

Taş Ocağında Patlatılmalı Kazı Kaynaklı Zemin Titreşimleri, Hava Şoku ve Şev Duraylılığının İncelenmesi: Örnek Bir Uygulama

İbrahim Çavuşoğlu^{1,*}, Selçuk Alemdağ²

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane.

²Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane.

Özet

Bu çalışma kapsamında, Trabzon ili Araklı ilçesinde faaliyet gösteren bir taşocağında gerçekleştirilen patlatılmalı kazıların çevresel etkileri, kazı sonrası ve sismik yük etkisindeki duraylılığı ve buna ek olarak özellikle en yakın yerleşim yerinde oluşturabileceği titreşim ve hava şoku değerlendirilmiştir. Arazi çalışmaları sürecinde, InstanTEL Micromate marka sismograf ile beş farklı patlatma sırasında ölçümler alınmış ve veriler analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, 2022 yılında yenilenen “Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği” (ÇGKY) kapsamında maden ve taş ocakları için belirlenen yeni sınır değerlerle karşılaştırılmış; ayrıca eski Türk standardı, USBM RI 8507 (USA) ve DIN 4150-3 (Alman) standartlarıyla karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, ölçülen yer sarsıntısı ve hava şoku düzeylerinin her bir patlatma için ilgili yönetmelik sınırlarının altında kaldığı, arazide yapılan gözlemler sonucunda da en yakın yerleşim alanlarındaki yapılarda yapısal hasara yol açmayacağı belirlenmiştir. Karşılaştırmalı analizler ise yeni Türk standardı ile DIN 4150-3 ve USBM standartlarının daha koruyucu yaklaşımlar sunduğunu göstermiştir. Taş ocağı işletmesi için tasarlanan şev geometrisi kazı sonrası mevcut durumda ve sismik yük etkisinde duraylılık değerlendirmesi yapılmış ve güvenlik sayısının $SRF > 1.5$ olduğu belirlenmiştir. Böylece duraylılık değerlendirmesinde elde edilen güvenlik sayısı ve deformasyonlar, işletme sınırlarında yapılacak patlatılmalı kazı işleminden etkilenmeyeceği öngörülmektedir. Bu çalışma, taşocaklarında gerçekleştirilen patlatılmalı kazıların çevresel etkilerinin yasal sınırlar çerçevesinde sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi ve ocak duraylılığına yönelik örnek bir uygulama sunmakta olup, benzer projeler için “Çevresel Etki Değerlendirme” (ÇED) süreçlerinde kaynak olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Sözcükler

Çevresel Etki, Hava Şoku, Patlatılmalı Kazı, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Şev Duraylılığı, Titreşim Ölçümü

Investigation of Blast-Induced Ground Vibrations, Air Overpressure, and Slope Stability in a Quarry: A Case Study

Abstract

This study investigates the environmental impacts and slope stability conditions associated with blasting activities conducted at a quarry located in Araklı district, Trabzon province, Türkiye. Ground vibration and air overpressure data from five separate blasts were recorded using an InstanTEL Micromate seismograph during field investigations. The collected data were analyzed and compared against the regulatory threshold limits specified in the updated 2022 Environmental Noise Control Regulation (ÇGKY) for mining and quarrying operations. Furthermore, comparative evaluations were made with the former Turkish standard, the USBM RI 8507 criteria from the United States, and the DIN 4150-3 standard used in Germany. The results show that vibration and air shock levels recorded from each blast remained within the permissible limits defined by all referenced standards. Field observations further confirm that the blasts did not induce structural damage in nearby residential buildings. Comparative analysis revealed that USBM RI 8507 and DIN 4150-3 standards offer more conservative protection thresholds than the current Turkish regulation. In addition, numerical slope stability analyses were conducted for the proposed quarry bench geometry under both static and dynamic (seismic) loading conditions. The calculated Safety Factor (SRF) exceeded 1.5, indicating that the slope is stable and not expected to be adversely affected by planned blasting operations within the quarry boundaries. Overall, this study provides a representative case for the systematic and comparative assessment of the environmental and geotechnical impacts of blasting operations in open-pit quarries, offering valuable insights for Environmental Impact Assessment (EIA) processes in similar projects.

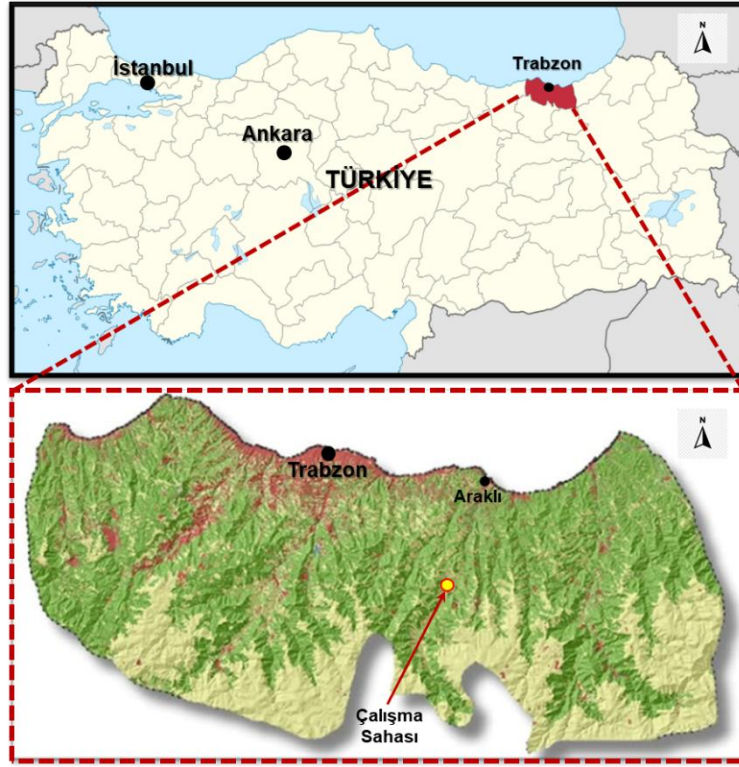
üzerindeki en önemli yan etkileri, yer titreşimi (zemin sarsıntısı) ve hava şoku (airblast) olarak ortaya çıkmaktadır. Patlatma sırasında üretilen enerjinin yalnızca %20–30'u kayaçları parçalamaya harcanmakta, geri kalan enerji ise yer titreşimi, hava şoku, gürültü ve toz gibi istenmeyen çevresel etkiler şeklinde açığa çıkmaktadır (Konya & Walter, 1990; Kuzu, 2008).

Bu etkiler, özellikle patlatma alanına yakın konumda bulunan yerleşim birimlerinde yapısal hasar, insan sağlığı üzerinde stres etkileri ve yaşam kalitesinde düşüş gibi önemli sorunlara neden olabilmektedir. Yer sarsıntısının yoğunluğu; kullanılan patlayıcı miktarı, gecikme süresi, patlatma geometrisi ve jeolojik koşullar gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir (Venkatesh, 2005; Kahriman vd., 2006). Hava şoku ise, yapılar üzerinde mekanik titreşim yaratabilmekte, pencere camlarının kırılması veya rezonansa giren duvar yüzeylerinde çatlak oluşumu gibi fiziksel zararlara neden olabilmektedir (Mesec vd., 2018). Bahsedilen nedenlerden ötürü, patlatma kaynaklı etkilerin çevresel boyutunun değerlendirilmesi hem yapı güvenliği hem de insan sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır (Feher vd., 2021). Çeşitli ülkelerde bu etkileri sınırlamak amacıyla USBM RI 8507 (U.S. Bureau of Mines, 1980), DIN 4150-3 (German Institute for Standardisation, 1999) ve ulusal yönetmeliklerde belirlenen sınır değerlere dayalı standartlar geliştirilmiştir. Türkiye'de bu konuda temel başvuru kaynağı olan “Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği” (T.C. Resmi Gazete, 2022) 2022 yılında güncellenmiş ve patlatma kaynaklı titreşim ile ses şiddeti sınır değerleri yeniden tanımlanmıştır.

Literatürde, bu etkilerin modellenmesi ve izlenmesi için pik parçacık hızı (Peak Particle Velocity - PPV) başta olmak üzere çeşitli parametreler kullanılmıştır. PPV, patlatma titreşiminin yapılar üzerindeki hasar potansiyelini belirlemede yaygın olarak kullanılan temel ölçütlerden biridir (Siskind vd., 1980; Singh vd., 2007). Bu parametre; patlatma alanından mesafe, gecikme başına maksimum şarj miktarı ve kaya ortamının özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Blair, 1990; Khandelwal & Singh, 2006). Ayrıca, düşük frekanslı (<40 Hz) titreşimlerin rezonans etkisi nedeniyle daha yüksek hasar riski taşıdığı bilinmektedir (Singh vd., 1997).

Patlatma kaynaklı yer titreşimleri ve hava şoklarının izlenmesinde InstanTEL Micromate gibi yüksek hassasiyetli sismograflar kullanılarak yapılan ölçümler hem mevcut çevresel koşulların değerlendirilmesinde hem de ilerleyen patlatmalarda optimum patlatma tasarımı geliştirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Sismik verilerin analizi sayesinde, gecikme süresi, ateşleme deseni ve şarj miktarı gibi parametrelerin optimize edilerek çevresel etkilerin azaltılması mümkün hale gelmektedir (Özer, 2008; Jug & Grabar, 2020).

Genellikle taş ocaklarında gerçekleştirilen patlatmalı kazılar, istenilen kaya kırılmasını sağlarken, aynı zamanda çevreye dinamik yükler ve titreşimler yayar. Bu titreşimler, özellikle zayıf jeolojik yapılar veya mevcut süreksizlikler içeren şevlerde, zamanla stabilite sorunlarına yol açabilir (Özer, 2008; Jiang vd., 2017; Jiang vd., 2023; Taiwo vd., 2023; Fu vd., 2024). Yapılan çalışmalar, patlatma kaynaklı titreşimlerin, şevlerdeki kaya kütlelerinin dayanımını azaltarak, potansiyel kayma yüzeylerinin oluşumuna zemin hazırlayabileceğini göstermektedir. Özellikle, patlatma sırasında oluşan PPV gibi parametreler, şev stabilitesinin değerlendirilmesinde kritik öneme sahiptir. Yüksek PPV değerleri, şevlerdeki süreksizliklerin açılmasına ve birleşik yüzeylerin



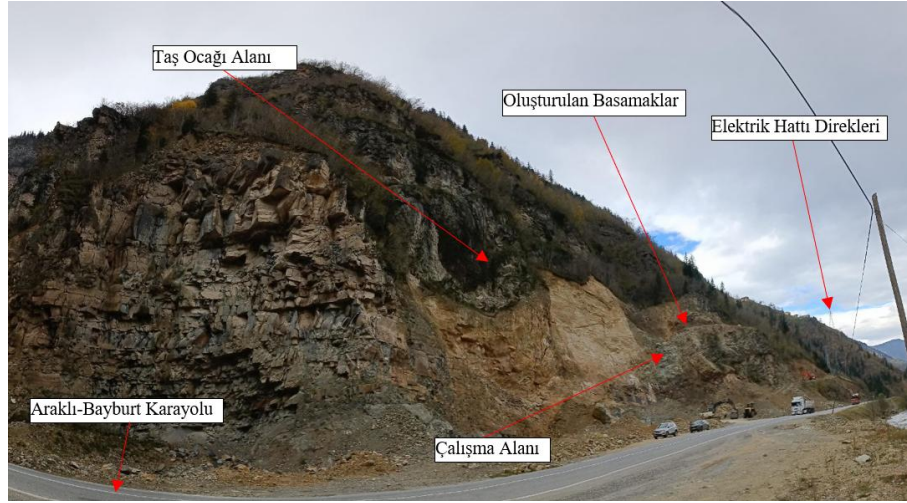
Şekil 1: Çalışma alanı

Trabzon G43-C2 paftası içinde yer alan proje alanının uydu görüntüsü ve etrafındaki yerleşim yerleri Şekil 2’de verilmiştir. Çalışma alanı, yaklaşık 470 metre zemin genişliğe ve 300 metre dikey uzunluğa sahip eğimli bir topoğrafyada yer almakta olup, üretim faaliyetleri kademeli açık işletme yöntemi ile planlanmıştır. Şekilden de görülebileceği üzere, taş ocağı sahası Araklı-Bayburt karayolu ile doğrudan komşudur. Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) sınırlarının kuzeyinde, her biri yaklaşık 18 metre mesafede bulunan bir trafo merkezi ve HES işletme binası yer almakta; trafo merkezinin içinde ayrıca bir sosyal tesis bulunmaktadır.



Şekil 2: Çalışma alanını içine alan bölgenin uydu görüntüsü

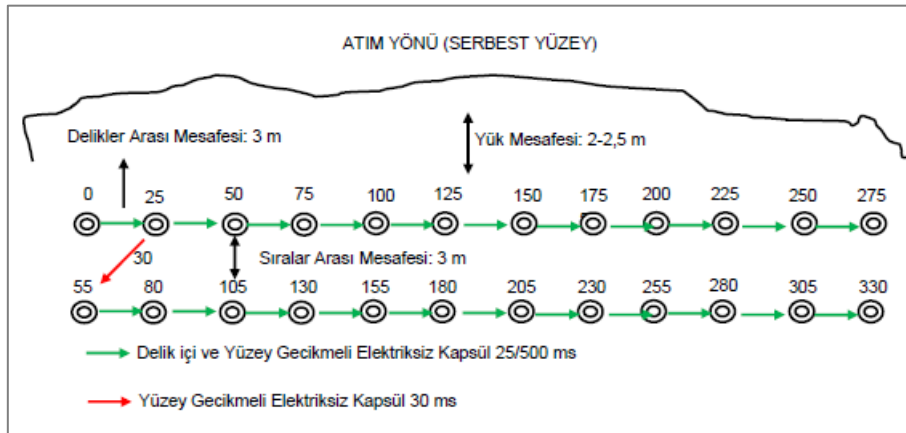
Ayrıca çalışma alanının yaklaşık 300 metre kuzeybatısında, Kayaıçı Köyü’ne ait yerleşim yapıları yer almakta olup (Şekil 4), taş ocağı alanının kuzey yönünde, patlatmalı kazı alanına yaklaşık 20 metre mesafede ise elektrik iletim hatlarına ait direkler bulunmaktadır (Şekil 3). Söz konusu altyapı ve yerleşim birimlerinin konumsal yakınlığı göz önüne alınarak, patlatma faaliyetleri çevresel sınır değerleri aşmayacak şekilde planlanmış ve saha tasarımı buna göre optimize edilmiştir.



Şekil 3: Taş ocağı alanından görüntü

2.1. Taş Ocağı Patlatmalı Kazısı Teknik Verileri

Çalışma sahasına konu olan taş ocağında, üretimin kademeli açık işletme yöntemi ile gerçekleştirilmesi planlanmış ve bu doğrultuda patlatmalı kazı teknik verileri oluşturulmuştur. Yerleşim yerlerine olan mesafeler ve önceki saha deneyimleri dikkate alınarak, emniyetli patlatma koşullarını sağlayacak şekilde patlayıcı kullanımına ilişkin tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, patlayıcıların yerleştirileceği deliklerin çapı 89 mm olarak planlanmış ve her bir gecikme aralığında kullanılacak patlayıcı miktarı, 19,5 kg ANFO + 0,5 kg dinamit olmak üzere toplam 20 kg şeklinde düzenlenmiştir. Her bir patlatma operasyonunda 36 delik ve 2 sıra yer almakta olup, toplam 720 kg patlayıcı madde kullanımı öngörülmüştür. Çalışma sahasında patlatmalı kazıda kullanılması düşünülen patlatma paterni örneği Şekil 4'te görülmektedir. Delikler arası ve sıralar arası gecikmeli elektriksiz kapsüller kullanılmıştır.



Şekil 4: Patlatmalı kazı uygulamasına ait tipik ateşleme bağlantı düzeni

Taş ocağında yapılan patlatmalı kazı için bazı tasarım verileri Tablo 1'de verilmiştir. Basamak yüksekliğinin 10 metre olduğu yerde 1 metre dip delgi yapılmıştır. Delikler; 3,7 m taban şarjı, 4,3 m orta (kolon) şarjı ve 3 m sıkılama içerecek biçimde tasarlanmıştır. Bu konfigürasyona göre, her bir delikte 8 metrelik bir patlayıcı yerleşim alanı bulunmakta ve bu alana toplam 20 kg patlayıcı madde yerleştirilmektedir. Delikler arası mesafe 3 metre, sıra aralığı ise 3 metre olacak şekilde tasarlanmış olup, bu düzenleme hem delik başına verimliliği artırmakta hem de kontrollü bir kırılma sağlamaktadır.

Patlatma işlemi, 2 sıra delikten oluşan bir patlatma deseni ile yürütülecek şekilde planlanmıştır. Bu tasarıma göre yapılan hesaplamalar sonucunda, delik başına düşen özgül şarj miktarı yaklaşık 0,22 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, patlayıcının bulunduğu hacme göre oldukça ideal bir enerji yoğunluğunu ifade etmekte olup, sert ve dayanıklı kayaların etkin şekilde kırılmasını sağlayacaktır. Aynı zamanda, çevresel titreşim sınırlarını aşmamak adına delik içi gecikmeli ateşleme uygulanarak enerji yayılımı kontrol altına alınmaktadır.

Tablo 1: Patlatma tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Delik çapı	89 mm
Basamak yüksekliği	10 m
Basamak eğimi	80°
Delik sıra sayısı	2
Azami yük mesafesi	2,5-3 m
Delikler arası mesafe	3 m
Sıralar arası mesafe	3 m
Dip delgi	1 m
Delik boyu	10 m
Toplam delik boyu	11 m
Toplam patlayıcı miktarı	20 kg/delik
Taban şarj	3,7 m
Orta şarj	4,3 m
Sıkılama	3 m

3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada bir taş ocağında yapılan patlatmalı kazı sonrası sismograf ile elde edilen veriler yakın bölgede bulunan yapıların güvenliği açısından değerlendirilmiştir. Aynı zamanda patlatmalı kazılar sonrası ortaya çıkan etkin yer ivmesine bağlı olarak bölgede şevlerde oluşabilecek duraysızlık problemleri de değerlendirilmiştir.

3.1. Titreşim ve Hava Şoku Ölçüm Yöntemi

Patlatma kaynaklı yer titreşimlerinin belirlenmesi amacıyla saha ölçümleri, Instantel Micromate marka dijital sismograf kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz, patlatma sonrası oluşan titreşim değeri (PPV) ve hava şoku gibi patlatma kaynaklı dinamik yüklerin ölçümünde uluslararası standartlara uygun yüksek hassasiyetli bir sistemdir. Sismograf, patlatma alanına yaklaşık 200-240 metre mesafede (5 adet patlatma), çevresel duyarlılığı yüksek olan bir yapı kompleksi olan trafo merkezi binasının yakınına konumlandırılmıştır (Şekil 5). Bu nokta, yerleşim birimlerine olan mesafe ve topoğrafik konum itibarıyla saha ölçümleri açısından en kritik değerlendirme noktalarından biri olarak seçilmiştir. Ölçüm noktası olarak trafo merkezi çevresinin seçilmesinde, hem bu yapının taşocağına olan kısa mesafesi (yaklaşık 200–240 m) hem de yerleşim alanlarına en yakın ve topoğrafik olarak patlatma alanıyla aynı vadisel hizada yer alması belirleyici olmuştur.



Şekil 5: Patlatmalı kazı uygulamasına ait tipik ateşleme bağlantı düzeni

Cihaz, üretici talimatlarına uygun şekilde sabitlenmiş, üç eksenle titreşim ölçebilecek biçimde kalibre edilerek yerleştirilmiştir. Ölçüm süreci, her bir patlatma öncesi cihazın aktive edilmesi ve patlatma sonrası otomatik veri kaydı ile yürütülmüştür. Ölçülen veriler, Türk standartlarında belirtilen eşik sınır değerlerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu yöntem, patlatma sonrası oluşan dinamik etkilerin yapılar üzerindeki potansiyel zarar riskinin değerlendirilmesinde temel veri sağlamıştır.

Elde edilen PPV ve hava şoku verileri, ölçüm yapılan konumdaki yapılar üzerinde potansiyel etkilerin analiz edilmesi için kullanılır. Instantel Micromate marka cihazı kullanılarak yapılan ölçümlerle, patlatmalı kazılar sonucu ortaya çıkan dinamik yükler zamana bağlı olarak üç temel veri türü halinde kaydedilmektedir; i) Yer titreşimi (Ground Vibration), ii) Hava şoku (Air Overpressure) ve iii) Yer ivmesi (Peak Acceleration) şeklindedir. Yer titreşimi verisi yerleştirilen jeofonlar sayesinde üç eksenle yani X-axis (Transverse: Patlatma yönüne dik yatay hareket), Y-axis (Longitudinal: Patlatma yönüne paralel yatay hareket) ve Z-axis (Vertical: Düşey hareket (aşağı-yukarı)) elde edilir. Bu ölçümlerin yanında titreşimin frekansı da ölçülür; düşük frekanslı (<40 Hz) titreşimlerin rezonans nedeniyle daha zararlı olduğu kabul edilir.

3.2. İnceleme Alanındaki Saha ve Laboratuvar Çalışmaları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen saha incelemelerinde süreksizliklerin mühendislik özellikleri ve araziden derlenen blok örnekleri laboratuvarda ISRM 2007 (Ulusay, 2015) deney standartlarında hazırlanarak birim hacim ağırlık ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri belirlenmiştir (Şekil 6).

Bu veriler kullanılarak, kaya kütlelerinin davranışını tanımlamak amacıyla Hoek-Brown yenilme kriterine dayalı kaya kütle ve malzeme sabitleri hesaplanmış ve bu parametreler RS2 (Rocscience, 2024a) 11.023 yazılımında doğrudan giriş verisi olarak kullanılmıştır. Yapılan sayısal analizler sayesinde, çalışma alanına özgü mühendislik ve jeolojik koşulları yansıtan, gerçekçi ve sahaya özgü güvenlik katsayısı ve deformasyonlar elde edilmiştir. Böylece, açık ocak işletme tasarımının güvenliğini değerlendirmeye yönelik mühendislik temelli bir şev tasarımı belirlenmiştir.



Şekil 6: Taş ocağından elde edilen malzemeye yönelik gerçekleştirilen deneysel çalışmalar: a) karot örneklerinin alınması, b) standartlara uygun silindirik numunelerin hazırlanması, c) tek eksenli basınç dayanımı (UCS) deneyi, d) birim hacim ağırlık tayini

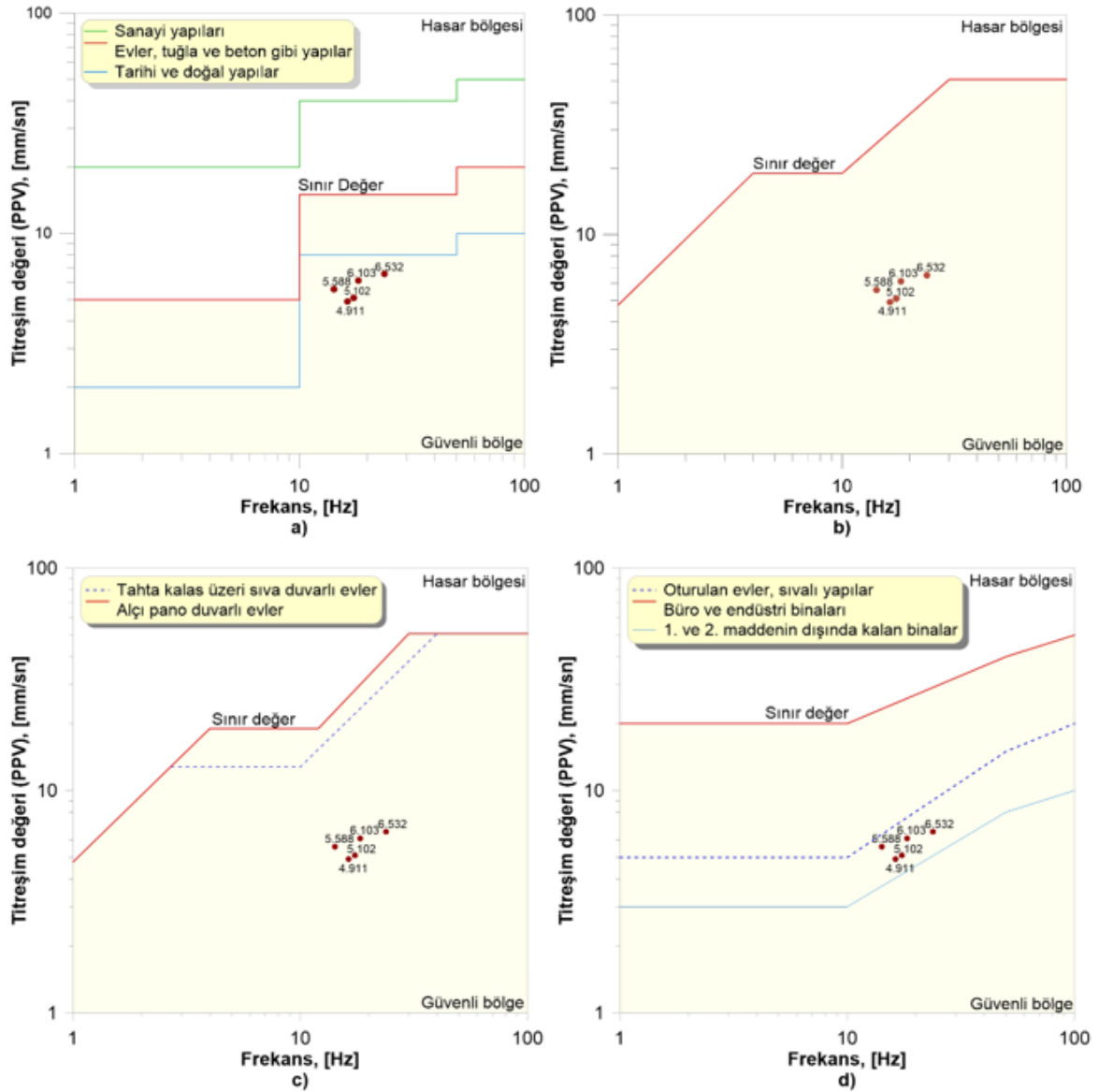
4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Titreşim ve Hava Şoku Sonuçları ve Değerlendirmesi

Taş ocağında farklı zamanlarda gerçekleştirilen beş patlatmaya ait veriler Tablo 2’de sunulmuştur. Tabloda; her patlatma sonrası ölçülen titreşim hızı (PPV), hava şoku (dB(L)), ivme (g) ve frekans değerleri yer almaktadır. Bu veriler, ülkemizde yürürlükte olan Türk standardı (T.C. Resmi Gazete, 2022) ile yürürlükten kaldırılan eski standart (T.C. Resmi Gazete, 2010) ve uluslararası USBM RI 8507 (U.S. Bureau of Mines, 1980) ve DIN 4150-3 (German Institute for Standardisation, 1999) standartlarına göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 7).

Tablo 2: Patlatmadan elde edilen titreşim ve hava şoku verileri

Ölçüm No	PPV (mm/sn)	Hava şoku (dB(L))	İvme (g)	Frekans (Hz)
1	5.588	104.1	0.064	14.2
2	6.532	115.5	0.075	16.3
3	6.103	121.2	0.070	17.4
4	5.102	107.3	0.057	18.3
5	4.911	106.4	0.055	23.8



Şekil 7: Farklı ulusal ve uluslararası standartlara göre titreşim değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi; a) ÇGKY, b) ÇGDYY, c) USBM RI 8507, d) DIN 4150-3

Yeni Türk standardına göre (T.C. Resmi Gazete, 2022), yapı türlerine göre titreşim sınır değerleri frekans-temelli olarak farklılaştırılmıştır: i) sanayi yapıları için en yüksek sınır değer tanımlanırken, ii) evler (tuğla, betonarme) için orta düzeyde sınırlar, iii) tarihi ve doğal yapılar için ise en düşük sınır değerler geçerlidir. Ölçülen titreşim değerlerinin tamamı, her üç yapı türü için tanımlanan sınır değerlerin altında kalmakta; bu da patlatma sonucu oluşan titreşimin hem modern hem de hassas yapılarda zarar oluşturmayacak düzeyde olduğunu göstermektedir (Şekil 7a).

Ülkemizde maden ve taşocakları patlatmalı kazılarına yönelik önceki yıllarda değerlendirmeler, 2010 yılında yürürlüğe giren “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği” (T.C. Resmi Gazete, 2010) kapsamında gerçekleştiriliyordu. Bu mevzuat, yapı türlerine göre ayırım yapmaksızın tekil bir sınır eğrisi tanımlamakta olup, frekans arttıkça izin verilen titreşim (PPV) değerinin yükseldiği bir yapıdadır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen tüm titreşim değerlerinin, bu standardın belirlediği sınır eğrisinin altında kaldığı görülmektedir (Şekil 7b). Bu durum, geçmişteki mevzuatlara göre de mevcut patlatma faaliyetlerinin güvenli sınırlar içinde olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, yapı türlerine özel eşik değerler içermemesi nedeniyle, bu standardın koruma düzeyi açısından sınırlı olduğu değerlendirilmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri Maden Bürosu (U.S. Bureau of Mines, 1980) tarafından yayımlanan RI 8507 standardı, özellikle konut ve hafif yapıların titreşime duyarlılığı üzerine kuruludur. Ahşap ve alçıpan duvarlı evler gibi kırılmalı yapı türleri için daha düşük eşikler, daha dayanıklı yapılar için ise yüksek sınırlar tanımlar. Ölçüm değerlerinin tamamı hem alçıpan/ahşap yapılar hem de diğer konut yapıları için belirlenen sınır değerlerin altında yer almaktadır (Şekil 7c). Bu durum, konut yapıları açısından riski minimal göstermektedir. USBM standardı, yapısal zarar yerine daha çok konfor ve rahatsızlık eşiği açısından değerlendirme yapar.

Alman DIN 4150-3 standardı (German Institute for Standardisation, 1999), üç farklı yapı türü için sınır eğrileri tanımlar: i) oturan binalar, ii) endüstriyel yapılar, iii) karma nitelikli diğer yapılar şeklindedir. Bu standardın temel özelliği hem frekans hem de yapı tipi temelli esnek sınırlar sunmasıdır. Beş ölçüm verisinin tamamı, iki yapı kategorisinin de altında kalmakta olup, oturan evler gibi hassas yapılarda dahi herhangi bir yapısal hasar riski oluşturmadığını ortaya koymaktadır (Şekil 7d). Ölçüm verileri Şekil 7d’de mavi çizgi ile işaretli alanın üstünde yani hasar bölgesinde kalmaktadır. Ancak bu alan 1 ve 2’nin dışında kalan çok hassas yapıları tarif etmektedir.

Sonuç olarak çalışmaya konu olan taş ocağında yapılan kontrollü patlatma sonrası ölçülen beş adet titreşim değeri hem ulusal hem de uluslararası dört farklı standarda göre değerlendirilmiş ve her biri açısından güvenli bölge içinde kaldığı tespit edilmiştir. Frekans değerlerinin genellikle 14.2–23.8 Hz aralığında ve PPV değerlerinin 4.9–6.5 mm/s aralığında olması hem yapısal hasar riski oluşturmadığını hem de rahatsızlık eşiği açısından kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Bu karşılaştırmalı analiz, patlatma tasarımının başarılı olduğunu ve çevresel etkilerin öngörülen sınırlar dahilinde tutulduğunu göstermektedir.

Tablo 3’te değerlendirmeye alınan tüm standartların karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. Bu analizde titreşim değerleri için kullanılan eski Türk standard

Tablo 4: Gürültünün (ses dalgalarının) farklı seviyelerine insanların ve yapıların tepkileri (Hoek & Bray,1981)

Desibel [dB]	lb/in ²	Tanım (İngilizce)	Tanım
180	3	Structures damaged	Yapılar hasar alır
160	1	Most windows break	Çoğu pencere camı kırılır
140	0.1	Some windows break	Bazı pencere camları kırılır
~134	~0.03	“No damage” level	Hasarsız seviye
120	0.003	Threshold of pain	Acı eşiği
115	0.0002	Threshold of complaints (dishes/windows rattle)	Şikayet eşiği (tabakalar/camlar titrer)
100	0.0003	Riveter	Dikkat kesilme (endüstriyel gürültü eşiği)
80	$\approx 3 \times 10^{-5}$	—	—
60	$\approx 3 \times 10^{-6}$	Ordinary conversation	Normal konuşma
40	$\approx 3 \times 10^{-7}$	Hospital room	Hastane ortamı
20	$\approx 3 \times 10^{-8}$	Whisper	Fısıltı
0	$\approx 3 \times 10^{-9}$	Level of hearing	Duyuma eşiği

Ölçülen hava şoku değerlerinin Hoek & Bray (1981) sınıflamasındaki değerlendirilmesi Tablo 5’te verilmiştir. Hiçbir ölçüm 134 dB’lik “hasarsız seviye” sınırını aşmamaktadır, yani yapı hasarı beklenmez. Ancak bazı değerler (özellikle 121.2 dB) şikayet sınırını (120 dB) aşmakta veya oldukça yakın olup rahatsızlık, cam titremesi veya ani gürültü tepkileri gibi etkiler yaratabilir. Bu bağlamda, standartlara göre ölçülen hava şoku değerleri fiziksel zarar eşiğinin altında, ancak insan algısı açısından dikkat gerektiren seviyededir denebilir. Patlatma kaynaklı hava şoku yalnızca yapılar üzerinde değil, belirli düzeyleri aştığında insan sağlığı üzerinde de etkili olabilmektedir. Literatürde, 120 dB(L) üzerindeki ani ses basınçlarının özellikle hassas bireylerde rahatsızlık yaratabileceği, 140 dB(L) ve üzerindeki seviyelerin ise işitme sağlığı açısından zarar oluşturabileceği belirtilmektedir (Hoek & Bray, 1981). Bu çalışmada ölçülen en yüksek hava şoku değeri 121.2 dB(L) olup, işitme kaybı sınırının altında kalmaktadır. Ölçülen hava şoku ve titreşim değerlerinin bazı durumlarda şikayet eşiğine yaklaşması nedeniyle, patlatmaların özellikle gündüz saatlerinde veya mesai dışı zamanlarda yapılmaması, yerleşim alanlarında oluşabilecek rahatsızlıkları azaltmak açısından önem arz etmektedir.

Tablo 5: Ölçülen hava şoku değerlerinin sınıflandırılması

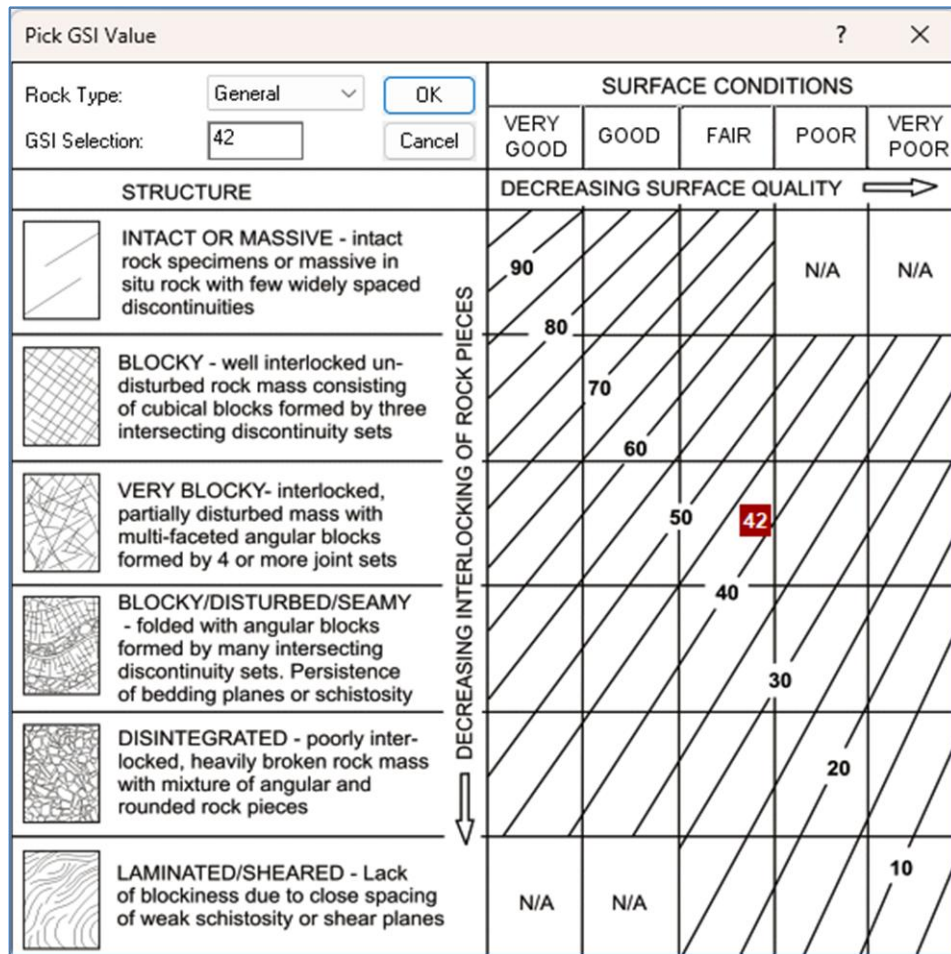
Ölçüm No	Hava Şoku (dB)	Sınıf	Değerlendirme
1	104.1	Şikayet eşiğinin altında	Hafif rahatsızlık yaratabilir
2	115.5	Şikayet eşiği	Yüksek ses algısı, rahatsızlık mümkün
3	121.2	Acı eşiğine çok yakın	Şiddetli gürültü, cam titremesi olası
4	107.3	Şikayet eşiğine yakın	Camlarda titreşim veya rahatsızlık olabilir
5	106.4	Şikayet eşiğine yakın	Düşük düzeyde etki, şikayet oluşabilir

4.2. Açık Ocak İşletmesinin Duraylılık Değerlendirmesi

kaya ortamı, mühendislik açısından orta ila yüksek dayanımlı, bloklu karakterde bir yapı sergilemektedir. Kaya kütlelerinin dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla [Hoek & Marinos \(2000\)](#) tarafından geliştirilen GSI değerlendirme abağı kullanılmış ve analiz sonucunda kütlelerin Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değerinin 40 ila 45 aralığında (42) olduğu belirlenmiştir. Bu değer, kütlelerin “çok bloklu kaya” sınıfı içinde değerlendirilebileceğini göstermektedir (Şekil 8).

Tablo 6: Kayacın mekanik ve fiziksel özellikleri

Jeolojik Birim	Tek eksenli basınç dayanımı, σ_c (MPa)	Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)
Andezit	67.80	25.10
	72.43	27.50
	76.35	26.80
	80.19	23.90
	78.48	26.70
Ort.	≈ 75	≈ 26



Şekil 8: [Hoek & Marinos \(2000\)](#) yaklaşımına göre kaya kütlelerinin GSI değerine ilişkin değerlendirme abağı

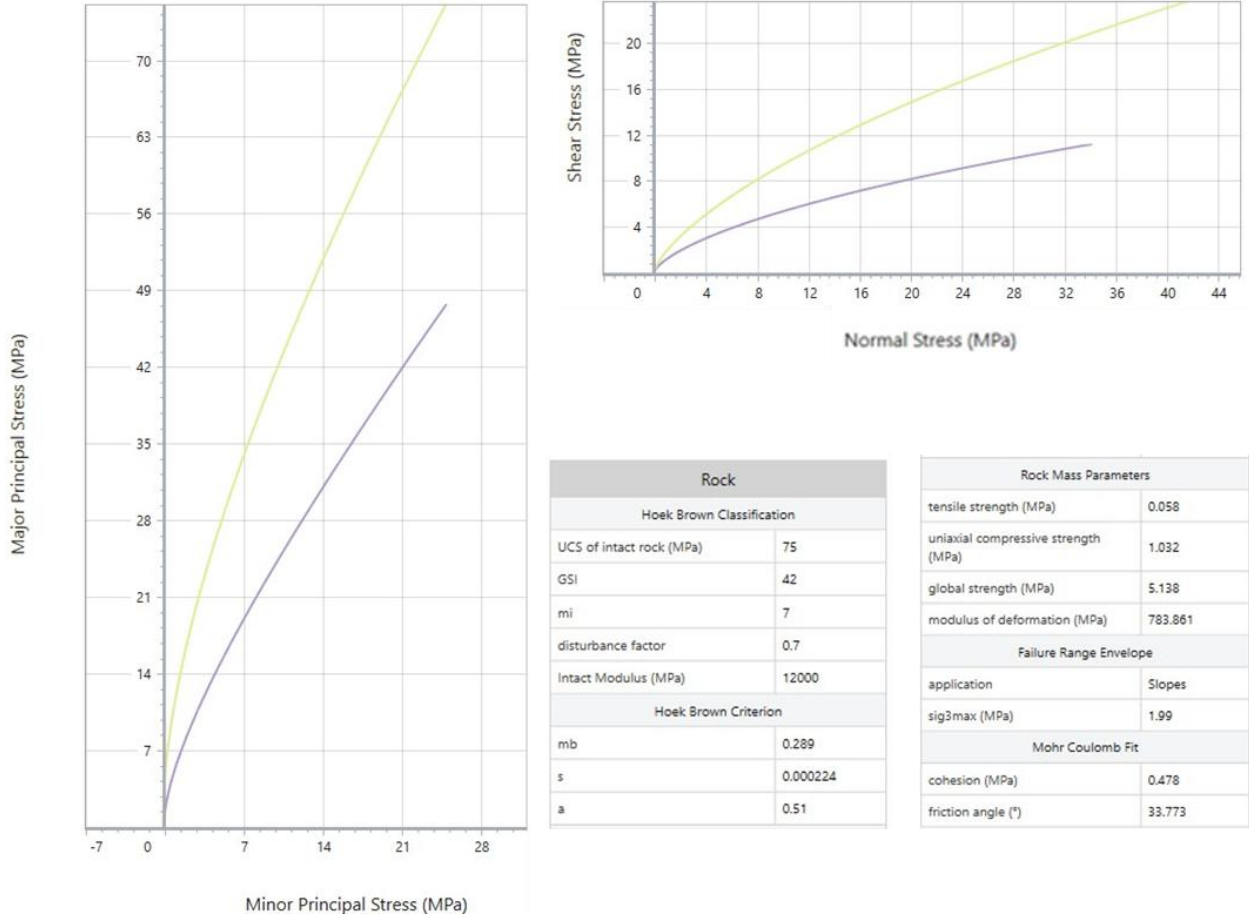
Kaya kütlelerinin dayanım parametreleri, [Hoek vd. \(2002\)](#) tarafından geliştirilen Hoek-Brown yenilme kriteri esas alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, kaya kütleleri sabitleri olan m_b , s ve a değerlerinin hesaplanmasında RSDData ([Rocscience, 2024a](#)) bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır.

Burada; m_i , bozulmamış kayaç malzemesine özgü bir malzeme sabitidir. D ise, kaya kütlelerinin patlatma etkileri veya gerilme rahatlaması nedeniyle maruz kaldığı yapısal bozulma düzeyini temsil eden bir faktör olup, örselenmemiş kaya kütlelerinde 0, ileri düzeyde bozulmuş kayaçlarda ise 1'e kadar değer alabilir. Bu çalışmada şevlerin tasarımında patlatmalı kazı yapılacağı için örselenme faktörü D: 0.7 alınmıştır. Söz konusu formüllerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen değerler Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7: Şev duraylılığı analizlerinde kullanılan jeomekanik parametreler

GSI	σ_c (MPa)	m_i	γ (kN/m ³)	D	E_m (MPa)	Yatay yer ivmesi (g)	Düşey yer ivmesi (g)	Hoek-Brown sabitleri		
								m_b	s	a
42	75	7	26	0.7	784	0.057	0.029	0.289	0.0002	0.510

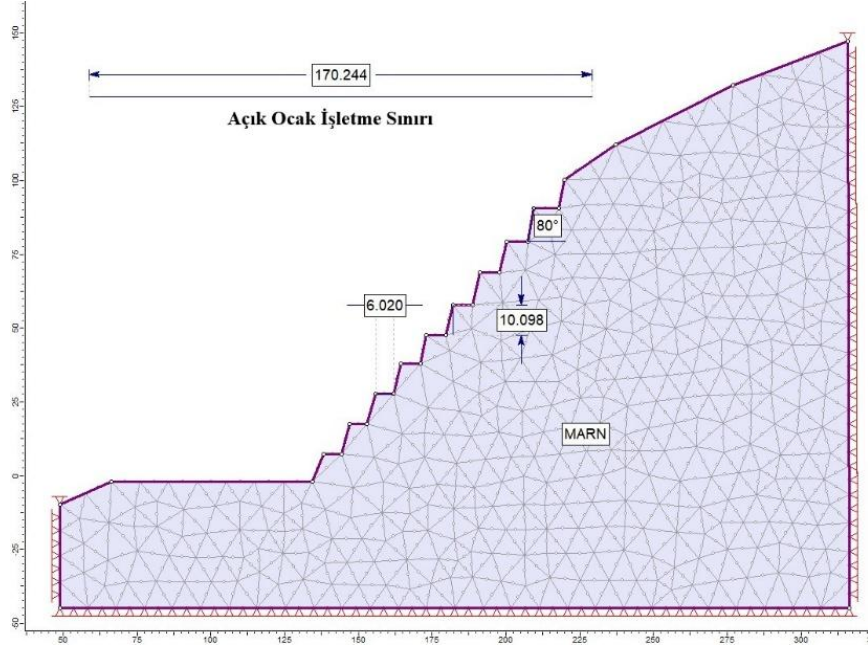
Söz konusu GSI değeri ve laboratuvar deneylerinden elde edilen tek eksenli basınç dayanımı ($\sigma_{ci} = 75$ MPa) kullanılarak, RSData (Rocscience, 2024a) yazılımı ile Hoek-Brown kırılma kriterine dayalı kaya kütlesi parametreleri hesaplanmış ve grafiği Şekil 9'da gösterilmiştir.

Şekil 9: Kaya kütlesi dayanım analizine yönelik giriş verileri ve σ_1 - σ_3 ile σ - τ diyagramları

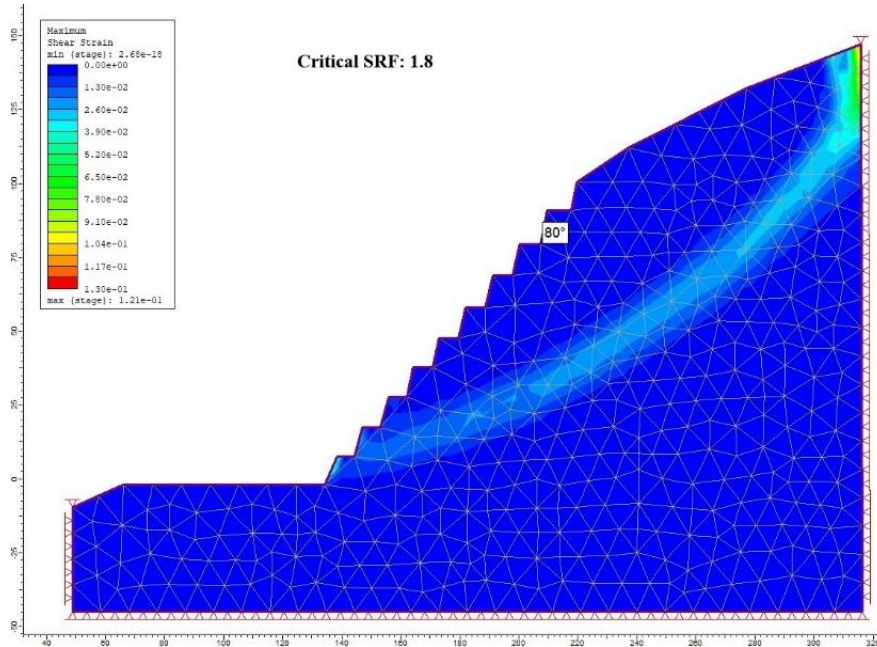
Elde edilen bu dayanım parametreleri, çalışma sahasında önerilen patlatmalı kazı işlemleri ve şev tasarımı açısından kritik önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, şev stabilite analizleri, sayısal yöntemle modelleme imkânı sunan RS2 (Rocscience, 2024b) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, 10 metre yüksekliğinde ve 80° eğim açısına sahip üretim kademeleri temel alınmış ve elde edilen Hoek-Brown kaya kütle sabitleri şev modeline entegre edilmiştir. Ocak alanı için belirlenen kritik şev tasarımı altı düğüm noktalı üçgen ağ modeli ile tasarlanmış (Şekil 10) olup, taş ocağı şev tasarımı için elde edilen parametreler kullanılarak, şevin kazı sonrasında ve kaz

SRF değeri birçok ülkede geçerli olan minimum güvenlik katsayısı önerisi olan 1.5'in üzerinde bulunmuştur (Hoek vd., 2002). Ayrıca elde edilen toplam yer değiştirme değerleri, şevde herhangi bir makroskobik duraysızlık gelişmeyeceğini, yüzeyel deformasyonların da oldukça sınırlı kalacağını göstermektedir.

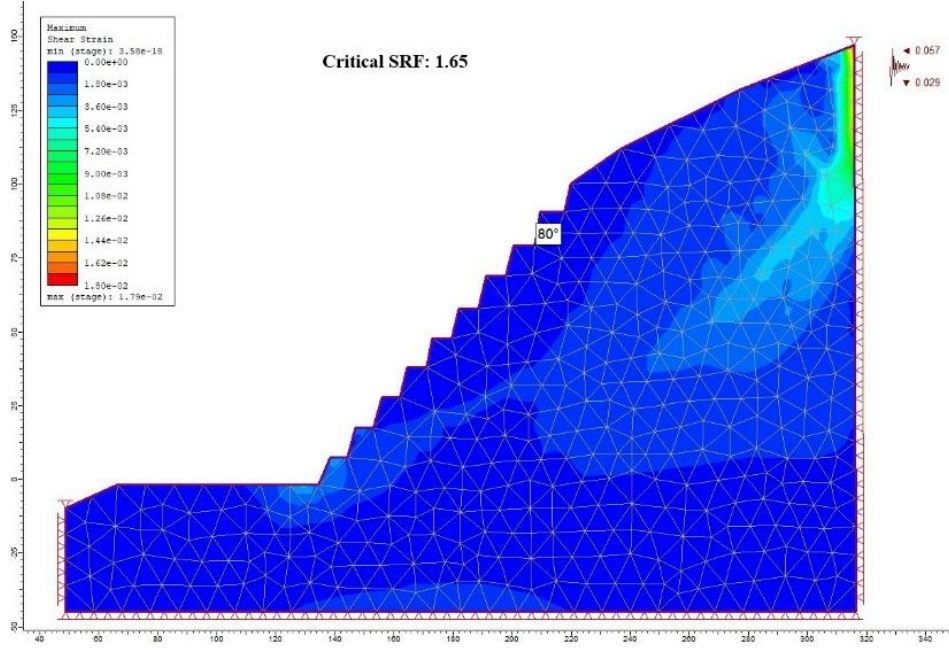
Bu çalışmada, yapılan analizler mevcut patlatma koşulları altında şev stabilitesinin sağlandığını ($SRF > 1.5$) göstermektedir. Ancak uzun vadede, tekrarlayan patlatmaların kaya kütesinde birikimli hasar, mikro çatlak gelişimi ve zemin parametrelerinde zayıflamaya yol açabileceği bilinmektedir. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmalarda uzun süreli izleme verileri ve zamanla değişen şev davranışına yönelik analizlerin de değerlendirilmesi önerilmektedir.



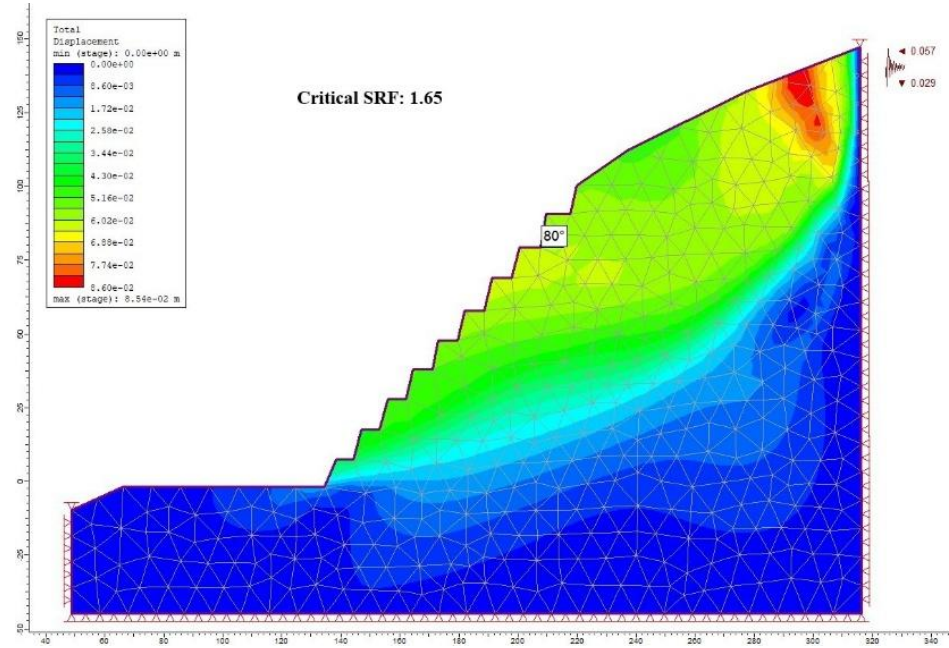
Şekil 10: Taş ocağında sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmuş şev tasarımına ait ağ modeli



Şekil 11: İşletme alanındaki yamaçta, kazı sonrası sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen kayma gerilmesi azaltma (SSR) analizi



Şekil 12: İşletme alanındaki yamaçta, kazı sonrası sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen kayma gerilmesi azaltma (SSR) analizi (Sismik yük etkisinde)



Şekil 13: İşletme alanındaki şev kesitine ait toplam yer değiştirme dağılımı

5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, Trabzon ili Araklı ilçesinde faaliyet gösteren bir taş ocağında yürütülen patlatmalı kazı uygulamalarının çevresel etkileri ile kazı sonrası ve sismik yük etkisindeki şev duraylılığı, deneysel ve sayısal analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Beş farklı patlatma için Instantel Micromate sismografi ile alınan yer titreşimi ve hava şoku verileri, güncel (T.C. Resmi Gazete, 2022) ve önceki Türk mevzuatları (T.C. Resmi Gazete, 2010) ile birlikte DIN 4150-3 (German Institute for Standardisation, 1999) (Almanya) ve USBM RI 8507 (U.S. Bureau of Mines, 1980) (ABD) standartları kapsamında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, her bir patlatmanın tüm referans standartlara göre güvenli eşik değerlerin altında kaldığını ortaya koymuş; özellikle yeni Türk standardı, DIN 4150-3 ve USBM standartlarının daha koruyucu eşikler sunduğu belirlenmiştir.

Yer sarsıntılarının yanı sıra, hava şoku analizleri de yapılmış ve bazı değerlerin insan algısı açısından rahatsızlık eşiğine yakın seyrettiği, ancak yapısal hasar oluşturacak seviyelere ulaşmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, çevresel etkilerin etkin bir biçimde kontrol altında tutulduğunu göstermektedir.

Patlatmalı kazı işlemlerinden ve bölgenin depremselliğinden kaynaklanabilecek titreşimlerin oluşturduğu dinamik yükler analizlere etki ettirildiğinde elde edilen güvenlik sayısı SRF: 1.65 olup, işletme esnasında herhangi bir duraysızlık sorununa yol açmayacağı belirlenmiştir. Ayrıca sismik yük etkisinde yapılan deformasyon analizinde şev yüzeyinde oluşan deformasyonun maksimum 8.6cm olduğu belirlenmiş olup, bu durumun tasarlanan şevde bir duraysızlık sorunu oluşturmayacağı, ancak patlatma sonrası süreksizliklerde meydana gelen gevşeme sonucu lokal blok düşmelerine sebep olabileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, patlatma sonrası palyelerde kalan askıdaki bloklar temizlenmelidir.

Sonuç olarak, saha verileri ve sayısal analizler ışığında yapılan değerlendirmeler, patlatmalı kazıların hem çevresel hem de yapısal açıdan uygun sınırlar içinde gerçekleştirildiğini, ayrıca tasarlanan şev geometrisinin mevcut jeolojik koşullar altında mühendislik açısından güvenli olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, taş ocaklarında yürütülecek benzer üretim faaliyetlerinde hem çevresel etki değerlendirmesi (ÇED) süreçlerine hem de şev tasarımı optimizasyonuna yönelik önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmanın arazi ölçümleri sürecinde verdikleri destek ve iş birliği için taş ocağı işletmesinde görevli teknik personel ve saha çalışanlarına içten teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- Blair, D. P. (1990, August 26–31). *Some problems associated with standard charge weight vibration scaling laws* [Symposium presentation]. 3rd International Symposium on Fragmentation by Blasting, Brisbane Queensland, Australia.
- Fehrer, J., Cambal, J., Pandula, B., Kondela, J., Sofranko, M., Mudarri, T., & Buchla, I. (2021). Research of the technical seismicity due to blasting works in quarries and their impact on the environment and population. *Applied Sciences*, 11, Article 2118. <https://doi.org/10.3390/app11052118>
- Fu, B., Ji, H., Pei, J., & Wei, J. (2024). Numerical computation-based analysis of blasting vibration effects and slope stability in an open-pit quarry. *Fire*, 7, Article 420. <https://doi.org/10.3390/fire7110420>
- German Institute for Standardisation. (1999). *DIN 4150-3: Structural vibration – Part 3: Effects of vibration on structures*. Beuth Verlag GmbH.
- Hoek, E. & Marinos, P. (2000). *Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses*. Tunnels and Tunnelling International, Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000. <https://www.rocsience.com/assets/resources/learning/hoek/Predicting-Tunnel-Squeezing-Problems-in-Weak-Heterogeneous-Rock-Masses-2000.pdf>
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering* (Revised 3rd edition). Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., & Corkum, B. (2002, July 7–10). *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition* [Symposium presentation]. 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada.
- Jiang, N., Lyu, G., Wu, T., Zhou, C., Li, H., & Yang, F. (2023). Vibration effect and ocean

- Rocscience. (2024b). *RSData Strength and Stress Analysis Software*. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada. <https://www.rocscience.com/software/rsdata>
- Singh, P. K., Vogt, W., Singh, R. B., Singh, M. M., & Singh, D. P. (1997). Response of surface structures to rock blasting. *Mineral Resource Engineering*, 6(4), 185–194. <https://doi.org/10.1142/S0950609897000176>
- Singh, P., & Jayanthu, S. (2024). Pseudo-static and dynamic analysis of mine rock slope under the influence of production blasting. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41, 3197–3209. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-01112-0>
- Singh, P. K., Roy, P. P. & Singh, R. B. (2007). Ground vibration assessment under varying circumstances in a limestone quarry in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 121(1–3), 121–123.
- Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., & Dowding, C. H. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting* (Report of Investigations 8507). U.S. Bureau of Mines, Washington, D.C.
- Su, H., & Ma, S. (2022). Study on the stability of high and steep slopes under deep bench blasting vibration in open-pit mines. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 990012. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.990012>
- Taiwo, B. O., Yewhalashet, F., Ogunyemi, O. B., Babatuyi, V. A., Okobe, E. I., & Orhu, E. A. (2023). Quarry slope stability assessment methods with blast induced effect monitoring in Akoko Edo, Nigeria. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, 2553–2571. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02414-8>
- T.C. Resmi Gazete. (2010). *Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği* (Resmi Gazete Tarih: 04.06.2010, Sayı: 27601). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100604-5.htm>
- T.C. Resmi Gazete. (2022). *Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği* (Resmi Gazete Tarih: 11.06.2022, Sayı: 31863). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/06/20220611-4.htm>
- Ulusay, R. (2015). *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0>
- U.S. Bureau of Mines. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting (RI 8507)*. U.S. Department of Interior, Bureau of Mines.
- Venkatesh, H. S. (2005). Influence of total charge in a blast on the intensity of ground vibrations – field experiment and computer simulation. *Fragblast*, 9(3), 127–138. <https://doi.org/10.1080/13855140500332260>