra ölçekli hatanın kullanımı da önerilmiştir. Nispeten yeni bir kriter olan ölçekli hata, patlatma kaynaklı yer sarsıntısının değerlendirmesinde son derece başarılıdır. Ancak, ölçekli hata değerlerinin değişim aralığı mutlak hata ve yüzde hataya göre daha dardır. Örneğin mutlak ölçekli hata 43, 44 ve 45 değerlerini almıştır. Bu durum tahmin denklemlerinin hassas olarak değerlendirilmesinde güçlük yaratabilir. Farklı hata sınıflarına ait hata ölçütleri birlikte kullanılmadan uygun tahmin denklemi seçimi yapılmamalıdır.

Sarsıntının insanlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için, yalnızca parçacık hızını, parçacık hızı—frekans ikilisini veya parçacık hızı, frekans ve titreşim süresini göz önüne alan yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımların hepsine örnek verilmiştir. Wiss ve Parmelee'nin [23] temelini oluşturduğu Şekil 3'de sunulan değerlendirme nispeten daha güvenlidir. Bu kriter parçacık hızı, frekans ve sarsıntı süresini birlikte kullanarak yorumda bulunmaktadır. Yer sarsıntısının insanlar üzerindeki etkisini inceleyen araştırmalar nispeten az olduğu için Şekil 5'de sunulan ek kriterler de çalışılan ocaklar için incelenmiştir. Şekil 5'de sunulan kriterler kazık çakma ve trafik kaynaklı yer sarsıntısını değerlendirmek için geliştirilmiştir. Bu iki yaklaşımdan özellikle kazık çakma için geliştirilen grafiğin patlatma kaynaklı yer sarsıntısını değerlendirmek için alternatif olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Agrega ocakları şehirlerin içinde olduğu için çevre yerleşimciler ile ilgili yer sarsıntısı değerlendirmesi önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, yer sarsıntısı konusu araştırılırken, operasyonel büyüklüklerin frekans değerleri ve sarsıntı süresi üzerinde etkisinin olabileceği göz önüne alınmalıdır. Geniş deliklerle oluşturulan yüksek şarjlar daha uzun süre hissedilebilir sarsıntı oluşturabilir. Kömür madeni gibi 200 mm ve üzeri delik çapları kullanılan ocaklarda daha düşük frekansların meydana çıkması beklenebilir. Burada agrega ocakları için gerçekleştirilen çalışma, büyük açık ocaklar veya kömür ocaklarında tekrarlanmalıdır.

Bu çalışmada ortaya konduğu üzere, araştırmacıların insan tepkileriyle ilgili birbirleriyle uyumlu yorumları olduğu gibi; birbirleriyle çelişen fikirleri de mevcuttur. Ölçülen veya tahmin edilen yer sarsıntısı seviyeleri mutlaka farklı kriterler gözetilerek değerlendirilmelidir. Son olarak, patlatma kaynaklı yer sarsıntısı konusunda sosyal çevre ile ilişkilerin çok önemli olduğunu belirtmekte fayda vardır. Elde edilen sonuçlar uygun anlatım yöntemleri kullanılarak ocakların çevresindeki yerleşimcilerle paylaşılmalıdır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma İTÜ Rektörlüğü tarafından "Basamak Patlatmasında Patlatma Verimliliği ile Çevresel Etkiler Arasındaki İlişkinin İncelenmesi (MGA-2017-40581)" projesi ile ve kısmen TÜBİTAK tarafından "Atım Şekli ve Büyüklüğü, Serbest Yüzeyin Durumu ve Katılık Oranı Parametrelerinin Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntısına Etkisinin Araştırılması (217M071)" adlı proje ile desteklenmiştir. Destekleyen kuruluşlara teşekkür ederiz.

*PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISININ TAHMİNİ VE İNSANLAR ÜZERİNDEKİ OLASI ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ*

**KAYNAKLAR**

- [1] PENG, Y., WENBO, L., JING, Z., YUJUN, Z., MING, C., “Evaluation of Human Response to Blasting Vibration From Excavation of a Large-Scale Rock Slope: A Case Study”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16, 435-446, 2017.
- [2] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği, Resmi Gazete Sayısı: 27601, Ankara, Türkiye, 2010.
- [3] EROSKAY, S.O., “Graywackes of Istanbul Region”, *Proceedings of the International Symposium on Design of Supports to Deep Excavations*, 41-44. Istanbul, Turkey, 1985.
- [4] TUĞRUL, A., UNDUL, O., “Engineering Geological Characteristics of Istanbul Greywackes”, *Proceedings of the 10th International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Congress*, Paper no. 395. Nottingham, United Kingdom, 2006.
- [5] ISEE, *Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs*, International Society of Explosives Engineers, Cleveland, USA, 2015.
- [6] DUVALL, W.I., PETKOF, B., *Spherical Propagation of Explosion Generated Strain Pulses in Rock*, RI 5483, US Bureau of Mines, Washington DC, USA, 1959.
- [7] MORHARD, R.C., CHIAPPETTA, R.F., BORG D.G., *Explosives and Rock Blasting*, Atlas Powder Co., Dallas, USA, 1987.
- [8] KONYA, C.J., WALTER, E.J., *Rock Blasting and Overbreak Control*, Precision Blasting Services, Montville, USA, 1991.
- [9] PERSSON, P.A., HOLMBERG, R., Lee J., *Rock Blasting and Explosives Engineering*, CRC Press, Boca Raton, Fla, USA, 1993.
- [10] AMBRASEYS, N.R., HENDRON, A.J., *Dynamic Behaviour of Rockmasses*. In: K.G. Stagg, O.C. Zienkiewicz (Eds.), *Rock Mechanics in Rock Mechanics in Engineering Practice* (pp. 203–207), Wiley, London, UK, 1968.
- [11] LANGEFORS, U., KIHLMSTROM, B., *The Modern Technique of Rock Blasting*, Wiley, New York, USA, 1963.
- [12] Indian Standard IS, *Criteria for Safety and Design of Structures Subjected to Underground Blast*, Bulletin No: IS-6922, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 1973.
- [13] GHOSH, A., DAEMEN, J.K., “A Simple New Blast Predictor of Ground Vibrations Induced Predictor”, *Proceedings of the 24th US Symposium on Rock Mechanics*, 151-161. Texas, USA, 1983.
- [14] GUPTA, R.N., ROY, P.P., BAGACHI, A., SINGH, B., “Dynamic Effects In Various Rock Mass And Their Predictions”, *J Mines Met Fuel*, 35, 455-462, 1987.
- [15] GUPTA, R.N., ROY, P.P., SINGH, B., “On a Blast Induced Blast Vibration Predictor for Efficient Blasting”, *Proceedings of the 22nd International Conference of Safety in Mines*, 1015-1021. Beijing, China, 1988.
- [16] HYNDMAN, R.J., KOEHLER, A.B., “Another Look at Measures of Forecast Accuracy”, *International Journal of Forecasting*, 22, 679–688, 2006.
- [17] HÜDAVERDİ, T., AKYILDIZ, O., “Investigation of the Site-Specific Character of Blast Vibration Prediction”, *Environmental Earth Sciences*, 76, 138, 2017.
- [18] SHCHERBAKOV, M.V., BREBELS, A., SHCHERBAKOVA, N.L., TYUKOV, A.P., JANOVSKY, T.A., KAMAIEV, V.A., “A Survey of Forecast Error Measures”, *World Applied Sciences Journal*, 24, 171-176, 2013.
- [19] MAKRIDAKIS, S., HIBON, M., “Evaluating Accuracy (or Error) Measures”, *INSEAD Working Paper Series*, 18, 1-31, 1995
- [20] ISEE, *ISEE Blaster’s Handbook*, 18th Edition, International Society of Explosive Engineers, Cleveland, Ohio, USA, 2011.
- [21] ORIARD, L.L., EMMERT, M.W., “Short-delay Blasting at Anaconda’s Berkeley Open-pit Mine”, *Proceedings of the AIME Annual Meeting*, 60-80. Las Vegas, USA, 1980.
- [22] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, *Systematic Drilling and Blasting For Surface Excavations*, Engineer manual 1110-2-3800, Department of the Army, Washington DC, USA, 1974.
- [23] WISS, J.F., PARMELEE, R.A., “Human Perception of Transient Vibrations”, *Journal of the Structural Division, ASCE*, 100, 773-787, 1974.
- [24] SISKIND, D.E., STAGG, M.S., KOPP, J.W., DOWDING, C.H., *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting*, Report of Investigations 8507, US Bureau of Mines, Washington, DC, USA, 1980.
- [25] MURRAY, T.M., “Acceptability Criteria for Occupant-Induced Floor Vibrations”, *Sound and Vibration*, 13, 24-30, 1979.

*T. HÜDAVERDİ, Ö. AKYILDIZ,*

- [26] BOMMER, J.J., OATES, S., CEPEDA, J.M., LINDHOLM, C., BIRD, J., TORRES, R., MARROQUIN, G., RIVAS, J., “Control of Hazard Due to Seismicity Induced by a Hot Fractured Rock Geothermal Project”, *Engineering Geology*, 83, 287-306, 2006.
- [27] MAJER, E.L., BARIA, R., STARK, M., OATES, S., BOMMER, J., SMITH, B., ASANUMA, H., “Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems”, *Geothermics*, 36, 185–222, 2007.
- [28] INSTANTEL, *Micromate Operator Manual* (6th ed.), Instantel Inc., Ottawa, Canada, 2017.
- [29] BARNEICH, J., “Vehicle Induced Ground Motion, Vibration Problems in Geotechnical Engineering”, *Proceedings of the Symposium by the Geotechnical Engineering Division in conjunction with the ASCE Convention*, 187-202. Detroit, USA, 1985.
- [30] ATHANASOPOULOS, G.A., PELEKIS, P.C., “Ground Vibrations From Sheetpile Driving in Urban Environment: Measurements, Analysis and Effects on Buildings and Occupants”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 371-387, 2000.