

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞEHİR İÇİ TEMEL KAZILARINDA YAPILAN PATLATMALARIN ÇEVRESEL
ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra ÜNVER

MART 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞEHİR İÇİ TEMEL KAZILARINDA YAPILAN PATLATMALARIN ÇEVRESEL
ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Esra ÜNVER

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"MADEN YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 / 02 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 24 / 03 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Bayram ERÇİKDI

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

Yüksek lisans konusunun belirlenmesinden çalışmaların yürütülmesi ve sonuçlandırılmasına kadar her aşamada bilgi, deneyim, destek ve değerli görüşlerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Bayram ERÇIKDI'ya minnet ve şükran borçluyum. Çalışmam boyunca beni yönlendiren, verilerin yorumlanmasında ve tezin çeşitli aşamalarında gösterdiği yardım ve yapıcı eleştirilerinden dolayı tez jüri üyesi Sayın Prof. Dr. Ayhan KESİMAL'e içtenlikle teşekkür ederim. Tez jüri üyesi olarak görev alan ve tezimin bilimsel açıdan daha kaliteli hale gelmesine katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Ali KAHRİMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Özellikle saha çalışmaları esnasında ve bilimsel değerlendirme aşamalarında her türlü katkıyı sunan Sayın Prof. Dr. Ferdi CİHANGİR'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını, her zaman yanımda olan annem Gülcan KANTARCİ, babam Adnan KANTARCİ, kardeşim Ekrem Muratcan KANTARCİ ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Eyüp Sabri ÜNVER'e ve kızım Efnan Elif ÜNVER'e ithaf ediyor, sonsuz sevgi saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Esra ÜNVER
Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Şehir İçi Temel Kazılarında Yapılan Patlatmaların Çevresel Etkisinin Değerlendirilmesi ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Bayram ERÇIKDI’ in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/03/2025



Esra ÜNVER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1 Tezin Gerekçesi ve Amacı.....	2
1.2. Patlatma Geometrisi Terimleri.....	3
1.3. Patlatma Kaynaklı Çevresel Sorunlar.....	7
1.3.1. Yer Titreşimleri.....	9
1.3.2. Kaya Fırlaması.....	11
1.3.3. Toz Emisyonu.....	12
1.3.4. Hava Şoku.....	13
1.4. Ölçekli Mesafe Kavramı.....	14
1.5. Maksimum Parçacık Hızı Tahmini.....	15
1.6. Patlatma Kaynaklı Titreşim Standartları.....	18
1.6.1. USBM (ABD Madencilik Bürosu’nun) Patlatma Standardında İzin Verilen Titreşim Değerleri.....	18
1.6.2. DIN 4150 Alman Patlatma Standardında İzin Verilen Titreşim Değerleri.....	20
1.6.3. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 30.11.2022 Tarihli “Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği”nde İzin Verilen Titreşim Değerleri.....	21
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	32
3.1. Titreşim Değerlerinin Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği’ne Göre Değerlendirilmesi.....	32

3.2. Atımların Frekansı Açısından Değerlendirilmesi.....	37
3.3. Atımların Hava Şoku Açısından Değerlendirilmesi.....	39
3.4. Titreşim Ölçümleri ve Frekans Değerlerinin İstatistiksel Karakterizasyonu.....	40
3.4.1. Bina zemininde ve son kat döşemesinde ölçülen PPV değerlerinin istatistiksel analizi.....	43
3.4.2. Bina zemininde ve son kat döşemesinde ölçülen Frekans değerlerinin istatistiksel analizi	44
3.5. Patlatma Tasarımı Önerisi.....	45
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	47
5. KAYNAKÇA.....	50
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ŞEHİR İÇİ TEMEL KAZILARINDA YAPILAN PATLATMALARIN ÇEVRESEL ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Esra ÜNVER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Bayram ERÇİKDI
2025, 55.Sayfa

Patlatmanın kaçınılmaz olduğu madencilik, tünel, otoyol, şehir içi inşaat temel kazılarında titreşim, kaya fırlaması ve hava şoku gibi çevresel problemlerle sıkça karşılaşmaktadır. Patlatma kaynaklı titreşimler yakın mesafedeki yerleşim birimlerinde yapısal hasarlara (çatlak vb.) neden olabilir. Yerleşim birimleri yakınında titreşim ölçümlerinin alınması ve sonuçlarının bilimsel olarak değerlendirilmesi patlatmaların çevresel açıdan daha emniyetli bir şekilde yapılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, şehir içi inşaat temel kazısında gerçekleştirilen 36 adet atıma eşlik edilerek patlatmalara en yakın binaların dış temel zemininde ve son kat döşemesinde eş zamanlı olarak titreşim ve hava şoku ölçümleri alınmıştır. Titreşim ölçümü sonuçları Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne göre değerlendirilmiştir.

Bina temelinde ölçülen 7 adet atıma (5, 9, 14, 15, 17, 19 ve 22 nolu atımlar) ait en yüksek parçacık hızı değeri yönetmelikte izin verilen sınır değeri aştığı, buna karşın eş zamanlı olarak bina son kat döşemede ölçülen bütün değerlerin sınır değerler içerisinde kaldığı görülmüştür. Bina temelinde ölçülen titreşimlere ait frekansların tamamı 40 Hz'nin üzerindedir. Bina temelinde ölçülen PPV değerleri son kat döşemesinde ölçülen PPV değerlerine göre lineer olarak değerlendirilirse ortalama 8 kat daha yüksektir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, patlatma sonucu açığa çıkacak en yüksek

parçacık hızının (PPV) nceden tahminine yönelik $PPV = 5712,8 \times SD^{-1,587}$ eşitliği 0,7981 kararlılık katsayısı (R^2) ile elde edilmiştir. Bina temelinde izin verilen en yüksek parçacık hızı değerinin aşılmaması için atımların binalara 40 m'den uzak mesafede ve gecikme başına maksimum 0,48 kg patlayıcı kullanılarak yapılması gerektiği belirlenmiştir. Ölçülen hava şoku değerleri (119,9-123,2 dBL) 140 dBL'den düşük olduğundan binalara ve insanlara hasar ve rahatsızlık verme durumu söz konusu değildir.

Anahtar Kelimeler: şehir içi kontrollü patlatma, patlatma kaynaklı çevresel sorunlar, titreşim ve hava şoku ölçümü, evresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği

Master Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL EFFECT OF BLASTINGS CARRIED OUT IN CITY FOUNDATION EXCAVATIONS

Esra ÜNVER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Bayram ERÇIKDI
2025, 55 Pages

Environmental problems such as vibration, rock flying and air shock are frequently encountered in mining, tunnels, highways and urban building foundation excavations where blasting is inevitable. Vibrations caused by blasting may cause structural damage (cracks, etc.) in nearby residential areas. Taking vibration measurements near residential areas and scientifically evaluating the results contribute to carrying out blasting in an environmentally safer manner.

In this thesis study, 36 blasting excavations carried out in urban building foundation excavations were accompanied by vibration and air shock measurements. These measurements were taken on the outer foundation ground of the settlement closest to the blasts and on the last floor foundation slab of the building. Vibration measurement results were evaluated according to the Environmental Noise Control Regulation.

It was observed that the highest particle velocity values were recorded 7 pulses (pulses numbered 5, 9, 14, 15, 17, 19 and 22) measured at the building foundation exceeded the limit value allowed in the regulation, whereas all the values measured simultaneously at the top floor of the building remained within the limit. All vibration frequencies measured at the building foundation were above 40 Hz. If the PPV values measured at the building foundation are linearly compared to those at the top floor slab,

they are on average 8 times higher. As a result of the statistical analysis, the equation $PPV = 5712.8 \times SD^{-1.587}$ was obtained with a stability coefficient (R^2) of 0.7981 for the prediction of the highest particle velocity (PPV) resulting from the explosion. It was determined that in order not to exceed the maximum PPV allowed at the building foundation, shots should be made at a distance of more than 40 m from the buildings and using a maximum of 0.48 kg of explosive per delay. Since the measured air shock values (119.9-123.2 dBL) are lower than 140 dBL, there is no damage or discomfort to buildings or people.

Key Words: Controlled blasting in urban area, blast-induced environmental problems, ground vibration and air shock measurement, Environmental Noise Control Regulation.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Patlatmalı kazılarda kullanılan patlatma geometrisi terimleri.....	3
Şekil 2. Değişik dilim kalınlıklarında dilim ötesi bölgenin durumu.....	4
Şekil 3. Patlatma sonucu oluşan çevresel problemler, yapısal ve kişisel tepkiler.....	8
Şekil 4. Kaya fırlamasını engellemek için şarjlı deliklerin üzerinin örtülmesi.....	12
Şekil 5. USBM'nin alternatif kriter analizi	19
Şekil 6. Alman DIN 4150 normuna göre izin verilen maksimum parçacık hızı değerleri	20
Şekil 7. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nde izin verilen titreşim değerleri.....	22
Şekil 8. Saha çalışmasının yürütüldüğü bölgenin Google Earth üzerinden görüntüsü.....	23
Şekil 9. Sahada gerçekleştirilen patlatma bölgeleri ve titreşim ölçüm noktaları.....	24
Şekil 10. Patlatmalardan kaynaklı titreşimlerin Ayyapı Bostancı-1 Zirve Sitesi Bloklarının dış zemininde (a) ve son kat döşemesinde (b) ölçümü.....	24
Şekil 11. Üç sıralı seri bağlantılı Nonel ateşleme tasarımı, bir deliğin şarjı ve tasarım parametreleri ile bir atıma ait ateşleme bağlantısının sahadaki görünümü.....	26
Şekil 12. (a) Patlatma deliklerinin açılması, (b) kullanılan patlayıcı maddeler ve NONEL kapsüller, (c, d) sıkılama işlemi, (e) deliklerin üzerinin membranla örtülmesi, (f) patlatma işlemi sonrası görünüm.....	27
Şekil 13. Ölçülen titreşimlere ait PPV ve frekans değerlerinin grafiksel gösterimi.....	33
Şekil 14. 5, 9, 14, 15, 17, 19 ve 22 nolu atımlara ait PPV ve frekans değerlerinin grafiksel gösterimi.....	33
Şekil 15. Ölçülen bazı atımlardan titreşim tahmin eşitliği kullanılarak oluşturulan kararlılık katsayısı grafiği.....	36
Şekil 16. Bina son kat döşemesinde ölçülen frekans değerlerinin grafiksel görünümü..	38
Şekil 17. Bina temelinde ölçülen frekans değerlerinin grafiksel görünümü.....	38
Şekil 18. Atımlarda ölçülen hava şoku değerleri.....	39
Şekil 19. Aynı gecikme başına düşen patlayıcı miktarı esas alınarak bina temelinde ölçülen hava şokunun mesafeye göre değişimi.....	40
Şekil 20. PPV ve frekans değerlerine ait histogram grafikleri.....	42
Şekil 21. Bina zemini ve son kat döşemesindeki PPV sonuçlarının %95 aralığında kıyası.....	43
Şekil 22. Bina zemini ve son kat döşemesindeki frekans değerlerinin %95 aralığında kıyası.....	44
Şekil 23. Patlatma yapılmaması önerilen alanın temsili sınır çizgisi.....	46

TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İnsan tepkilerine göre oluşan parçacık hızı seviyeleri.....	8
Tablo 2. Patlatma kaynaklı titreşimler üzerinde etkili olan parametreler.....	10
Tablo 3. Alman DIN 4150 normuna göre izin verilen maksimum parçacık hızı değerleri.....	20
Tablo 4. Maden ve taşocakları ile benzeri alanlarda patlatma nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapıda yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri.....	21
Tablo 5. Yapılan patlatmalara ait titreşim ve hava şoku ölçüm değerleri ve tasarım parametreler.....	28
Tablo 6. 5, 9, 14, 15, 17, 19 ve 22 nolu atımlara ait bina temelinde ve son kat döşemede ölçülen pik parçacık hızı ve frekans değerleri.....	34
Tablo 7. Bazı atımlara ait titreşim ölçüm değerleri ile gecikme başına düşen maksimum patlayıcı miktarı ve mesafe arasındaki ilişki.....	34
Tablo 8. Titreşim tahmin eşitliği kullanılarak hesaplanan ve gerçekte ölçülen PPV değerlerinin karşılaştırılması.....	36
Tablo 9. Titreşim ölçümleri ve frekans değerlerine yönelik tanımlayıcı istatistikler.....	41
Tablo 10. PPV ve frekans değerleri için One sample Kolmogorov-Smirnow normallik testi	41
Tablo 11. Bağımsız örnekler T testi ile zemin ve son kat PPV değerlerinin benzerlik analizi.....	43
Tablo 12. Bağımsız örnekler T testi ile zemin ve son kat Frekans değerlerinin benzerlik analizi	44
Tablo 13. Titreşim tahmin eşitliği kullanılarak farklı mesafelerde açığa çıkması beklenen PPV değerleri.....	44
Tablo 14. Sahada yapılacak kontrollü patlatmalar için önerilen tasarım parametreleri..	45

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Madencilik ve inşaat operasyonları, kayaları kazmak için ağırlıklı olarak patlayıcı ve mekanik kazı sistemlerine dayanmaktadır. Kazılarda ekskavatör vb. ekipmanların kullanımı, sertliği ve dayanımı yüksek kayalarda (bazalt vb.) kazı maliyetlerinin ve süresinin artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle sert kayaçların kazısında yaygın olarak patlayıcı kazı sistemleri tercih edilmektedir. Madencilik faaliyetlerinin yanı sıra taş ocakları, otoyol şevleri, bina temel kazıları, boru hatları veya kanal açma, bina yıkımı, tünel ve baraj inşasında patlatmalı kazılardan faydalanılmaktadır. Ancak yapılara yakın mesafede yapılan patlatmalarda ve kontrolsüz atımlarda yer sarsıntısı, hava şoku, taş fırlaması ve toz oluşumu nedeniyle çevresel problemlerle karşılaşılabilir.

Emniyetli ve verimli bir patlatma, arzu edilen parçalanma derecesinde, yeterince kabarmış, kısmen ötelenmiş, gevşek bir yığının elde edilmesine izin veren ve yersarsıntısı, hava şoku, taş savrulması ve toz oluşumu gibi çevresel sorunları olmayan ya da en az düzeyde olan bir patlatmadır. Genel olarak patlatma sonucu açığa çıkan yer sarsıntılarının büyüklüğü; gecikme başına kullanılan maksimum patlayıcı miktarı, ölçüm noktası ile atım sahası arasındaki mesafe, jeolojik yapı, ateşleme tekniği ve patlatma tasarım parametreleri (dilim kalınlığı, delik çapı, delik boyu, yük mesafesi, delikler arası mesafe, sıkılama vb.) ile ilişkilidir. Patlatma kaynağından belirli bir mesafedeki yapının, patlatma kaynaklı sorunlardan etkilenmemesi için, söz konusu yapıların yanında gerekli ölçümlerin alınması ve sonuçların bilimsel olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre gerekmesi durumunda uygulanan patlatma paterni revize edilerek çevresel açıdan daha güvenli patlatmalar yapılabilir.

1.1.1. Tezin Gerekçesi ve Amacı

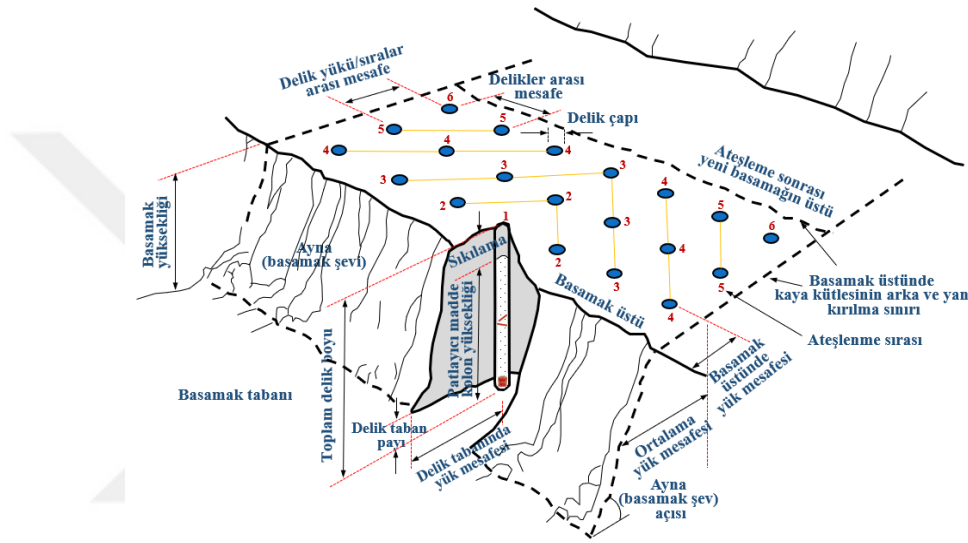
Patlatmalı kazılar günümüzde madencilik faaliyetlerinin yanı sıra karayolu, tünel, boru hattı, bina yıkımı vb. birçok farklı alanda uygulanmaktadır. Şehir içi inşaat temel kazılarında ise yerleşim birimlerine yakınlığı nedeniyle genellikle mekanize kazı sistemi tercih edilmektedir. Ancak mekanize kazı, sertliği ve dayanımı yüksek kayaçlarda (bazalt vb.) kazı maliyetlerinin ve süresinin artmasına neden olmakta, oluşan gürültü nedeniyle çevresel şikayetlerle karşılaşilmektedir. Kazı maliyetlerini azaltmak ve kazı süresini kısaltmak amacıyla şehir içi inşaat temel kazılarında da son yıllarda patlatmalı kazı tercih edilmeye başlanmıştır. Yerleşim birimlerine çok yakın mesafede yapılan şehir içi inşaat temel kazılarındaki patlatmaların kontrollü bir şekilde yapılması ve ölçümlerle izlenmesi çevresel açıdan son derece önemlidir. Kontrolsüz yapılan atımlar yer sarsıntısı, hava şoku, taş fırlaması ve toz oluşumu gibi bazı çevresel problemlere yol açabilmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının amacı, şehir içinde yerleşim birimlerine çok yakın mesafede inşaat temel açma amaçlı yapılan patlatmaların çevrede bulunan yapılara etkisini incelemek amacıyla, 8 kat yüksekliğe sahip binaların temel zemininde ve üst kat döşemesinde eş zamanlı olarak titreşim ve hava şoku ölçümü olarak sonuçlarının;

1. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne göre değerlendirilmesi
2. Bina temeli ve son kat döşemesinde alınan verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve değişiklik gösterip göstermediğinin ortaya konulması
3. Ölçekli mesafeye bağlı olarak maksimum parçacık hızının önceden tahmin edilmesine yönelik titreşim tahmin eşitliğinin geliştirilmesi ve
4. Kazı sahasında çevresel açıdan emniyetli patlatmaların sürdürülebilmesi için optimum patlatma tasarım parametrelerinin (delik boyu, gecikme başına patlayıcı miktarı vb.) belirlenmesidir.

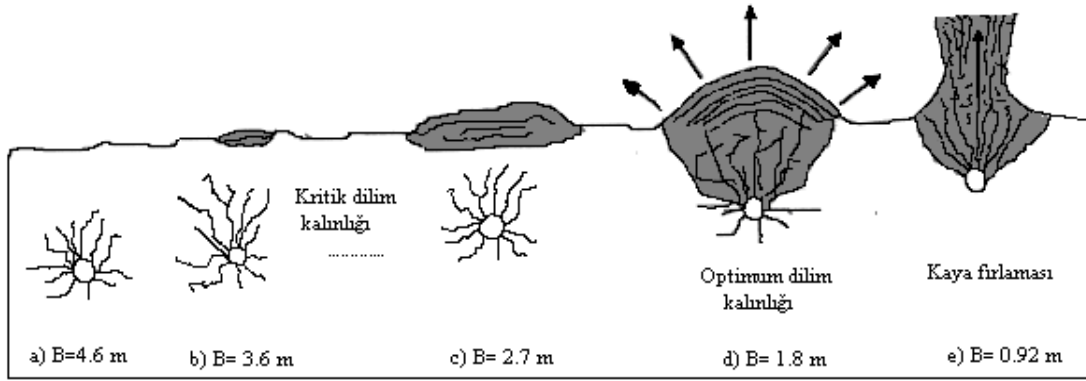
1.2. Patlatma Geometrisi Terimleri

Patlatmalarda kullanılan patlatma geometrisi terimleri arasında delik çapı, dilim kalınlığı, delikler arası mesafe, sıkılama, serbest yüzey yönü, basamak yüksekliği, delik boyu ve delik taban payı yer alır (Şekil 1). Açık işletme madenlerinde ve taş ocaklarında kazı sırasında oluşturulan ayrı kotlardaki her kademe basamağı, basamağın üst ve alt kodu arasındaki fark ise basamak yüksekliğini ifade etmektedir.



Şekil 1. Patlatmalı kazılarda kullanılan patlatma geometrisi terimleri (Kesimal, 2025)

Delik çapı (mm) patlatma verimliliğini ve maliyetini etkileyen bir faktördür. Küçük çaplı bir deliğe daha az patlayıcı madde yerleştirildiğinden, gecikme başına kullanılan patlayıcı miktarı azalmış olacak ve böylece yer sarsıntısı değerleri düşük çıkabilecektir. Delik çapının artması ile delikler daha fazla patlayıcı madde içerecek ve gecikme başına düşen patlayıcı miktarının artması sonucu küçük çaplı deliklere kıyasla çevresel etkisi daha fazla olacaktır. Dilim kalınlığı, serbest yüzey ile ilk sıra veya delik sıraları arasındaki mesafe olarak ifade edilir. Dilim kalınlığının (B) basamak yüksekliğinin (H) en fazla yarısına eşit olması istenir ($B \leq H/2$). Her kaya birimi için optimum bir dilim kalınlığı vardır. Seçilen dilim kalınlığı optimumdan düşükse kaya fırlaması ve hava şoku; yükseğe yer sarsıntısı ve şev gerisinde çatlak oluşumu vb. problemlerle karşılaşılabilir (Şekil 2). Her işletme ve her kaya birimi için optimum dilim kalınlığını deneme yanılma yolu ile belirleme yaklaşımı, güncelliğini korumaktadır (Yılmaz, 2010).



Şekil 2. Değişik dilim kalınlıklarında dilim ötesi bölgenin durumu

Simangunsong vd. (2006) bir kireçtaşı ocağında gerçekleştirilen patlatmalı kazılara eşlik ederek dilim kalınlığının titreşim büyüklüğüne ve parçalanma boyutuna etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlardan dilim kalınlığının artması ile birlikte titreşim büyüklüğünün ve parçalanma boyutunun arttığı gözlemlenmiştir. Blair ve Armstrong (2001) patlatmalı kazılarda farklı dilim kalınlıklarının (2,6 m, 5,2 m ve 10,4 m) titreşim büyüklüğüne etkisini incelemek amacıyla tek delik atımları gerçekleştirmiş ve dilim kalınlığı ile titreşim arasında belirgin bir ilişki olmadığını ifade etmiştir. Bazı araştırmacılar ise titreşimin dilim kalınlığının artması ile birlikte azaldığını belirtmişlerdir. Bunun nedeni, düşük dilim kalınlıklarında, patlatma sonucu açığa çıkan enerjinin bir kısmının yüksek kuvvetle atmosfere ulaşması ve bu dalganın birim değişiminden kaynaklanan yansıma ile tekrar kaya kütlesi üzerinde ilerleyen dalgaların üzerine binmesi ile ilişkilendirilmiştir (Berber, 2007; Uysal vd., 2007).

Delikler arası mesafe aynı sıradaki iki delik arasındaki mesafedir. Delikler arasındaki mesafe genellikle dilim kalınlığının bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Delikler arası mesafenin dilim kalınlığına oranı genellikle 1,0-1,8 arasında değişmektedir. Delikler arası mesafenin dilim kalınlığına oranı 1'den küçükse, sıkılama malzemesinin zamanından önce boşalması nedeniyle delikler arasında erken çatlaklar oluşabilir. Bunun sonucunda hızlandırılmış gaz kaçağı, hava çarpması, gürültü, yığın oluşumu gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Tersine, oran çok büyükse hatalı parçalama ve/veya yetersiz parçalama nedeniyle büyük parçalar oluşabilir.

Sıkılama işlemi, deliğe patlayıcı şarj işlemi yapıldıktan sonra deliğin kalan üst kısmının genellikle dilim kalınlığına eşit) kırılmış kaya malzemesi ile doldurulması işlemidir. Bu işlemin amacı, patlatma işleminin yapıldığı sırada enerjinin kayaç içerisinde kalıp kayacın daha iyi kırılması, daha iyi öteleme sağlamak ve taş fırlamasını engellemesidir. Sıkılama, verimli bir patlatma için en önemli faktörlerden biridir. Yeterli sıkılama malzemesi kullanılmazsa ve boyutu doğru seçilmezse, sıkılama malzemesi delikten fırlayabilir ve patlayıcı enerjisi etkili bir şekilde kırma ve parçalama işini yapamaz. Yeterli miktarda sıkılama yapmak parçalanma işlemini artırır; bununla birlikte hava şoku ve kaya fırlamasını kontrol altında tutar. Diğer taraftan olması gerektiğinden daha fazla yapılan sıkılama deliğin üst kısımlarında iri parçalanma, düşük pasa kabarması ve titreşime yol açabilir. Sıkılama işleminde, ucuz ve teminin kolay olması nedeniyle, genellikle delik delinirken açığa çıkan kırıntılar kullanılmaktadır.

Cevizci (2010) kireçtaşı ocaklarında yapmış olduğu çalışmada deliklerde geleneksel sıkılama malzemesi (deliklerden çıkan kırıntı) kullanılarak yapılan sıkılama ile alçı kullanarak yapılan sıkılama işleminin patlatma verimliliğine etkisini incelemiştir. Yapılan değerlendirmede sıkılama işlemini alçı ile yapmanın titreşim ve hava şokunu bir miktar arttırdığı, kayaç parçalanmasını iyileştirdiği ve atımlarının %16 daha düşük maliyetle gerçekleştirilmesine olanak sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca yapılan incelemede patlatma sonucu açığa çıkan +30 cm ebatındaki ürün oranının, geleneksel yöntemle yapılan sıkılamada %30 iken alçıda %4 'e kadar düştüğü gözlenmiştir (Cevizci, 2012).

Choudhary ve Agrawal (2022) açık işletmelerde üç farklı sıkılama malzemesinin (delgi sonucu açığa çıkan kırıntı malzemesi, 3-7 mm boyutunda kırılmış agrega ve sentetik kauçuk tıpa) patlatma verimliliğine etkisini araştırmıştır. Deneme atımlarından sıkılama malzemesi olarak kauçuk tıpa ve kırılmış agrega (3-7 mm) kullanımının patlatma enerjisinin delik içerisinde daha iyi hapsedilmesini sağladığı ve taş fırlaması oluşumunu azalttığını vurgulamışlardır. Bununla birlikte sıkılamada kırıntı malzemesine kıyasla kauçuk tıpa kullanımının daha yüksek gaz basıncı oluşturması nedeniyle patlatma noktasına 50 m'ye kadar olan mesafelerde titreşimleri bir miktar arttırdığı, 50 m'den daha uzak mesafelerde ise normal seviyede olduğu saptanmıştır. Ayrıca kauçuk tıpa kullanımının şev gerisinde çatlak oluşumunu azalttığı, daha iyi parçalanma sağlayarak kırma maliyetlerini ve yükleme sürelerini azalttığı belirtmişlerdir.

Sıkılama boyu da patlatma verimliliğine ve çevresel sorunlara (titreşim oluşumu, taş fırlaması vb.) doğrudan etki etmektedir (Cevizci ve Özkahraman, 2012, Shi vd., 2023). Shi vd., (2023) sıkılama boyunun arttırılmasının kaya parçalanmasını kolaylaştırdığını belirtmiştir. Cevizci ve Özkahraman (2012) ise sıkılama boyunun gereğinden fazla tutulmasının daha iri bloklu kaya parçalarının oluşmasına neden olarak kırma, öğütme ve nakliye maliyetlerinin artmasına ve patlatma veriminin azalmasına neden olduğunu vurgulamıştır.

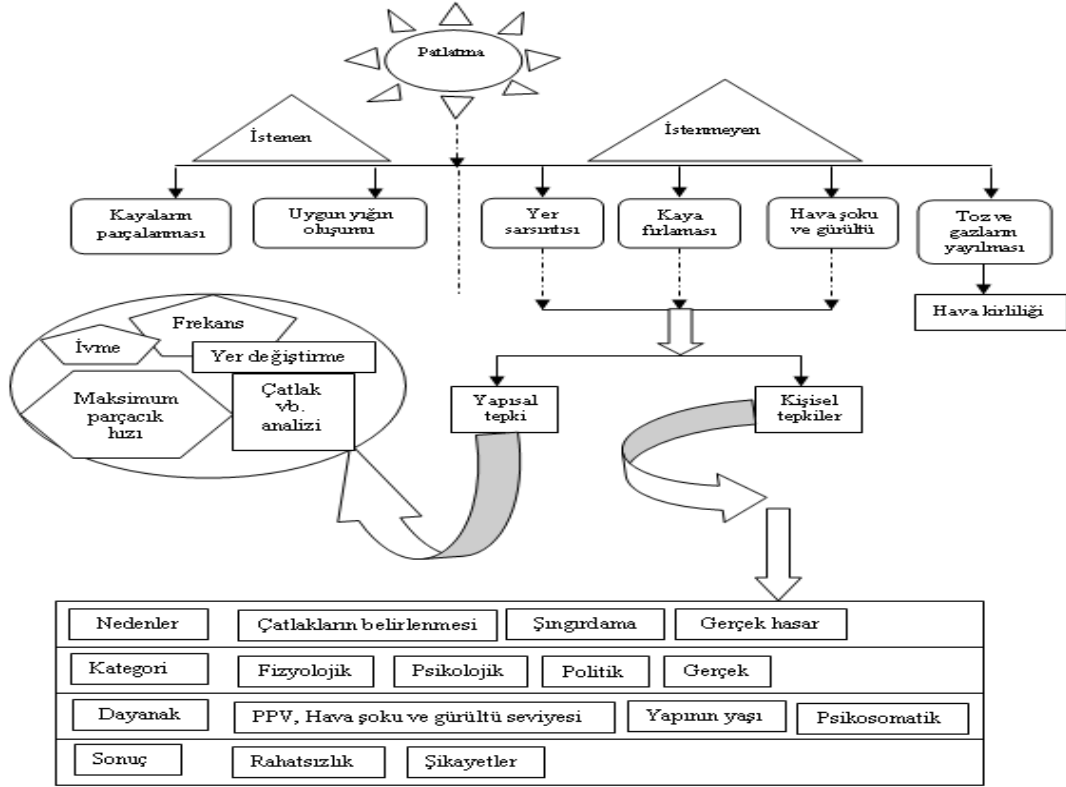
Serbest yüzey (patlatma yönü), patlatma sırasında kayanın parçalanmasını kolaylaştıran ve parçalanmış kayanın ileri hareketine imkan veren, kayanın sağlamlığına, yapısına (fay, eklem, tabakalanma vb.) ve delik eğimine bağlı olarak dik veya 90° den az eğimli bir şev olarak adlandırılmaktadır. Serbest yüzeyin olması, patlatmanın verimini, patlatmada kullanılacak patlayıcı madde miktarını ve titreşim oluşumu gibi çevresel problemleri doğrudan etkilemektedir. Örneğin; tünel patlatmalarında 1 m³ kayanın parçalanması için gerekli olan patlayıcı miktarı (kg), serbest yüzeyin düşük olması ve patlatmanın sıkışık alanda yapılması nedeniyle açık işletme ve taşocağı basamaklarında yapılan patlatmalara göre 1,5-2,5 kat daha fazladır. Aynı şekilde iletim/boru hattı kanal kazılarında da serbest yüzeyin dar olması nedeniyle daha fazla patlayıcı madde gerekebilmektedir. Bu durumda patlatma sonucu açığa çıkan titreşim değerleri de artabilmektedir. Zheng vd. (2023) patlatmalı kazılarda serbest yüzey sayısının artmasıyla birlikte titreşimlerin azaldığını belirtmiştir.

Basamak yüksekliği, basamağın alt ve üst kotu arasındaki dikey mesafedir. Delik boyu (uzunluğu) basamak tabanının daha düzgün ve tırnaksız olmasını sağlamak için basamak yüksekliğinden biraz daha derin delinmektedir ve bu fazla kısım delik taban payı olarak isimlendirilmektedir. Delik boyu, basamak üst kotundan itibaren, dip delgi mesafesi dahil, aradaki toplam uzunluğu ifade etmektedir. Deliğin en alt kısmına konulan kapsüle duyarlı patlayıcı maddeye (yemleyici) dip şarj, dip şarjının üzerinde bulunan yemlemeye duyarlı şarj (genelde emülsiyon patlayıcı ya da emülsiyon/kuru ANFO) ise kolon şarjı olarak adlandırılmaktadır. Deliğin içine yerleştirilen patlayıcı maddenin sıkıştırılması amacıyla deliğin en üst kısmına kadar 0-25 mm boyutunda kırılmış kaya kumu/malzemesi ile delik doldurulmaktadır.

Literatürde patlatma tasarım parametrelerinin (dilim kalınlığı, delikler arası mesafe, sıkılama vb.) belirlenmesi amacıyla bazı ampirik formüller bulunsa da verimli, ekonomik ve çevresel açıdan emniyetli bir patlatmanın en uygun tasarım parametrelerini her işletme ve kaya birimi ve kütlesi için deneme yanılma yoluyla belirleme yaklaşımı güncelliğini korumaktadır. Özer vd. (2013) patlatmaların çevresel etkilerini azaltmak için titreşim ölçümleri alınarak gerekmesi durumunda patlatma tasarımlarının revize edilmesini önermiştir.

1.3. Patlatma Kaynaklı Çevresel Sorunlar

Patlayıcı madde ile kayaçların kazısı madencilik sürecinin ayrılmaz bir parçasıdır. Patlatmanın asıl amacı, kazı işlemlerinde kayayı kırarak gevşetmek veya ötelemektir. Patlatma esnasında açığa çıkan enerjinin bir bölümü, sismik dalga ve hava şoku şeklinde verimsiz “atık” enerjiye dönüşür. Bazı araştırmacılar patlatma sonucu açığa çıkan enerjinin büyük bir kısmının parçalanmada kullanıldığını, geri kalan kısmının ise yer sarsıntısı, hava şoku, kaya fırlaması, gürültü, ve şev gerisinde çatlakların oluşumuna neden olduğunu ifade etmişlerdir (Murmu vd., 2018; Agrawal vd., 2021). Bu enerji, patlatma kaynağından uzaklaşarak ihmal edilebilir bir düzeyde tamamen sönmöleninceye kadar uzun bir mesafe kat edebilmektedir. Bu zaman içerisinde, kaya yapılarında ve yapılarda hasara ve yerleşim yeri sakinlerinin korku yaşamasına neden olabilir (Kahriman vd., 1998, Mpofu vd., 2021). Patlatma sonucu oluşan başlıca çevresel sorunlar titreşim (yer sarsıntısı), hava şoku, kaya fırlaması, toz ve gaz oluşumudur (Şekil 3).



Şekil 3. Patlatma sonucu oluşan çevresel problemler, yapısal ve kişisel tepkiler (Raina vd., 2004)

Karadoğan (2008) patlatmalı kazı sahası çevresindeki kişilerin patlatmalara karşı gösterdiği tepkileri ölçmek amacıyla yaptığı anket çalışmasında, 0,8 mm/s'den daha düşük seviyedeki titreşimlerin hissedilmediği, 9-25 mm/s aralığında rahatsız edici olduğu ve >100 mm/s'den yüksek olduğu durumda korkulu hissettiklerini gözlemlemiştir (Tablo 1).

Tablo 1. İnsan tepkilerine göre oluşan parçacık hızı seviyeleri (Karadoğan, 2008)

Hissetme Değerlendirme Yargısı	İnsan Tepkisi	Parçacık Hızı (mm/s)
Hissetmedim	Hissetmedim	0-0,8
Az	Rahatsız olmadım	0,8-1,5
Hissettim	Biraz endişeli	1,5-9
Biraz Fazla	Rahatsız edici	9-25
Çok	Şiddetli, gergin	25-50
Oldukça Çok	Riskli, sinirli	50-100
Tehlikeli	Korkulu, huzursuz	>100

Kuzu ve Güçlü (2009) tünel patlatmalarından kaynaklanan titreşimlerin insanlar üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmasında tünellerde tam ayna patlatması yerine yarım ayna patlatması yapılmasının ve patlatma süresinin 480-9000 ms'den 270-330 ms'ye düşürülmesinin hem kişilerin patlatmaya karşı olan tepkisini azalttığını hem de titreşim seviyelerinin makul seviyelere düştüğünü vurgulamışlardır.

Patlatma sonucu açığa çıkan titreşim ölçümlerinin alınmasının ve patlatma tasarımlarının optimize edilmesinin sadece yerleşim birimleri açısından değil aynı zamanda okul, cami ve tarihi eserler gibi hassas yapıların korunması açısından da son derece önemli olduğu ifade edilmiştir (Erçikdi vd., 2003, 2004). Bazı araştırmacılar açık ocak şevlerinde patlatma kaynaklı titreşim ölçümlerinin alınmasının şevlerin duraylılığının izlenmesi açısından kritik öneme sahip olduğunu vurgulamışlardır (Kesimal vd., 2008; Aydan vd., 2014; Matidza vd., 2020).

Uysal vd. (2008) Seyitömer Linyit İşletme sahasında sismik dalgalara karşı bariyer görevi üstlenecek yapay süreksizlikler oluşturmak amacıyla patlatma deliklerine belirli bir mesafede boş deliklerinin delinmesinin (kanal oluşturma) titreşim büyüklüğünü %18'e kadar düşürdüğünü gözlemlemiştir.

1.3.1. Yer Titreşimleri

Yer titreşimlerinin enerji seviyeleri ve sebep olabileceği etkiler genel itibari ile parçacık hızı (mm/s), parçacık ivmesi (mm/s^2), parçacık yer değiştirmesi (mm) ve titreşim frekansı (Hz) ile belirlenir. Parçacık hızı; titreşim hareketinin sebep olması ile, yerin bir parçacığının birim zamandaki yer değiştirmesidir. Birimi mm/s'dir. Bu parametre ilk haliyle sabit olduğundan sıfırdan başlayarak en pik noktasına ulaşır ve giderek yavaşlayarak sönümlenir. Yer titreşim analizlerinde kullanılan en önemli parametrelerden biri parçacık hızıdır. Parçacık yer değiştirmesi; titreşim etkisine uğrayan bir parçacık ya da noktanın başlangıç pozisyonuna olan mesafesidir. Birimi mm'dir. Parçacık ivmesi; birim zamanda parçacık hızında meydana gelen değişimdir. Birimi mm/s^2 ya da yerçekimi ivmesinden dolayı g'dir. Frekans; zemindeki bir parçacığın birim saniyede kaç kez (devir/saniye) sarsıldığını gösterir. Birimi hertz (Hz)'dir. Çevresel etkilerin değerlendirilmesinde yer sarsıntısının frekansı da en az parçacık hızı kadar önemli bir parametredir. Titreşimler üzerinde etkili olan başlıca parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Patlatma kaynaklı titreşimler üzerinde etkili olan parametreler (Elevli ve Arpaz, 2010; Murmu vd., 2018; Shahri ve Asheghi, 2018)

Kontrol edilebilir parametreler		Kontrol edilemeyen parametreler
Patlatma tasarım parametreleri	Patlatma parametreleri	Jeoteknik ve jeomekanik parametreler
• Delik çapı • Delik boyu • Basamak yüksekliği • Dilim kalınlığı • Delikler arası mesafe • Sıkılama • Delik taban payı • Sıra ve delik sayısı • Delik eğimi • Patlatma paterni	• Patlayıcı tipi • Gecikme başına düşen maksimum patlayıcı miktarı • Delik başına düşen patlayıcı miktarı • Toplam patlayıcı miktarı • Özgül şarj • Gecikme süresi • Patlama hızı • Atım yönü • Ateşleme sistemi	• Kaya kütle özellikleri (dayanım, jeolojik yapı vb.) • Yeraltı suyu durumu • Süreksizlikler, eklem vb. • Tabakalanma düzlemi

Sarsıntıların büyüklüğü ve frekansı, arazinin kaya kütle yapısı ile de çok ilgilidir. Yapılar, düşük frekanslarda daha fazla sarsıntıya maruz kalmaktadır. Özellikle 4-15 Hz arasındaki frekanslar, yapılar için sorun oluşturmaktadır. Ülkemizde 4-10 Hz, diğer ülkelerde ise 4-20 Hz düşük frekanslar olarak kabul görmektedir. İç yapısı itibari ile boşluklu yapılar, toprak zeminin kalınlığı ve atım noktasından uzak mesafelerde genellikle düşük frekanslı titreşimler meydana gelmektedir.

Binaların zarar görme ihtimali, zeminde patlatma sonucu oluşan uyarıcı dalganın frekansı ile söz konusu binanın doğal (özyapısal) frekansının birbiri arasındaki ilişkiye bağlıdır. Patlatmalarda en kritik durum zemindeki uyarıcı dalganın frekansının, genellikle 5-10 Hz arasında değişen bina özyapısal frekansına eşit olduğunda oluşur. Bu durumda bina rezonansa girer ve zemindeki uyarıcı dalga geçip gittiği halde bina sarsılmaya devam eder. Parçacık hızının sınır değerlerin altında olması durumunda binaya herhangi bir zarar gelmeyecek ancak insanlar rahatsız olacaktır.

Fakat bina rezonans durumundayken parçacık hızı da yeterli büyüklükte ise binada hasar oluşur. Bir diğer durum zemindeki uyarıcı dalganın genliği tam yeterli düzeyde olmasa bile rezonans halindeki binanın bu genliği birkaç kat arttırması sonucu bina yine de hasar görebilir. Diğer bir deyişle yer sarsıntısı binaya iletildiğinde genlik artışı olabilir. Buna büyütme faktörü denilmektedir.

1.3.2. Kaya Fırlaması

Kaya kütlelerini kırmak amacı ile patlayıcı maddeler kullanıldığında temel olarak öncelikli, ses üstü hızda gelişen kimyasal reaksiyonun yarattığı şok enerjisi etkili olmaktadır. Yüksek basınç altında reaksiyon sonucu oluşan gaz, parçalanan kütleyi gevşeterek kaydırır.

Patlayıcı maddenin kaya kütlesi içinde iyi bir şekilde hapsedilmediği durumlarda, reaksiyon sonucu oluşan yüksek basınçlı gaz ürünleri, kaya kütlesinde bulabilecekleri çatlaklardan atmosfere atılır.

Çok yüksek hızda gerçekleşen gaz deşarjı bazı kayaların kırılmasına neden olduğu gibi kaya parçalarının da kırılmasına neden olur. Fırlayan kaya parçaları çevrede tehlike oluşturur.

Taş savrulmasını kontrol edebilmek için;

- Patlayıcılar uygun çap ve boyutta delikler kullanılarak kaya yapısı içinde olabildiğince homojen dağılmalı ve hapsedilmelidir.
- Uygun delik geometrisi hesaplanmalı ve delikler buna göre şarj edilmelidir.
- En az delik ayna mesafesi boyutunda sıkılama boyu bırakılmalı ve uygun bir malzeme kullanılarak sıkılama yapılmalıdır.
- Gecikmeli kapsüller kullanılmalı, şarjlı deliklerin üzeri kapatılmalıdır (Şekil 4).

Açık işletmelerde taş savrulması daha çok önemlidir. Savrulan taşların, 1000 metreye kadar fırlayabildiği ve ölümle sonuçlanan kazalara neden olduğu bilinmektedir. Fırlayan kaya parçaları ocak sahası ve çevresindeki yapılarda (ev, yol vb.) ve ekipmanlarda hasara yol açabileceği gibi yaralanmalı ve ölümcül kazalara da neden olabilir (Karakuş, 2012).



Şekil 4. Kaya fırlamasını engellemek için şarjlı deliklerin üzerinin örtülmesi

Uygun patlatma tasarımı ve ocak sahasındaki kaya kütle yapısında inceleme ile taş fırlaması azaltılabilir. Ayrıca olası taş fırlama mesafesinin de doğru tahmin edilmesi bu tür kazaların önüne geçebilir (Hüdaverdi, 2022). Jimeno vd. (1995) homojen ve masif kayalara kıyasla yoğun bir şekilde çatlak ve eklem içeren kayaların taş fırlama potansiyelinin daha fazla olduğunu belirtmiştir. Hüdaverdi (2022) bir taş ocağında 77 adet patlatmaya eşlik ederek patlatma sonrası gerçekleşen taş fırlama mesafelerini ölçmüş ve patlatma tasarım parametreleri (dilim kalınlığı, delik çapı, sıkılama boyu, özgül şarj vb.) ile ilişkisini incelemiştir. Araştırmacı taş fırlama mesafesinin özgül şarj miktarının artması ile birlikte arttığını, dilim kalınlığının artmasıyla birlikte azaldığını gözlemlemiştir. Benzer şekilde diğer araştırmacılar da taş fırlamasında en önemli parametrenin özgül şarj olduğunu belirtmiştir (Rezaei vd. 2011; Ghasemi vd., 2012; Rad vd., 2018).

1.3.3. Toz Emisyonu

Kaya kütlelerinin kırılması işleminde, patlatma yöntemi kullanıldığında, ateşleme ile birlikte büyük kaya kütleleri hareketlendirilmektedir. Söz konusu hareket ile birlikte kaya kütlelerinde bir iç öğütme işlemi de oluşmaktadır. Bu iç öğütme ile, hava içerisinde dağılma ve yayılma özelliği gösteren kendisinden kopmuş oldukları kütle ile aynı bileşimde olan veya olmayan parçacıklardan oluşan toz emisyonu ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen iç öğütme nedeniyle az da olsa bir miktar toz emisyonunun meydana gelmesi kaçınılmaz bir durumdur (Kahriman ve diğerleri 2006).

1.3.4. Hava Şoku

Hava şoku, bir patlayıcı şarjının ateşlenmesiyle ilişkili basınç dalgasıdır, Hava şoku değerleri infrasonik olup, havada genellikle 20 Hz'in altında olan düşük frekanslı titreşimlerdir. Lineer-(dBL) (2 Hz ile 250 Hz) veya G-ölçekli (dBG) (8 Hz ile 40 Hz) mikrofon kullanılır. Hava şoku seviyesi; patlatma, arazi ve hava koşullarına bağlı olmaktadır. Gereğinden fazla şarj edilmiş delikler, zayıf sıkılama, açıktaki infilaklı fitil, uygun olmayan dilim kalınlığı, kayadaki çatlaklardan gaz kaçıışı patlatmadan kaynaklanan hava şoklarına neden olan önemli etkenler olarak ifade edilebilir. Hava şoku, basınç (pascal) ya da desibel (dB) olmak üzere iki farklı birimlerle ifade edilebilmektedir. ABD'de Unites States Bureau of Mines (USBM) ve Office of Surface Mining (OSM) kurallarıyla yapılan yasal düzenlemelerle hava şoku düzeyi hasar başlangıç üst sınırı 140 desibel olarak belirlenmiştir. 140 dBL rahatsızlık duyma başlangıç seviyesi, 152 dBL pencerelerin kırılma başlangıç seviyesi, 172 dBL pencerelerin çoğunun kırılması ve 182 dBL yapıların hasar görme başlangıç seviyesi olarak kabul edilmektedir (Hoek ve Bray, 1981). Hava şoku etkisi kaynağından uzaklaştıkça azaldığı bilinmektedir. Bu azalma faktörü ölçekli mesafe kavramı ile ifade edilebilmektedir (Kahrman vd. 1999). Frekans değeri 20 Hz'nin üzerinde olan şok dalgaları hissedilebilmekte ve gürültü olarak nitelendirilmekteyken, 20 Hz'nin altında frekans değerlerine sahip olan ses dalgaları duyulamamaktadır.

Hava şoku dalgalarının yayılmasında patlatma tasarım parametreleri kontrol edilebilir parametreler olarak ifade edilirken, jeolojik, topoğrafik ve atmosferik koşullar kontrol edilemeyen parametrelerdir. Hava sıcaklığı, rüzgar hızı ve yönü hava şoku dalgalarının yayılmasında etkili atmosferik parametrelerdir. Özer vd. (2020) hava şoku dalgalarının yayılımı ile hava sıcaklığı arasında yüksek bir korelasyon olduğunu, 6 m/s altındaki rüzgar hızlarının ise hava şoku dalgalarının yayılımında etkili olmadığı belirtmiştir. Kuzu vd (2009) jeolojik açıdan kaya yapısında süreksizliklerin bulunması durumunda serbest yüzey aynasından gaz çıkışlarının olabileceğini ve bu nedenle patlatma tasarım parametrelerinde değişiklik yapmanın hava şokunu azaltmada her zaman etkin bir yöntem olmayabileceğini belirtmiştir.

Hüdaverdi vd., (2007) elektrikli kapsül yerine nonel kapsül kullanımının, ince taneli malzemeye kıyasla daha iyi sıkışma sağladığı için sıkılamada şekilli ve iri taneli malzeme ile sıkılama yapılması, delik çapı veya basamaj yüksekliğinin düşürülerek gecikme başına düşen patlayıcı madde miktarının azaltılması, atım yönünün değiştirilmesi, serbest yüzey aynalarının düzensiz olduğu ilk sıradaki deliklere daha fazla sıkılama yapılması, patlatma tasarımının optimize (dilim kalınlığının ve sıkılma boyunun uygun bir şekilde belirlenmesi vb.) edilmesi ve yerleşim birimleri ile patlatma kazı sahası arasında koşulların elvermesi durumunda bariyer görevi üstlenecek ağaçlandırma yapılması işlemlerinin hava şokunu azaltılabileceğini ifade etmiştir.

1.4. Ölçekli Mesafe Kavramı

Ölçekli mesafe parametresi, patlatma faaliyetlerinden kaynaklanan titreşimlerin, çevre yapılar üzerinde neden olabileceği hasar riskinin önlenmesi ya da en aza indirilmesi konusunda yapılan çalışmalarda kullanılan parametrelerden biridir. Patlatma tasarımlarında sıklıkla kullanılan bir yaklaşım olan ölçekli mesafe parametresini içeren ampirik denklemlerden yola çıkarak maksimum parçacık hızını tahmin etmektir (Karadoğan, 2008).

Ölçekli mesafe, kavram olarak yer hareketlerinin farklı uzaklıklardaki patlatma seviyelerinin miktarları ile ilişkili bir parametredir. Ölçekli mesafe, uzaklığa bağlı olan birimsiz bir faktördür. Ölçekli mesafe, sismik gelişimi ve hava şoku enerjisini etkileyen gecikme başına şarj miktarı ve patlatma ile ölçüm noktası arasındaki mesafenin kombinasyonlarından türetilmektedir. Tahminler için öne sürülen çeşitli formüllerden en çok ölçekli mesafe ve titreşim hızını esas alan yaklaşımlara güvenilmektedir.

Parçacık hızını, ölçekli mesafeye bağlı olarak tahmin etmeyi esas alan yaklaşımlar, titreşim ölçüm cihazlarının gelişmesi ve kullanım alanı bulması ile ortaya atılmıştır. Literatürde ölçekli mesafenin belirlenmesinde sıklıkla kullanılan formülasyon aşağıda verilmiştir.

$$SD = R/\sqrt{W}$$

(Eşitlik 1)

Burada;

SD : Ölçekli mesafe

R : Patlatma noktasından uzaklık (m)

W : Gecikme başına maksimum patlayıcı miktarı (kg)' nı ifade etmektedir.

Yuvka vd. (2017) gecikme başına düşen maksimum patlayıcı madde miktarı ile toplam patlayıcı miktarının patlatma sonucu açığa çıkan titreşimlerin büyüklüğüne etkisini araştırmak amacıyla Garp Linyit İşletmeleri sahalarında bir atımda ateşlenen farklı sayıdaki delik gruplarının (10-50, 51-100, 101-150 ve 151-250) açığa çıkardığı titreşimleri kaydetmişlerdir. Atımlarda her bir deliğe gecikme başına eşit miktarda patlayıcı konulmuş, kullanılan toplam patlayıcı miktarı ve ateşlenen delik sayıları farklı olmasına karşın patlatma noktasına aynı uzaklıklarda benzer büyüklükte titreşim değerleri ölçülmüştür. Araştırmacılar titreşimlerin büyüklüğü açısından bir atımda kullanılan toplam patlayıcı miktarından ziyade gecikme başına kullanılan maksimum patlayıcı miktarının önemli olduğunu vurgulamışlardır. Benzer şekilde Kuzu ve Ergin (2005) taş ocaklarında yapılan patlatmaların çevresel etkilerini değerlendirdiği çalışmada titreşim büyüklüğünü etkileyen en önemli parametrenin gecikme başına düşen maksimum patlayıcı miktarı olduğunu belirtmiştir.

1.5. Maksimum Parçacık Hızı Tahmini

Patlatma sonucu oluşan yer sarsıntılarının önceden tahmin edilmesi büyük önem arz etmektedir. Birçok kişi ve kuruluş bu amaçla çeşitli araştırmalar yapmış ve ölçekli mesafeye bağlı maksimum parçacık hızı tahmininin en iyisi olduğu sonucuna varmışlardır. Maksimum parçacık hızı tahminine yönelik yaygın olarak kullanılan ampirik ilişki aşağıda verilmiştir.

$$PPV = k \times SD^{-\beta}$$

(Eşitlik 2)

Burada: k, kaya kütlelerinin türüne bağlı sarsıntı iletim katsayısı, β , kaya kütlelerinin sarsıntıyı söndürme katsayısıdır.

Ölçülen en yüksek parçacık hızı ve ölçekli mesafe değerlerinin ilişkilendirilmesi sonucunda, parçacık hızı tahmin denkleminde yer alan saha sabitleri (k ve β) belirlenmektedir. Bu iki veri arasındaki ilişkinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel değerlendirmenin güvenilirliği ve kayda değer olması için en az 30 veriye ihtiyaç duyulmaktadır (Kahriman, 2002; Özer, 2008). İstatistiksel açıdan yeterli veri çiftiyle yapılan bir değerlendirme sonucu bulunan parçacık hızı tahmin denkleminin başarılı sonuç vermesi ve güvenli olması için tahmin denkleminin %95 güven aralığına uyum göstermesi ve kararlılık katsayısı (r^2) değerinin 0.7'den büyük olması gereklidir. Bulunan k ve β sabitleri, kontrollü patlatma ve tasarım uygulamalarında, titreşim ölçüm aletinin olmadığı durumlarda bazı pratik tabloların hazırlanması suretiyle uygulayıcılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Jeolojik süreksizlikler, saha sabitleri, patlayıcı özellikleri, patlatma geometrisi ve gecikme aralığına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. %95 doğruluk derecesine sahip tahmin eşitlikleri maksimum paracık hızının tahmininde daha sağlıklı sonuçlar verdiği bilinmektedir. Kahriman (2004) kireçtaşı ocağında yapılan düşey delikli patlatmalardan açığa çıkan yer sarsıntısı parametrelerinin analizinde %95 güven aralığındaki tahmin eşitliği ile tahmin edilen titreşim değerlerinin ölçülen değerlere oldukça yakın olduğunu ortaya koymuştur.

Patlatmanın henüz yapılmadığı yerlerde ön değerlendirme amaçlı olarak patlatma kaynaklı titreşim verisi olan maksimum parçacık hızının öngörülmesi, patlatma anında gerçekte oluşacak ve titreşim ölçüm cihazı tarafından kaydedilecek gerçek maksimum parçacık hızının kesin olarak tahmin edilmesini sağlamayabilir. Ayrıca bu tür tahmin yöntemleri, arazinin jeolojik/kaya özelliklerini (fay, süreksizlikler, boşluklu yapı, ortamın kaya ya da zemin mi içerdiği vb.) göstermesi ve yapıların yapısal hasarı açısından son derece kritik bir parametre olan “frekansı” önemsememektedir. Bu nedenle öngörülerden elde edilen sonuçlar kesinlik belirtmemekte olup, patlatmaların çevredeki yapılara (baraj gövdesi, endüstriyel tesisler, yerleşim birimleri, okul, cami vb.) gerçek anlamda etkilerinin belirlenmesi, patlatma anında yapılacak titreşim ölçümü, hava şoku ölçümü ve gözlemlerle (taş fırlaması vb.) mümkündür.

Kahriman vd. (2006) Hisarcık açık işletme bor madeni dekapaj kazılarında gerçekleştirilen patlatmaların yaklaşık 400 m mesafede bulunan Hisarcık Kasabası yerleşim birimlerine etkisini değerlendirmek amacıyla titreşim ve hava şoku ölçümleri almıştır. Toplam 304 atıma eşlik edilerek 565 adet titreşim kaydedilmiş, gecikme başına maksimum patlayıcı miktarı ve mesafe değerleri belirlenmiştir. Elde edilen verilerden yararlanarak ölçekli mesafeye (SD) bağlı maksimum parçacık hızının (PPV) tahminine yönelik titreşim tahmin eşitliği ($PPV = 561 \times SD^{-1,432}$, %95 güven aralığı) elde etmişlerdir. Daha sonra söz konusu saha için geliştirilen titreşim tahmin eşitliği kullanılarak USBM ve DIN 4150 titreşim standartlarında yapılara yönelik izin verilen titreşim hızlarını aşmadan, farklı mesafelerde (50-1000 m) gerçekleştirilecek patlatmalarda gecikme başına kullanılabilecek maksimum patlayıcı miktarlarını hesaplamışlardır.

Bazı araştırmacılar maksimum parçacık hızının tahmininde yapar sinir ağları yönteminden faydalanmanın titreşim tahmin eşitliğinin korelasyon katsayısını arttırdığını belirtmişlerdir (Fişne vd., 2011; Görgülü vd., 2015). Görgülü vd. (2015) üç farklı açık ocak işletmesinde patlatma tasarım parametrelerini (gecikme başına patlayıcı miktarı, delik sayısı, delik boyu, sıkılama, deliklerarası mesafe, dilim kalınlığı) ve kayaç özelliklerini (P dalga hızı, S dalga hızı, rezistivite) dikkate alarak yapar sinir ağları yöntemi ile yaptıkları çalışmada korelasyon katsayısı (R^2) 0,55-0,70'den 0,83-0,98'e çıkmıştır. Benzer şekilde Fişne vd. (2011) yapay sinir ağları yardımıyla geliştirdiği eşitlik ile tahmin ettiği titreşim değerlerinin gerçekte ölçülen titreşim değerlerine oldukça yakın sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir.

Cihangir (2006) bir kireçtaşı ocağında yapılan 73 adet patlatmaya eşlik ederek titreşim ölçümleri almış ve tüm verilerin birlikte analiz edilerek üretilen titreşim tahmin eşitliğine ait korelasyon katsayısına kıyasla yönler bazında ölçülen titreşim değerlerinin değerlendirilmesi sonucu üretilen eşitliklerde daha yüksek korelasyon katsayıları elde ettiğini vurgulamıştır. Özer (2008) ise Kadıköy-Kartal metro hattı kazılarında farklı kaya birimlerine ait titreşim ölçüm verilerinin her bir kaya birimi için ayrı olarak değerlendirildiği durumda daha yüksek korelasyon katsayılarının elde edildiğini ifade etmiştir.

Bununla birlikte patlayıcı madde kullanımına kısıt getirerek işletmelerin madencilik faaliyetlerini yavaşlatması, frekansı ve dalga biçimini dikkate almaması ve eşitliğin geçerli olduğu güzergah değiştiğinde arazi katsayılarını belirlemek için en az 30 patlatmaya daha eşlik edilerek yeniden ölçüm alınmasını gerekli kılması PPV-SD'ye bağlı titreşim tahmin eşitliğinin başlıca dezavantajlarıdır (Uyar ve Aksoy, 2015).

Toplam 28 farklı sahada gerçekleştirilen patlatmalara ait kaydedilen çok sayıda titreşim parametreleri (maksimum parçacık hızı, frekans) incelenerek ülkemizdeki endüstriyel ve ticari yapılar (çelik kuleler, köprüler, barajlar vb.), betonarme yapılar (betonarme iskeletli konutlar vb.), yığma yapılar (taş, tuğla ve briket duvarlı yapılar, kerpiç yapılar vb.) ve tarihi ve hassas yapılara yönelik hasar kriter normu oluşturulmuştur (Karadoğan, 2008; Karadoğan vd., 2014).

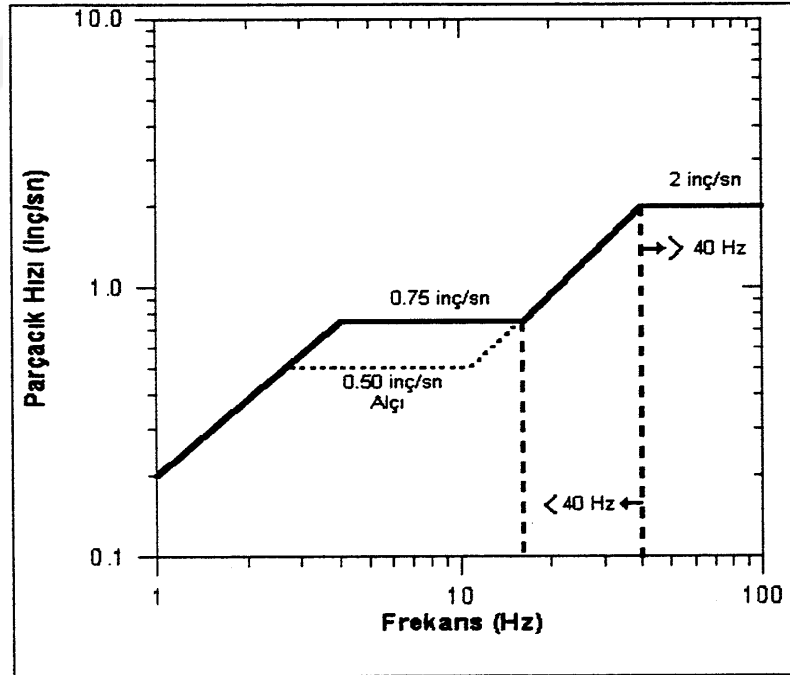
1.6. Patlatma Kaynaklı Titreşim Standartları

Patlatma kaynaklı olan titreşimlerin yapılarda hasar yaratmaması için bazı ülkelere ait standartlarda ve ülkemizde geçerli olan standartta frekansa bağlı izin verilen titreşim standart değerleri aşağıda verilmiştir.

1.6.1. USBM (ABD Madencilik Bürosu'nun) Patlatma Standardında İzin Verilen Titreşim Değerleri

Birleşik Devletler Madencilik Bürosu, açık ocak patlatmalarından meydana gelen yersarsıntısının yapılar üzerinde oluşturabileceği etkiyi ve verebileceği hasarla ilgili 1980 yılında Siskind ve arkadaşlarına 219 üretim atımının 79 evdeki etkisini belirlemeye yönelik bir çalışma yaptırarak sonuçlarını yayınlamıştır (Şekil 5). Bu çalışmada, parçacık hızlarının yanı sıra, frekansların da hasar oluşumunda etkili olduğu belirtilmektedir. Bu raporda belirtilen sonuçlar aşağıda gösterilmektedir. En iyi yer titreşimini tanımlama ve kontrol aracı hala parçacık hızıdır.

- Parçacık hızı, titreşime karşı vereceği tepki özellikleri iyi tanımlanmış bir yapı grubu için hasar miktarını açıklayabilecek en kolay kontrol aracıdır.
- Patlatmacı bütün atımları titreşim cihazı ile izleme zorunluluğunu almamak için ölçekli uzaklığın karaköklü uygulamasını seçer ($R/\sqrt{Q}$).
- Herhangi bir parçacık hızı için düşük frekanslı (≤ 40 Hz) patlatmalarda zarar verme potansiyeli yüksek frekanslı (≥ 40 Hz) patlatmalarda söz konusu olan potansiyelden daha fazladır. Düşük frekansın tahribat özelliği yüksek frekansa göre daha fazladır.
- Pratik olarak düşük frekanslı yer titreşimleri oluşturan patlatmalar için güvenlik sınırı olarak yapının iç duvarlarında alçı pano kaplama kullanıldığında maksimum parçacık hızı 4-12 Hz frekans aralığında 19 mm/sn (0.75 inç/sn), sıva çatlamaları oluştuğunda ise daha düşük parçacık hızı 12.7 mm/sn (0.5 inç/sn) tavsiye edilmektedir. Frekansı 40 Hz den büyük sonuçlanan ölçümlerde en düşük titreşim hızı 50.8 mm/sn (2 inç/sn) önerilir.



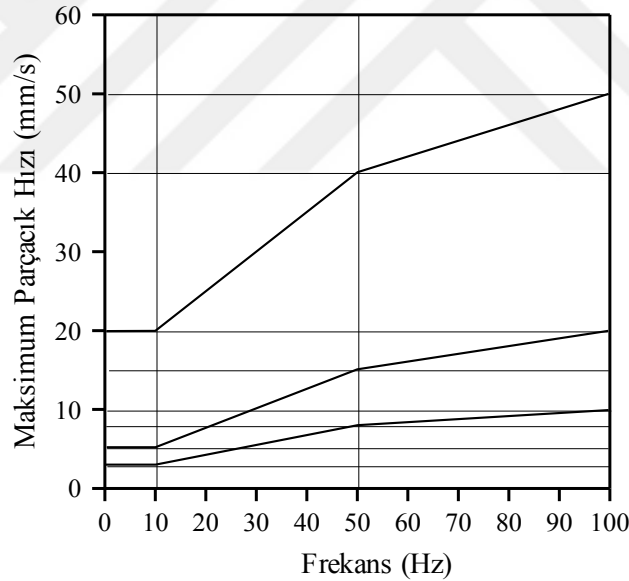
Şekil 5. USBM'nin alternatif kriter analizi (Siskind ve diğerleri 1980)

1.6.2. DIN 4150 Alman Patlatma Standardında İzin Verilen Titreşim Değerleri

DIN 4150 Alman Normu'nda frekansa bağlı olarak değişen parçacık hızı sınır değerleri yapı türüne göre Tablo 3 ve Şekil 6'de gösterilmektedir.

Tablo 3. Alman DIN 4150 normuna göre izin verilen maksimum parçacık hızı değerleri

Yapı Türü	İzin verilen pik parçacık hızı değeri, (mm/sn)		
	Frekans 0-10 Hz	Frekans 10-50 Hz	Frekans 50-100 Hz
Korunmaya muhtaç eski bina, tarihi eserler, anıtlar, zayıf derecede yapılar	3	3-8	8-10
Dayanıklı bina, yığma tuğla ve benzer yapıda apartman türleri	5	5-15	15-20
Donatılı beton (betonarme), çelik konstrüksiyonlu ticari ve endüstriyel yapılar	20	20-40	40-50



Şekil 6. Alman DIN 4150 normuna göre izin verilen maksimum parçacık hızı değerleri

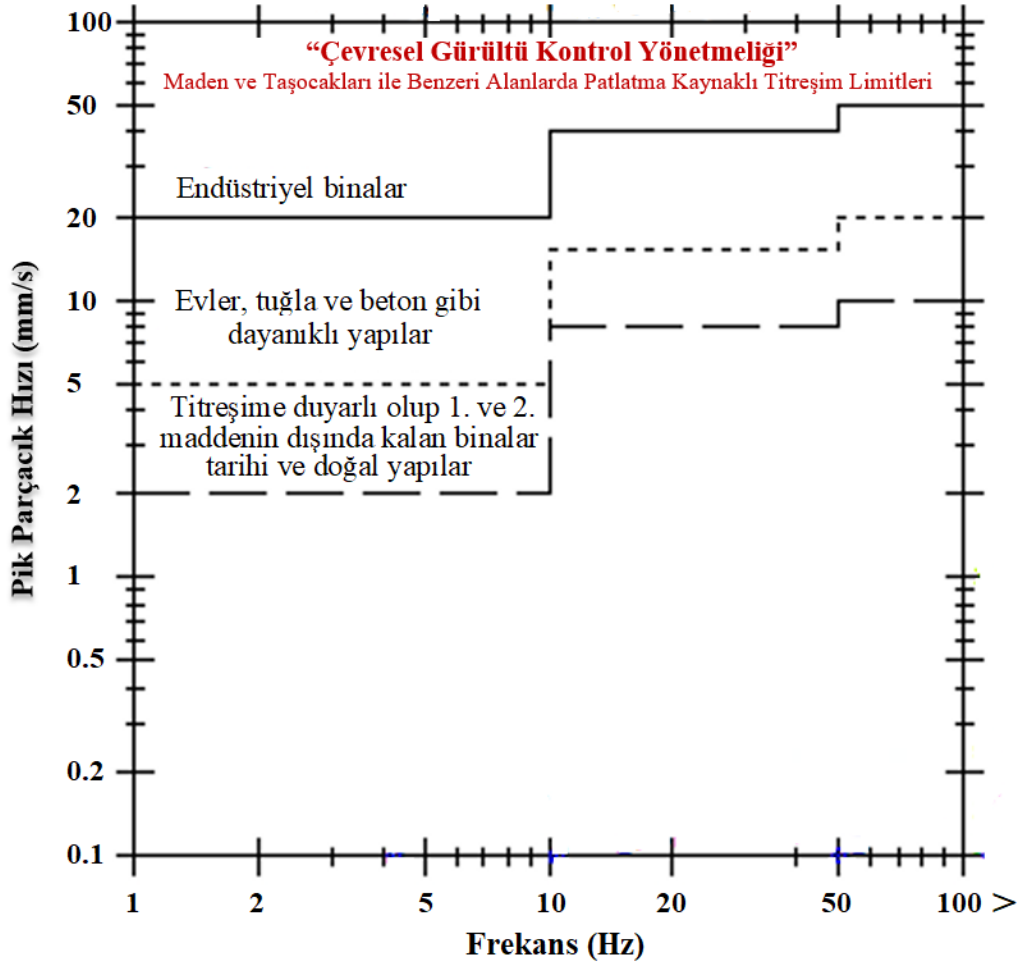
Bu grafikte en alttaki kırıklı çizgi kerpiç, eski yıpranmış tarihi eserler gibi düşük dayanımlı yapılar; ortadaki kırıklı çizgi yığma tuğla, beton gibi nispeten dayanıklı yapılar; üstteki kırıklı çizgi ise betonarme, çelik konstrüksiyon gibi çok dayanıklı yapılar için titreşim frekansına göre parçacık hızı sınırlarını göstermektedir.

**1.6.3.. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 30.11.2022 Tarihli
“Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği”nde İzin Verilen Titreşim
Değerleri**

Maden ve taş ocakları ve benzeri işlemlerin bulunduğu alanlardaki patlatma sırasında; oluşacak hava şoku, taş savrulması, titreşim gibi çevresel etkilerin asgari düzeyde tutulacağı bir patlatma modeli uygulanır. Ülkemizde, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın 30.11.2022 tarihli Resmi Gazete’nin 32029 nolu “Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği”nde izin verilen titreşim değerleri Tablo 4 ve Şekil 7’da verilmiştir.

Tablo 4. Maden ve taşocakları ile benzeri alanlarda patlatma nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapıda yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri

Yapı Tipi	Binaların temelinde en yüksek titreşim hızı, (mm/s) (frekansa göre, F=Hz)			Tüm frekanslar için en üst katın döşemesinde (tabanında) ⁽²⁾
	F=1-10	F=10-50	F=50-100 ⁽¹⁾	
1 Endüstriyel binalar	20	40	50	40
2 Evler, tuğla ve beton gibi dayanıklı yapılar	5	15	20	15
3 Titreşime duyarlı olup 1. ve 2. maddenin dışında kalan binalar, tarihi ve doğal yapılar ⁽³⁾	2	8	10	8
(1) 100 devir/s büyük frekanslar için, büyük titreşim düzeyine izin verilebilir. (2) Birden fazla katlı binalar için, ölçümlerin hem binanın temelinde hem de en üst katın döşemesinde alınması gerekir. (3) Tarihi ve doğal yapılar için belirlenen bu sınır değerler, yerinde yapılacak hassas, kapsamlı titreşim ölçümleri ve bilimsel çalışmalar ile kısıtlanabilir.				



Şekil 7. Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği’nde izin verilen için titreşim değerleri

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Trabzon ili, Ortahisar ilçesi, Üniversite Mahallesi 2013 Ada, 19 Parselde inşaat temel kazısı amaçlı olarak gerçekleştirilen toplam 36 adet atıma eşlik edilerek patlatmalara en yakın mesafede bulunan Ayyapı Bostancı-1 Zirve Sitesi'ndeki en yakın blokların (Şekil 8) hem temelinde hem de binaların son kat (8. kat) döşemesinde Instantel Minimate Plus titreşim ölçüm cihazları ile eş zamanlı olarak titreşim ve hava şoku ölçümleri alınmıştır (Şekil 9 ve Şekil 10 a,b). Patlatmalara en yakın yerleşim birimi, sahanın hemen doğusundaki Ayyapı Bostancı-1 Zirve Sitesi C ve D Bloklarıdır (Şekil 9). Patlatmanın etkisinin değerlendirildiği binaların yapı türü Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliğine göre “evler, tuğla ve beton gibi dayanıklı yapılar” sınıfına girmektedir.



Şekil 8. Saha çalışmasının yürütüldüğü bölgenin Google Earth üzerinden görüntüsü



Şekil 9. Sahada gerçekleştirilen patlatma bölgeleri ve titreşim ölçüm noktaları

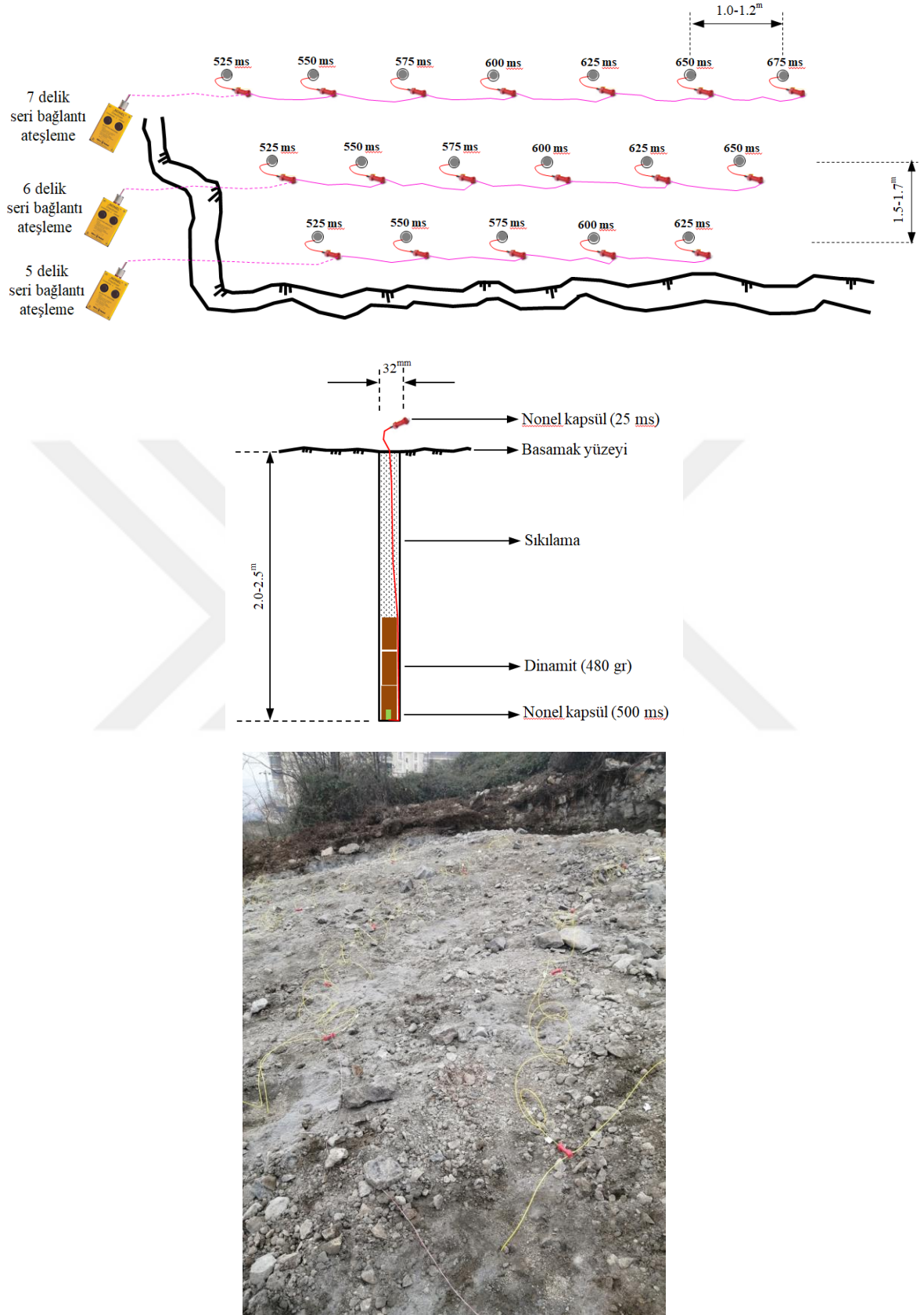


Şekil 10. Patlatmalardan kaynaklı titreşimlerin Ayyapı Bostancı-1 Zirve Sitesi Bloklarının dış zemininde (a) ve son kat döşemesinde (b) ölçümü

Kazı sahasında kayalar bazalt ve andezitten oluşmakta olup, kaya kalite göstergesi (RQD) %60-95 arasında, tek eksenli basınç dayanımı ise 130-154 MPa arasında değişmektedir.

Atımlarda delikler 32 mm çapında, delik boyları 2.0-2.5 m, dilim kalınlığı 1.5-1.7 m ve 2.0-2.5 m, deliklerarası mesafe 2.0-2.5 m ve 1.0-1.2 m arasında olacak şekilde pnömatik (havalı) martopikör ile açılmıştır. Patlayıcı olarak çapı 27 mm olan kapsüle duyarlı emülsiyon patlayıcı (Powermite Max, 160 gr/1 adet) kullanılmıştır. Atımlarda deliklere 2 adet (0,320 kg), 3 adet (0.480 kg) ya da 4 adet (0.640 kg) kartuş yerleştirilmiştir. Patlayıcılar deliklere yerleştirildikten sonra deliğin geri kalan kısmı (1.0-2.0 m) 3-7 mm boyutunda kırılmış agrega malzeme ile sıkılanmıştır. Her delik 25/500 ms Nonel gecikmeli kapsüller kullanılarak seri bağlantılı şekilde ateşlenmiştir. Taş fırlama riskine karşı şarjlı deliklerin üzeri membran ile kapatılmıştır. Patlayıcılar deliklere yerleştirildikten sonra gecikme başına bir delik olacak şekilde 4-10'arlı delikler bir grup olarak ateşlenmiştir.

Kazı sahasında uygulanan genel patlatma tasarımına herhangi bir müdahalede bulunulmamıştır. Patlatma öncesinde her bir atımın gecikme başına düşen patlayıcı miktarı, delik boyu, delik aralıkları vb. gibi patlatma tasarım parametreleri ile ölçüm noktalarına olan mesafesi kaydedilmiştir. Kazı sahasında gerçekleştirilen atımlarda uygulanan ateşleme sistemi, bir deliğin dolum şekli vb. Şekil 11'de, deliklerin pnömatik (havalı) martopikör ile delinmesi, sıkılama işlemi ve taş fırlama riskine karşı alınan önlem vb. ise Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Üç sıralı seri bağlantılı Nonel ateşleme tasarımı, bir deliğin şarjı ve tasarım parametreleri ile bir atıma ait ateşleme bağlantısının sahadaki görünümü



Şekil 12. (a) Patlatma deliklerinin açılması, (b) kullanılan patlayıcı maddeler ve NONEL kapsüller, (c, d) sıkılama işlemi, (e) deliklerin üzerinin membranla örtülmesi, (f) patlatma işlemi sonrası görünüm

Tablo 5. Yapılan patlatmalara ait titreşim ve hava şoku ölçüm değerleri ve tasarım parametreleri

Atım No	PPV (m/s)	Frekans (Hz)	Hava şoku (dBL)	Gecikme başına maks. patlayıcı miktarı (kg)	Delik sayısı (adet)	Delik Çapı (mm)	Delik Boyu (m)	DAM (m)	Yük Mesafesi (m)	Mesafe (m)	Ölçüm noktası
1	15,0	64	115.9	0,480	10	32	2.0-2.5	2.0-2.5	2.0-2.5	35	D Blok temelinde
	3,05	34	--							63	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
2	12,7	64	115.9	0,480	10					39	D Blok temelinde
	2,29	34	--							67	D Blok en üst katın döşemesinde (8.Kat)
3	18,5	57	117.1	0,640	10					41	D Blok temelinde
	2,92	30	--							69	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
4	18,5	57	119.3	0,640	10					43	D Blok temelinde
	3,43	32	--							71	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
	1,40	85	--							61	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
6	13,46	57	114.4	0,480	7					35	D Blok temelinde
	1,14	64	--							63	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
7	12,45	57	115.8	0,480	5					35	D Blok temelinde
	1,40	51	--							63	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
8	19,43	64	115.8	0,640	5					41	D Blok temelinde
	3,05	51	--							69	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
9	19,43	47	116.4	0,640	10					39	D Blok temelinde
	2,41	73	--							67	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)

Tablo 5. Yapılan patlatmalara ait titreşim ve hava şoku ölçüm değerleri ve tasarım parametreler devamı

10	4,93	>100	114.6	0,480	8	32	2.0-2.5	2.0-2.5	2.0-2.5	60	C Blok temelinde
	0,76	57	--							92	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
11	3,94	>100	111.8	0,480	7					60	C Blok temelinde
	0,64	73	--							92	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
12	17,27	85	116.6	0,480	5					34	C Blok temelinde
	1,91	34	--							64	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
13	18,41	85	117.2	0,480	5					30	C Blok temelinde
	2,54	73	--							60	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
14	27,94	73	118.1	0,480	5					20	C Blok temelinde
	2,67	64	--							50	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
15	36,19	85	119.9	0,480	5					20	C Blok temelinde
	3,56	73	--							50	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
16	14,7	85	110.2	0,480	5					22	C Blok temelinde
	2,98	32	-							46	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
17	29,5	73	115.4	0,480	5					22	C Blok temelinde
	2,76	62	-							46	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
18	15,9	>100	114	0,480	5					20	C Blok temelinde
	1,36	82	-							44	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
19	23,7	73	123.2	0,480	5					20	C Blok temelinde
	2,12	56	-							44	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)

Tablo 5. Yapılan patlatmalara ait titreşim ve hava şoku ölçüm değerleri ve tasarım parametreler devam

20	16,9	>100	115	0,480	5	32	2.0-2.5	2.0-2.5	20	C Blok temelinde
	1,84	34	-						44	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
21	21,7	>100	117.5	0,480	5				23	C Blok temelinde
	2,54	66	-						47	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
22	26,7	57	117.5	0,480	6				24	C Blok temelinde
	2,62	62	-						48	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
23	19,8	85	115	0,480	6				25	C Blok temelinde
	3,08	52	-						49	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
24	20,3	>100	116.7	0,320	5				20	C Blok temelinde
	1,868	57	--						45	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
25	13,3	>100	112.3	0,320	5				21	C Blok temelinde
	1,025	73	--						45	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
26	8,51	>100	111.8	0,320	5				22	C Blok temelinde
	0,567	>100	--						47	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
27	10,3	>100	113.5	0,320	4				18	C Blok temelinde
	1,308	47	--						43	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
28	19,6	>100	116.3	0,320	5				19	C Blok temelinde
	1,750	37	--						44	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)

Tablo 5. Yapılan patlatmalara ait titreşim ve hava şoku ölçüm değerleri ve tasarım parametreler devamı

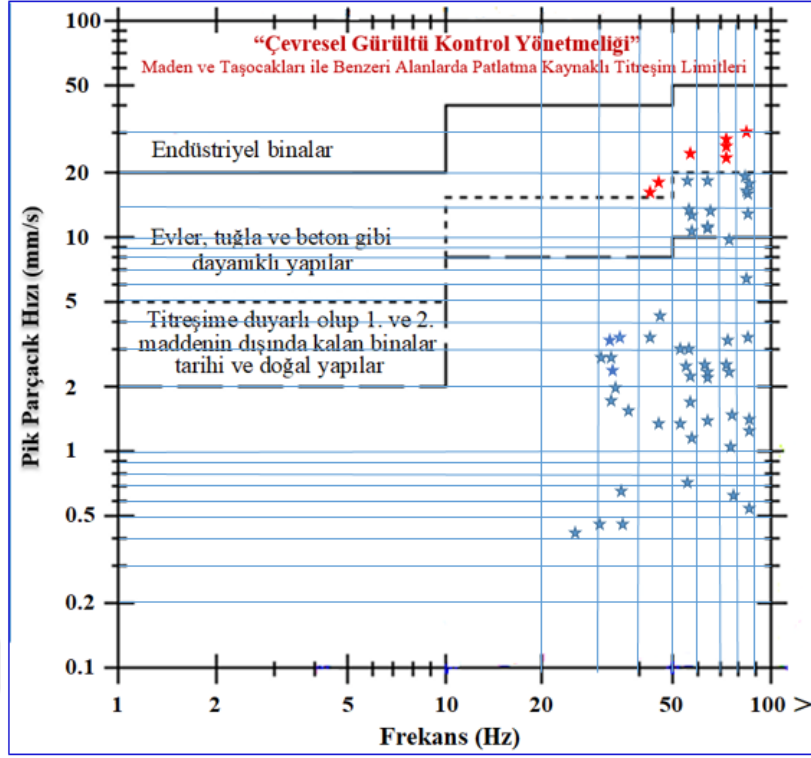
29	17,0	85	114.8	0,320	5	32	2.0-2.5	1.0-1.2	2.0-2.5	20	C Blok temelinde
	1,159	51	--							45	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
30	15,2	57	113.5	0,320	5					17	C Blok temelinde
	2,333	57	--							42	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
31	9,91	73	112.8	0,320	5					17	C Blok temelinde
	1,348	73	--							42	C Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
32	3,81	85	115.6	0,480	7				1.5-1.7	58	D Blok temelinde
	0,552	85	--							105	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
33	6,60	85	113.3	0,480	4					59	D Blok temelinde
	0,489	27	--							106	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
34	3,68	43	115.2	0,480	6					58	D Blok temelinde
	0,686	34	--							105	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
35	3,05	>100	112	0,480	7					56	D Blok temelinde
	0,418	30	--							103	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)
36	4,32	47	109.9	0,480	5					54	D Blok temelinde
	0,449	37	--							102	D Blok en üst katın döşemesinde (8. Kat)

3. BULGULAR VE İRDELEME

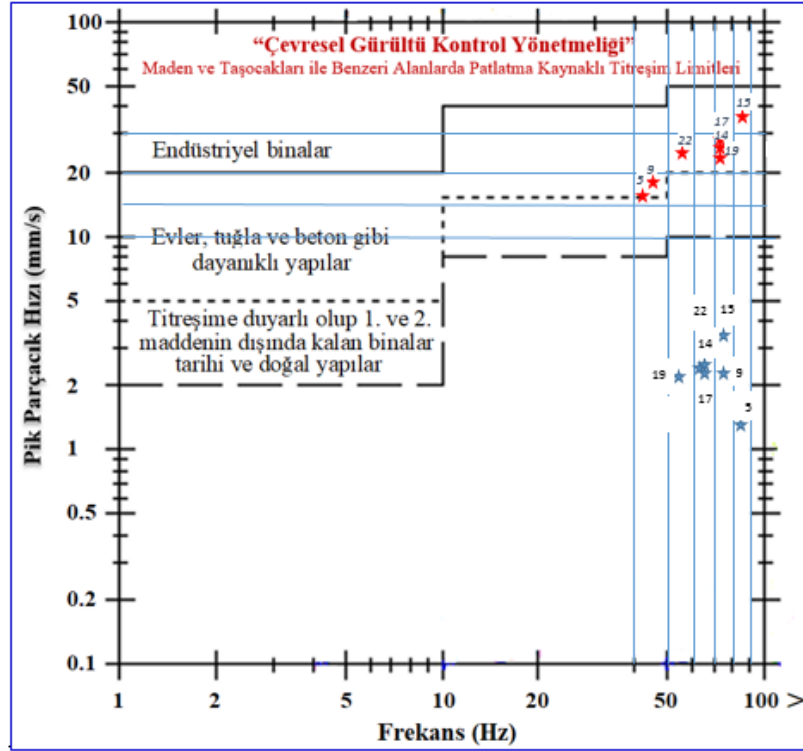
3.1. Titreşim Değerlerinin Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne Göre Değerlendirilmesi

İnşaat kazı sahasında gerçekleştirilen 36 adet atım sonucu bina temelinde ve en üst kat döşemesinde ölçülen 72 adet titreşime ait pik parçacık hızı (mm/s) ve frekans (Hz) değerlerinin Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne göre grafiği Şekil 13'de verilmiştir. Yapılan atımlarda; gecikme başına 0.320-0.640 kg patlayıcı miktarının ateşlenmesiyle Ayyapı Bostancı-1 Zirve Sitesi C ve D Bloklarının dış zemin temelinde 3.05-36.19 mm/sn, en üst katın döşemesinde ise 0.416-3.56 mm/sn arasında değişen titreşim değerleri kaydedilmiştir. Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne göre evler, tuğla ve beton gibi dayanıklı yapılar için binaların temelinde izin verilen en yüksek parçacık hızı değerleri 1-10 Hz aralığında 5 mm/s, 10-50 Hz aralığında 15 mm/s, 50-100 Hz aralığında 20 mm/s ve tüm frekanslar için son kat döşemesinde 15 mm/s'dir. Şekil 13 incelendiğinde, ölçülen titreşim değerlerinin büyük çoğunluğunun yönetmelikte izin verilen sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir.

5, 9, 14, 15, 17, 19 ve 22 nolu atımlara ait bina dış temelinde ölçülen pik parçacık hızı değerlerinin yönetmelikte izin verilen sınır değeri ((10-50 Hz aralığında 15 mm/s, 50-100 Hz aralığında 20 mm/s) aştığı, buna karşın eş zamanlı bina en üst kat döşemesinde ölçülen pik parçacık hızı değerlerinin izin verilen sınırlar içerisinde kaldığı gözükmemektedir (Şekil 14, Tablo 6). Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne göre izin verilen sınır değerleri aşan atımların genel olarak bina temeline çok yakın mesafede (20-39 m) olduğu ve gecikme başına maksimum patlayıcı miktarının 0,48-0,64 kg arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 13. Ölçülen titreşimlere ait PPV ve frekans değerlerinin grafiksel gösterimi



Şekil 14. 5, 9, 14, 15, 17, 19 ve 22 nolu atımlara ait PPV ve frekans değerlerinin grafiksel gösterimi

Tablo 6. 5, 9, 14, 15, 17, 19 ve 22 nolu atımlara ait bina temelinde ve son kat döşemede ölçülen pik parçacık hızı ve frekans değerleri

Atım No	Bina temelinde			Son kat döşemede			Gecikme başına maks. patlayıcı miktarı (kg)
	PPV (mm/s)	Frekans (Hz)	Mesafe (m)	PPV (mm/s)	Frekans (Hz)	Mesafe (m)	
5	16,13	43	33	1,40	85	61	0,480
9	19,43	47	39	2,41	73	67	0,640
14	27,94	73	20	2,67	64	50	0,480
15	36,19	85	20	3,56	73	50	0,480
17	29,50	73	22	2,76	62	46	0,480
19	23,70	73	20	2,12	56	44	0,480
22	26,7	57	24	2,62	62	48	0,480

Tablo 7. Bazı atımlara ait titreşim ölçüm değerleri ile gecikme başına düşen maksimum patlayıcı miktarı ve mesafe arasındaki ilişki

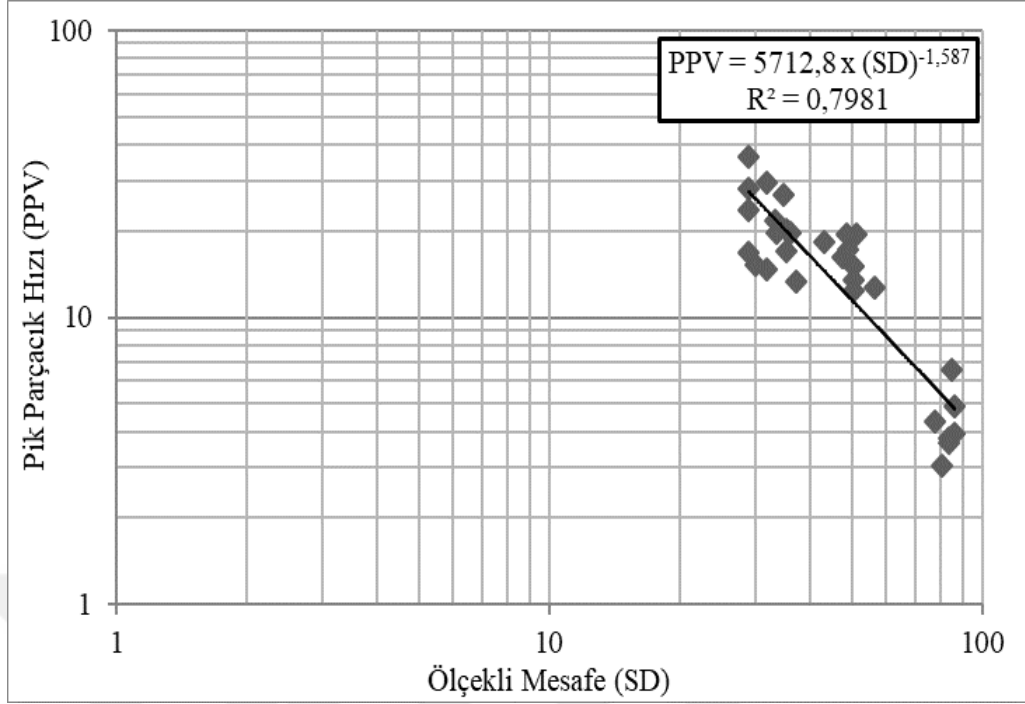
Atım No	Pik parçacık hızı (mm/s)	Frekans (Hz)	Gecikme başına maks. patlayıcı miktarı (kg)	Mesafe (m)
16	14,7	85	0,480	22
31	9,91	73	0,320	17
21	21,7	>100	0,480	23
24	20,3	>100	0,320	20
3	18,5	57	0,640	41
4	18,50	57	0,640	43
8	19,43	64	0,640	41
13	18,41	85	0,480	30
23	19,8	85	0,480	25
1	15	64	0,480	35
6	13,46	57	0,480	35
7	12,45	57	0,480	35
12	17,27	85	0,480	34

Ayrıca bazı atımlara ait gecikme başına düşen maksimum patlayıcı miktarı, atım noktası ile ölçüm noktası arasındaki mesafe, titreşimlere ait pik parçacık hızı ve frekans değerleri incelendiğinde (Tablo 7);

- 16 nolu atımda gecikme başına 0,480 kg olmasına rağmen 22 m mesafede izin verilen sınırlar içerisinde yer almıştır.
- 31 nolu atımda gecikme başına düşen patlayıcı miktarının 0,320 kg'a düşmesiyle birlikte 17 m'de ölçülen titreşim hızı değeri 9,91 mm/s'dir.
- 30-35 m mesafede gecikme başına 0,480 kg patlayıcı kullanılarak yapılan atımlarda ölçülen en yüksek titreşim hızı değerlerinin izin verilen sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir.
- 21 ve 24 nolu atımlarda ölçülen en yüksek titreşim hızı değerleri 20 mm/s'nin üzerinde olmasına rağmen frekans değerleri >100 Hz'in üzerindedir. Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne göre 100 Hz üzerindeki frekanslar için büyük titreşim düzeyine izin verilebilir olduğundan çevresel açıdan herhangi bir risk teşkil etmemektedir.
- 3, 4, 8, 13 ve 23 nolu atımlarda ölçülen en yüksek titreşim hızı değerlerinin izin verilen sınır değere (20 mm/s) yakın çıktığı görülmüştür.

3, 4, 18, 26, 27, 31 nolu atımlara ait veriler ayıklanarak geri kalan toplam 30 adet atıma ait en yüksek parçacık hızı ve ölçekli mesafe değerleri ilişkilendirilerek regresyon analizi yapılmış ve titreşim tahmin eşitliği üretilmiştir ($PPV = 5712,8 \times SD^{-1,587}$). Analiz sırasında doğrusal, üssel, exponansiyel yaklaşımlar kullanılmış olup en yüksek korelasyon katsayısı üssel fonksiyon yaklaşımı ile ortaya çıkmıştır. Titreşim tahmin eşitliğine ait kararlılık katsayısı değeri 0,7981'dir (Şekil 15). En az 30 adet veri kullanılarak üretilen titreşim tahmin eşitliğinin kararlılık katsayısı değerinin 0,7'den büyük olduğu dikkate alındığında, üretilen titreşim tahmin eşitliğinin açığa çıkacak en yüksek parçacık hızını tahmin etmede kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

Titreşim tahmin eşitliği kullanılarak hesaplanan PPV değerleri ile gerçekte ölçülen PPV değerleri incelendiğinde, ölçülen ve hesaplanan PPV değerlerinin nispeten birbirine yakın olduğu görülmektedir (Tablo 8).



Şekil 15. Ölçülen bazı atımlardan titreşim tahmin eşitliği kullanılarak oluşturulan kararlılık katsayısı grafiği

Tablo 8. Titreşim tahmin eşitliği kullanılarak hesaplanan ve gerçekte ölçülen PPV değerlerinin karşılaştırılması

Patlatma No	Pik Parçacık Hızı (PPV) (mm/s)	
	Titreşim tahmin eşitliği ile hesaplanan (PPV = 5712,8 x SD ^{-1,587})	Gerçekte ölçülen
1	11,31	15,0
6	11,31	13,46
8	11,05	19,43
11	4,808	3,94
14	27,49	27,94
21	22,02	21,7
23	19,29	19,8
24	19,93	20,3
28	21,62	19,6
29	19,93	17,0

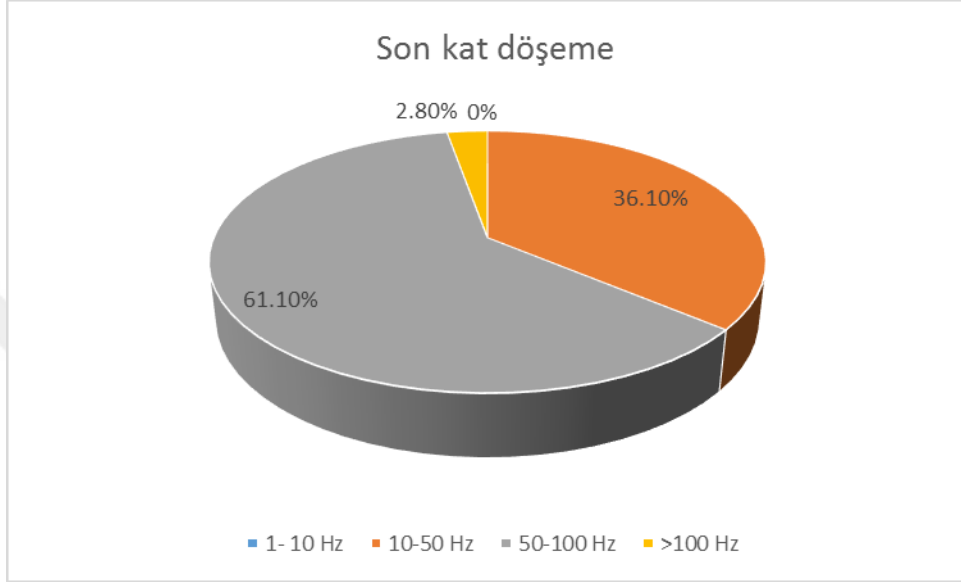
3.2. Atımların Frekans Açısından Değerlendirilmesi

Binaların temelinde ve son kat döşemesinde ölçülen frekans değerlerinin Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'nde belirtilen frekans değer aralıklarına göre dağılımları Şekil 13'de gösterilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde, bina temelinde ölçülen frekansların %11,2'si 10-50 Hz aralığında, %50,3'ü 50-100 Hz aralığında ve %30,5'inin 100 Hz üzerinde olduğu görülmüştür. 1-10 Hz aralığında herhangi bir frekans değeri kaydedilmemiştir. USBM normuna göre düşük frekanslı (≤ 40 Hz) patlatmalarda zarar verme potansiyeli yüksek frekanslı (≥ 40 Hz) patlatmalarda söz konusu olan potansiyelden daha fazladır (Siskind vd., 1980, Ak vd., 2009). Bina temelinde ölçülen pik parçacık hızlarına karşılık gelen frekans değerlerinin tamamının 40 Hz'in üzerinde olduğu değerlendirildiğinde, frekans açısından yapılarda hasar oluşma riskinin düşük olduğu görülmektedir. Frekanslar genellikle kayaç yapısından ve patlatma tasarımlarından etkilenmektedir. Yang vd. (2016) gecikme başına kullanılan patlayıcı miktarının aynı olduğu durumda dilim kalınlığının artmasıyla, diğer bir deyişle birim patlayıcı başına düşen kayaç hacminin artmasıyla birlikte, titreşimlerin frekansında azalma olduğunu belirtmiştir. Kayaç yapısında bulunan süreksizliklerin ise düşük frekanslı titreşimlerin yayılmasına neden olduğu belirtilmiştir (Park vd., 2009, Li vd., 2011). Frekans değerlerinin yüksek çıkmasının nedeninin kayaç (bazalt) yapısında süreksizliklerin düşük olması ve patlatmaların binalara oldukça yakın mesafede gerçekleştirilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

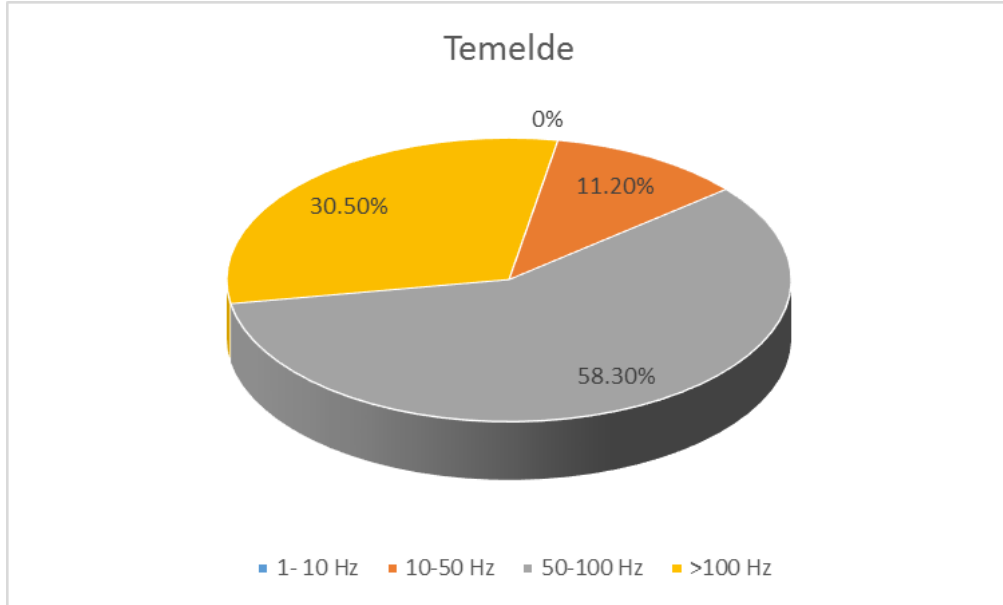
10 Hz değerinin altındaki frekanslar zeminde büyük yer değişimleri ve yüksek düzeyde birim deformasyonlar oluşturmakta ve yapıların öz yapısal frekanslarına (bir iki katlı binalarda 5-10 Hz arasında) yakın oldukları için hasar olasılığı da artmaktadır. Bu durumda bina rezonansa girmekte ve zemindeki dalga geçip gittiği halde bina sarsılmaya devam etmektedir (Kahriman, 2001; Özer, 2008; Özer vd., 2008; Karakuş, 2012). Bina temelinde ölçülen titreşim frekanslarının yüksek olması (≥ 40 Hz), genel olarak 5-10 Hz düzeyinde olan yapıların öz yapısal frekanslarıyla karşılaştırıldığında, binaların rezonansa girme riskinin minimum düzeyde olacağı anlaşılmaktadır.

Binaların son kat döşemesinde ölçülen frekans değerlerinin %36'sının 10-50 Hz arasında, %61'inin 50-100 Hz arasında ve %3'ünün >100 Hz olduğu görülmektedir (Şekil 16). Ayrıca son kat döşemesinde ölçülen frekans değerlerinin %34'ünün 40 Hz altında olduğu görülmüştür. Genel olarak düşük frekans aralıklarında pik parçacık hızının yüksek

çıkması durumunda birtakım yapısal hasarlar oluşabilmektedir. Son kat bina döşemesinde ölçülen en yüksek parçacık hızı değerinin 3,56 mm/s olduğu dikkate alındığında, son kat döşemesinde ölçülen frekans ve pik parçacık hızları açısından, binalarda herhangi bir hasar riskinin oluşmadığı değerlendirilmiştir.



Şekil 16. Bina son kat döşemesinde ölçülen frekans değerlerinin grafiksel görünümü

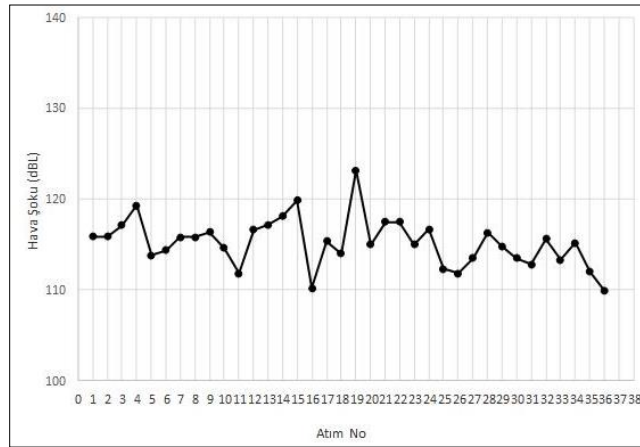


Şekil 17. Bina temelinde ölçülen frekans değerlerinin grafiksel görünümü

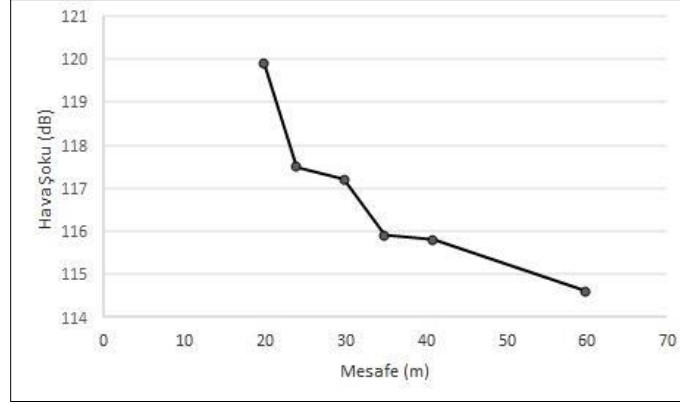
Şekil 17 incelendiğinde, bina temelinde ölçülen frekansların %11,2'si 10-50 Hz aralığında, %58,3'ü 50-100 Hz aralığında ve %30,5'inin 100 Hz üzerinde olduğu görülmüştür. Bina temelinde ölçülen titreşimlere ait frekans değerlerinin tamamı 40 Hz'in üzerindedir. USBM normuna göre düşük frekanslı (≤ 40 Hz) patlatmalarda zarar verme potansiyeli yüksek frekanslı (≥ 40 Hz) patlatmalarda söz konusu olan potansiyelden daha fazladır.

3.3. Atımların Hava Şoku Açısından Değerlendirilmesi

36 adet atıma ait bina temelinde ölçülen hava şoku ölçüm değerleri 109,9-123,2 dBL arasında değişmiştir (Şekil 18). Hava şokuna ait ülkemizde bir standart bulunmamaktadır. Ancak patlatmalı kazılardan kaynaklı hava şoku eşik seviyelerine ait değerler dikkate alınarak yorum yapıldığında; hava şokunun insanlar üzerinde rahatsızlık duyma başlangıç seviyesi için 140 dBL değerine ulaşması, pencerelerin kırılma başlangıç seviyesi için 152 dBL seviyesine çıkması gerekmektedir. Hava şokuna ait kayıt altına alınan maksimum 123,2 dBL değerine göre, söz konusu endişe ve zararların oluşmayacağı anlaşılmaktadır. Gecikme başına patlayıcı miktarının aynı olduğu (0,48 kg) olduğu atımlarda patlatma noktası ile ölçüm noktası arasındaki mesafenin artması ile birlikte hava şoku değerleri azalmıştır.



Şekil 18. Atımlarda ölçülen hava şoku değerleri



Şekil 19. Aynı gecikme başına düşen patlayıcı miktarı esas alınarak bina temelinde ölçülen hava şokunun mesafeye göre değişimi

3.4. Titreşim Ölçümleri Ve Frekans Değerlerinin İstatistiksel Karakterizasyonu

Sahada patlatma kaynaklı titreşim ölçümleri Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliğine uygun olarak hem bina zemininde (PPVzemin ve Frekans.zemin) hem de bina son kat döşemesinde (PPVson.kat ve Frekans.son.kat) gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, yapılacak istatistik analizlerin güvenilirliğine yönelik pik parçacık hızı (PPV;mm/s) ve titreşim frekanslarına (Frekans; Hz) ait verilerin normalite testleri gerçekleştirilmiştir. PPV ve frekans veri gruplarının Tablo 9’de yer alan çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) katsayıları standart hatalarına bölündüklerinde ± 1.96 aralığında (%95) kalmaktadırlar. Bununla birlikte “One sample Kolmogorov-Smirnow test”ine göre de (Tablo 10) PPV ve frekans değerleri için çift taraflı önem düzeyi (p değeri) 0.05’ten yüksektir. Dolayısıyla, PPV ve frekans veri gruplarının (değişkenler) normal dağılıma sahip olduğu görülmektedir. İlaveten, PPV ve frekans değerlerine ait histogram grafikleri Şekil 20’de verilmiş olup, Tablo 9 ve Tablo 10’daki sonuçlar ile uyumludur.

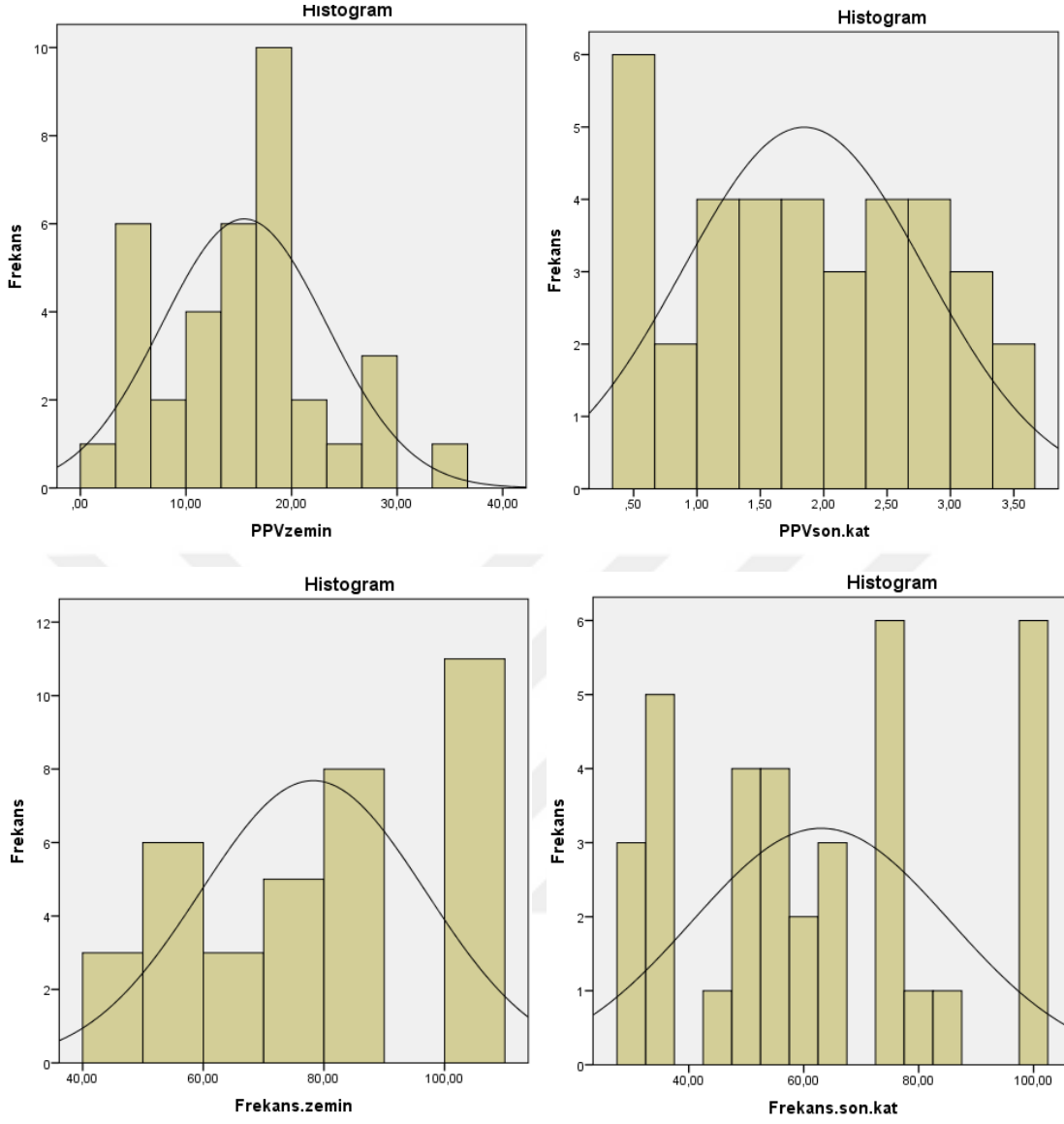
Tablo 9. Titreşim ölçümleri ve frekans değerlerine yönelik tanımlayıcı istatistikler

			Statistic	Std. Error
PPVzemin	Mean		15,5211	1,30589
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound Upper Bound	12,8700 18,1722	
	5% Trimmed Mean		15,2153	
	Median		16,0150	
	Variance		61,392	
	Std. Deviation		7,83533	
	Minimum		3,05	
	Maximum		36,19	
	Range		33,14	
	Interquartile Range		9,55	
	Skewness		,335	,393
	Kurtosis		,212	,768
PPVson.kat	Mean		1,8456	,15967
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound Upper Bound	1,5214 2,1697	
	5% Trimmed Mean		1,8320	
	Median		1,8550	
	Variance		,918	
	Std. Deviation		,95804	
	Minimum		,42	
	Maximum		3,56	
	Range		3,14	
	Interquartile Range		1,60	
	Skewness		,043	,393
	Kurtosis		-1,267	,768
			Statistic	Std. Error
Frekans.zemin	Mean		78,2222	3,11426
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound Upper Bound	71,8999 84,5445	
	5% Trimmed Mean		78,8704	
	Median		85,0000	
	Variance		349,149	
	Std. Deviation		18,68553	
	Minimum		43,00	
	Maximum		100,00	
	Range		57,00	
	Interquartile Range		41,25	
	Skewness		-,256	,393
	Kurtosis		-1,251	,768
Frekans.son.kat	Mean		63,0278	3,74685
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound Upper Bound	55,4213 70,6343	
	5% Trimmed Mean		62,7593	
	Median		62,0000	
	Variance		505,399	
	Std. Deviation		22,48109	
	Minimum		30,00	
	Maximum		100,00	
	Range		70,00	
	Interquartile Range		25,00	
	Skewness		,276	,393
	Kurtosis		-,868	,768

Tablo 10. PPV ve frekans değerleri için One sample Kolmogorov-Smirnow normallik testi

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		PPVzemin	PPVson.kat	Frekans. zemin	Frekans.son. kat
N		36	36	36	36
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	15,5211	1,8456	78,2222	63,0278
	Std. Deviation	7,83533	,95804	18,68553	22,48109
Most Extreme Differences	Absolute	,104	,124	,184	,117
	Positive	,104	,124	,122	,106
	Negative	-,070	-,099	-,184	-,117
Kolmogorov-Smirnov Z		,626	,741	1,102	,700
Asymp. Sig. (2-tailed)		,828	,642	,176	,712



Şekil 20. PPV ve frekans değerlerine ait histogram grafikleri

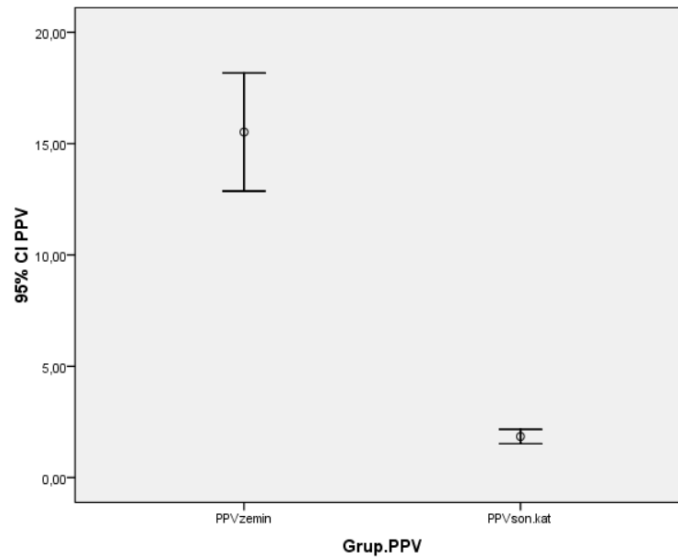
Buradan hareketle bina zemini ile bina son kat döşemesinde alınan PPV ve Frekans değişkenleri ayrı ayrı gruplar halinde “Bağımsız örnekler T testi (Independent Samples T Test)” ile kıyaslanmıştır.

3.4.1. Bina zemininde ve son kat döşemesinde ölçülen PPV değerlerinin istatistiksel analizi

PPV değerleri “Bağımsız örnekler T testi (Independent Samples Test) ile analiz edildiğinde PPVzemin ve PPVsonkat değişkenlerinin “Levene's Test for Equality of Variances” testine göre varyanslarının homojen olmadığı görülmektedir (Tablo 11). Bu durumda Tablo 11’de eşit olmayan varyanslar kabulü ile T testine göre PPV zemin ve PPVsonkat değişkenleri birbirinden farklıdır (Tablo 11, Şekil 21). İlgili test için sonuç istatistikleri şu şekildedir: Levene’s $F=39.177$, $Sig.=0.000$; T testi için $T=10.395$, $Sig. (2-tailed)=0.000$ ve Serbestlik Derecesi= 36.05 (Tablo 11). Ortalamaların %95 güven aralığında kıyası ise Şekil 21’de verilmiştir. Şekil 21’den bina zemininde ölçülen PPV değerlerinin bina son kat döşemesinde ölçülen PPV değerlerinden oldukça farklı ve yaklaşık 8 kat daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 11. Bağımsız örnekler T testi ile zemin ve son kat PPV değerlerinin benzerlik analizi

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						95% Confidence Interval of the Difference
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
PPV	Equal variances assumed	39,177	,000	10,395	70	,000	13,67556	1,31561	11,05165	16,29947
	Equal variances not assumed			10,395	36,046	,000	13,67556	1,31561	11,00748	16,34363



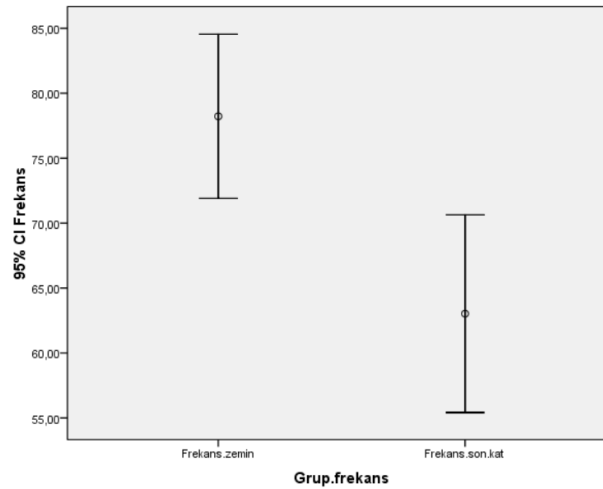
Şekil 21. Bina zemini ve son kat döşemesindeki PPV sonuçlarının %95 aralığında kıyası

3.4.2. Bina zemininde ve son kat döşemesinde ölçülen Frekans değerlerinin istatistiksel analizi

Frekans değerleri “Bağımsız örnekler T testi (Independent Samples Test) ile analiz edildiğinde Frekans.zemin ve Frekans.son.kat değişkenlerinin “Levene's Test for Equality of Variances” testine göre varyanslarının homojen olduğu görülmektedir (Tablo 12). T testine göre de Frekans.zemin ve Frekans.son.kat değişkenleri birbirinden farklıdır (Tablo 12 ve Şekil 22). İlgili test için istatistik verileri şu şekildedir: Levene’s $F=0.527$, $Sig.=0.470$; T testi için $T=3.119$; $Sig. (2-tailed)=0.003$, Serbestlik derecesi=70 (Tablo 12). Frekans ortalamalarının %95 güven aralığında kıyası ise Şekil 22’te verilmiştir. Bina son kat döşemesinde ölçülen frekans değerleri, bina zemininde ölçülen frekans değerlerinden %19 civarında daha düşüktür. Bu durumun, titreşimin ilerlediği bina içindeki boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde frekans değeri son kat döşemesinde %19 daha düşük ölçülmüştür.

Tablo 12. Bağımsız örnekler T testi ile zemin ve son kat Frekans değerlerinin benzerlik analizi

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
Frekans	Equal variances assumed	,527	,470	3,119	70	,003	15,19444	4,87211	5,47733	24,91156
	Equal variances not assumed			3,119	67,735	,003	15,19444	4,87211	5,47161	24,91728



Şekil 22. Bina zemini ve son kat döşemesindeki frekans değerlerinin %95 aralığında kıyası

3.5. Patlatma Tasarımı Önerisi

Yapılan titreşim ölçüm sonuçlarına ait pik parçacık hızı, frekans, mesafe gecikme başına düşen maksimum patlayıcı madde miktarı vb. arasındaki ilişki ve gecikme başına maksimum patlayıcı miktarının 0,48 kg olduğu durumda titreşim tahmin eşitliği ($PPV = 5712,8 \times SD^{-1,587}$ ($R^2 = 0,798$)) kullanılarak belirli mesafelerde açığa çıkacak pik parçacık hızları değerlendirildiği, binalara 40 m ve daha yakın mesafede patlatma yapılmaması gerektiği anlaşılmıştır (Tablo 13, Şekil 23). İnşaat temel kazı sahasında evlere 30 m ve 40 m mesafelerde gecikme başına maksimum 0,48 kg patlayıcı kullanılarak patlatma yapılması durumunda titreşim tahmin eşitliği kullanılarak yapılan hesaplama göre, açığa çıkacak titreşim hızları sırasıyla 14,45 mm/s ve 9,15 mm/s olacağı görülmektedir.

Atımlar sonrası patlatma verimliliğine yönelik yerinde yapılan incelemelerde, gecikme başına 0,32 kg patlayıcı kullanılması durumunda yeterli çatlama/parçalanma oluşmadığı ve hidrolik kırıcıya daha fazla ihtiyaç duyulduğu gözlenmiştir. Patlayıcı miktarının 0,640 kg olması durumunda ise yeterli parçalanma gerçekleşmiş ancak titreşim değerleri artmıştır. Bu nedenle gecikme başına kullanılması gerekli maksimum patlayıcı madde miktarı 0,48 kg olarak belirlenmiştir (Tablo 14). Ayrıca delik aralıklarının da 1,0-1,5 m arasında olmasının patlatmanın verimliliği açısından uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Tablo 13. Titreşim tahmin eşitliği kullanılarak farklı mesafelerde açığa çıkması beklenen PPV değerleri

Gecikme Başına Kullanılacak Maksimum Patlayıcı Miktarı (0,480 kg)	
Mesafe (m)	Titreşim tahmin eşitliği ile hesaplanan PPV değerleri ($PPV = 5712,8 \times SD^{-1,587}$)
20	27,49
25	19,29
30	14,45
35	11,31
40	9,15
45	7,59
50	6,42

Tablo 14. Sahada yapılacak kontrollü patlatmalar için önerilen tasarım parametreleri

Parametre	Adet-Miktar
Delik çapı (mm)	32
Delik boyları (m)	1.8-2.4
Delik aralıkları (m)	1.0-1.5
Sıkılama boyu (m)	~1.3-1.5
Delik başına maksimum dinamit miktarı (gram)	480 gr (3 adet)
Gecikme başına delik sayısı* (adet)	1
Gecikme başına maksimum patlayıcı miktarı (Dinamit) (gr)	480 gr
Günlük atım sayısı (adet) **	1
Bir atımda toplam maksimum delik sayısı (adet)	42
Bir atımda toplam maksimum dinamit miktarı (kg)	20 kg
Bir atımda toplam maksimum NONEL kapsül (adet)	42
Bir atımda toplam elektrikli kapsül (adet)	8

*Her bir deliğin gecikme süresi en az 25/500 ms aralıklı olmalıdır. **Patlayıcılar deliklere yerleştirildikten sonra gecikme başına bir delik olacak şekilde en fazla 5 delik bir grup olarak patlatılmalıdır.



Şekil 23. Patlatma yapılmaması önerilen alanın temsili sınır çizgisi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Trabzon ili, Ortahisar ilçesi, Üniversite Mahallesi, 2013 Ada, 19 Parselde inşaat temel kazısı amaçlı yapılan patlatmaların çevredeki yerleşim birimlerine etkisini değerlendirmek amacıyla, Ayyapı Bostancı-1 Zirve Sitesi 8 katlı C ve D Bloklarının bina temel zemininde ve son kat döşemesinde eş zamanlı olarak titreşim ve hava şoku ölçümleri alınmış ve elde edilen sonuçlar T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliğine göre değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Patlatmanın etkisinin değerlendirildiği binaların yapı türü Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliğine göre «evler, tuğla ve beton gibi dayanıklı yapılar» sınıfına girmektedir.
- Titreşim ölçümü alınan toplam 36 adet atımdan 29 tanesine ait bina temelinde ve son kat döşemesinde ölçülen titreşim değerleri Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliğine göre izin verilen sınırlar içerisinde dir. 7 ateşlemede (5, 9, 14, 15, 17, 19 ve 22 nolu atımlar) ise binaların son kat döşemesinde ölçülen titreşim değerleri sınır değerler içerisinde kalırken eş zamanlı olarak bina temelinde ölçülen titreşim değerlerinin izin verilen sınır değerlerin üzerine çıktığı görülmüştür.
- Verilerin istatistiksel olarak normalite değerlerine bakıldığında binaların hem temelinde hem de son katında ölçülen PPV ve frekans değerleri normal dağılım göstermiştir. Bina temelinde ölçülen PPV değerleri son kat döşemesinde ölçülen PPV değerlerine göre lineer olarak değerlendirilirse ortalama 8 kat daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca bina son kat döşemesinde ölçülen frekans değerleri bina temelinde ölçülen frekans değerlerine göre lineer olarak değerlendirilirse yaklaşık %19 daha düşük çıkmıştır.
- 3, 4, 8, 13 ve 23 nolu atımların bina temelinde ölçülen titreşim değerleri sınıra yakın çıkmıştır. 21 ve 24 nolu atımların PPV değeri 20 mm/s'nin üzerinde çıkmasına rağmen frekans değerleri 100 Hz'in üzerindedir. 100 Hz üzerinde daha yüksek titreşim hızlarına izin verildiğinden söz konusu atımlar çevresel açıdan herhangi bir risk oluşturmamıştır.

- Bina temelinde ölçülen frekans değerlerinin tamamı 40 Hz'nin üzerindedir. Bina son kat döşemesinde ölçülen frekans değerlerinin %36'sı 10-50 Hz arasında, %61'i 50-100 Hz aralığında ve %3'ü ise 100 Hz'nin üzerindedir.
- Cihaz ile bina temelinde kaydedilen parçacık hızı ve ölçekli mesafe değerlerinin istatistiksel analizi sonucu en yüksek parçacık hızını tahmin etmeye yönelik PPV = $5712,8 \times SD^{-1,587}$ titreşim tahmin eşitliği 0,7981 kararlılık katsayısı (R^2) değeri ile geliştirilmiştir.
- Gecikme başına 0,480 kg patlayıcı madde kullanılarak binalara ≥ 40 m mesafede yapılan ateşlemelerde ölçülen titreşim değerlerinin izin verilen sınır değerler içinde kaldığı belirlenmiştir.
- Kazı sahasında gerçekleştirilen ateşlemeler sonucunda bina temelinde ölçülen hava şoku değerleri 109,9-123,2 dBL arasında değişmiş olup çevresel açıdan herhangi bir şikayete neden olmamıştır. Ayrıca taş fırlaması ve toz oluşumu problemi ile karşılaşılmamıştır.
- Binalara 40 m'den daha kısa mesafede patlatma yapılmaması, 40 m'den daha uzak mesafede yapılacak patlatmalarda ise gecikme başına maksimum patlayıcı miktarının 0,480 kg'ı geçmemesi gerektiği belirlenmiştir.
- Patlatma ile şehir içi inşaat temel kazılarında kazı sahası çevresindeki yapıların yoğunluğu göz önüne alınarak atımlara eşlik edilerek titreşim ve hava şoku ölçümlerinin alınması, kazının güvenli bir şekilde sürdürülmesi/tamamlanması ve çevresel şikayetlerin (binalarda sıva çatlakları, camların çatlaması, vb.) oluşmaması bakımından son derece önemlidir.
- Yapılan bu çalışmada bina temelinde ölçülen titreşim değerlerinin bina son kat döşemesinde ölçülen titreşim değerlerine kıyasla ortalama 8 kat daha yüksek çıkmıştır. Bazı atımlara ait titreşim değerleri bina temelinde 10-50 Hz aralığında izin verilen 15 mm/s sınır değerini aşarken eş zamanlı olarak bina son kat döşemesinde maksimum 3,56 mm/s titreşim hızı kaydedilmiştir. Bina son kat döşemesinde 10-50 Hz aralığında izin verilen 15 mm/s'lik titreşim hızı değerinin aşılması için bina temelinde 100 mm/s ve üzerinde bir sarsıntının ölçülmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bu durumda binada çok ciddi yapısal hasarlar

oluşabilecektir. Bu nedenle, farklı kaya türlerinde yapılacak atımlara eşlik edilerek hem düşük katlı (2-5) hem de yüksek katlı (6-20) yapılarda daha fazla sayıda titreşim ölçüm çalışmalarının yapılması, ölçümlerin sadece bina son kat döşemesinde değil aynı zamanda farklı katlarda da eş zamanlı olarak alınması, elde edilecek kapsamlı sonuçlara göre Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliğinde bina temelinde ve son kat döşemesinde izin verilen en yüksek titreşim hızı değerlerinin revize edilmesinde yarar bulunmaktadır.



5.KAYNAKLAR

- Agrawal, A., Choudhary, B.S. & Murthy, V.M.S.R., (2022). Seismic energy prediction to optimize rock fragmentation: a modified approach. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 11301–11322.
- Ak, H., İphar, M., Yavuz, M., Konuk, A., (2009). Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 669–676
- Aydan, Ö., Bilgin, H.A., Geniş, M., (2014). Effect of blasting on the bench stability at the Demirbilek open-pit mine, *Environmental Geotechnics*, 1 (4), 240-248.
- Berber, M. (2007). Dilim kalınlığının patlatma kaynaklı yersarsıntıları ve saha sabitleri üzerindeki etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 81.
- Blair, D.P., Armstrong, L.W., (2001). The influence of burden on blast vibration. *Fragblast*, 5 (1-2), 108-129.
- Cevizci, H., (2010). Açık ocak patlatmalarında sıkılama parametresinin patlatma verimliliğine etkisi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 110 s.
- Cevizci, H., (2012). A newly developed plaster stemming method for blasting, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112, 1071-1078.
- Cevizci, H., Özkahraman, H.T., (2012). The effect of blast hole stemming length to rockpile fragmentation at limestone quarries, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 53, 32-35.
- Choudhary, B.S. ve Agrawal, A., (2022). Minimization of blast-induced hazards and efficient utilization of blast energy by implementing a novel stemming plug system for eco-friendly blasting in open pit mines, *Natural Resources Research*, 31 (6), 3393-3410.
- Cihangir, F., (2006). Bir kalker ocağında patlatmalı kazılardan kaynaklanan yer titreşimi ve hava şoku etkilerinin istatistiksel analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 83 s.
- Elevli, B., Arpaz, E. (2010). Evaluation of parameters affected on the blast induced ground vibration (BIGV) by using relation diagram method (RDM), *Acta Montanistica Slovaca*, 15 (4), 261-268.
- Erçikdi, B., Kesimal, A., Yılmaz, E., Kaya, R., (2003). Titrekkaya taş ocağı'nın üretiminde patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin bölgedeki tarihi yapılara etkisinin belirlenmesi, III Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4 Aralık 2003, İstanbul, s. 221-228.

- Erçikdi, B., Kesimal, A., Yılmaz, E., (2004). Safety evaluation of a historic place and school close to limestone quarry blasts, The 4th International Conference SGEM 2004, 14 - 18 Haziran, Varna, Bulgaristan, s. 181-192.
- Fişne, A., Kuzu, C., Hüdaverdi, T., (2011). Prediction of environmental impacts of quarry blasting operation using fuzzy logic, *Environ Monit Assess*, 174, 461–470.
- Ghasemi E, Sari M, Ataei M (2012) Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on flyrock distance in surface mines. *Int J Rock Mech Min Sci* 52:163–170.
- Görgülü, K., Arpaz, E., Uysal, Ö., Durutürk, Y.S., Yüksek, A.G., Koçaslan, A., Dilmaz, M.K., (2015). Investigation of the effects of blasting design parameters and rock properties on blast-induced ground vibrations, *Arab J Geosci*, 8, 4269-4278.
- Hoek, E., Bray, J.W., (1981). *Rock Slope Engineering: Third Edition*, the Institution of Mining and Metallurgy, Stephen Austin and Sons, 358, London.
- Hüdaverdi, T., (2022). Prediction of flyrock throw distance in quarries by variable selection procedures and ANFIS modelling technique, *Environmental Earth Sciences*, 81:281.
- Hüdaverdi T., Kuzu, C., Fişne A., Ökten, G., (2007). Prediction and prevention of airblast levels, *Inter-Noise 2007*, 28-31 August, s.8, İstanbul.
- Jimeno CL, Jimeno EL, Carcedo FJA (1995) *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press, Boca Raton
- Kahriman, A., Tuncer, G., Görgün, S., Karadoğan, A.K., (1998), Patlatmalı Kazılardan Kaynaklanan Titreşimlerin Kentsel Yerleşim Alanlarına Etkileri ve Alınacak Önlemler, *Jeoloji ve Kentleşme Sempozyumu*, İstanbul.
- Kahriman, A., Karadoğan, A., Ozer, U., Aksoy, M., Adıgüzel, D., (2006), The Analysis of Blast Induced Ground Vibration at Can Open – Pit Lignite Mine in Turkey, *VIIth International Scientific Conference*, Volume 1 (1), 61-74
- Kahriman, A., Karadoğan, A., Görgün, S., Tuncer, G., (1999), Taşocaklarında Patlatmadan Kaynaklanan Yer Sarsıntısının Ölçülmesi ve Analizi, 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4 Haziran 1999, İstanbul, s. 129-142.
- Kahriman, A., (2002). Analysis of ground vibrations caused by bench blasting at Can open-pit lignite mine in Turkey, *Environmental Geology*, 41, 653-661.
- Kahriman, A., (2004). Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 887-892.
- Kahriman, A., Özer, U., Aksoy, M., Karadoğan, A., Tuncer, G., (2006). Environmental impacts of bench blasting at Hisarcık Boron open pit mine in Turkey, *Environ Geol*, 1015-1023.

- Karadoğan, A., (2008), Patlatmadan Kaynaklanan Titreşimler İçin Ulusal Yapı Hasar Kriterleri Oluşturulabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 251.
- Karadoğan, A., (2008). Patlatmadan kaynaklanan titreşimler için ulusal yapı hasar kriterleri oluşturabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 251 s.
- Karadoğan, A., Kahriman, A., Özer, U., (2014). A new damage criteria norm for blast-induced ground vibrations in Turkey, Arab J Geosci, 7, 1617-1626.
- Karakuş, Y., (2012). Yerleşim birimlerinde yapılacak temel kazılarında mini basamak patlatma sisteminin uygulanabilirliği, Yüksek lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 102 s.
- Karakuş, Y. (2012). Yerleşim Birimlerinde Yapılacak Temel Kazılarında Mini Basamak Patlatma Sisteminin Uygulanabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.102.
- Kesimal, A., Ercikdi, B., Cihangir, F., (2008). Environmental impacts of blast-induced acceleration on slope instability at a limestone quarry, Environmental Geology, 54, 381-389.
- Kesimal, A., (2025). Kaya Patlatma Teknolojisi, Yayınlanmamış Ders Notları
- Konya C.J., Walter, E.J., (1990), Surface Blast Design, New Jersey, USA
- Kuzu, C., Güçlü, E., (2009). The problem of human response to blast induced vibrations in tunnel construction and mitigation of vibration effects using cautious blasting in half-face blasting rounds, Tunnelling and Underground Space Technology, 24, 53-61.
- Kuzu, C., Ergin, H., (2005). An assessment of environmental impacts of quarry-blasting operation: a case study in Istanbul, Turkey, Environ Geol, 48, 211-217.
- Kuzu, C., Fişne, A., Erçelebi, S.G., (2009). Operational and geological parameters in the assessing blast induced airblast-overpressure in quarries, Applied Acoustics, 70, 404–411.
- Li JC, Ma GW, Zhao J (2011) Analysis of stochastic seismic wave interaction with a slippery rock fault. Rock Mech Rock Eng 44(1):85–92.
- Matidza, I.M., Jianhua, Z., Gang, H., Mwangi, A.D., (2020). Assessment of blast-induced ground vibration at Jinduicheng Molybdenum open pit mine, Natural Resources Research, 29, 831-841.
- Mpofu, M., Ngobese, S., Maphalala, B., Roberts, D., Khan, S., (2021). The influence of stemming practice on ground vibration and air blast, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 121, 1-9.

- Murmu, S., Maheshwari, P., Verma, H.M. (2018). Empirical and probabilistic analysis of blast-induced ground vibrations, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103, 267-274.
- Özer Ü, Kahriman A, Aksoy M, Adıgüzel D, Karadoğan A., (2008). The analysis of ground vibrations induced by bench blasting at Akyol quarry and practical blasting charts, *Environmental Geology*, 54, 737-743.
- Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C., Sertabipoğlu, Z., Şahinoğlu, Ü.K., (2020). Modelling of blasting-induced air overpressure wave propagation under atmospheric conditions by using ANN model, *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 769
- Özer, Ü., (2008). Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on the Kadıköy-Kartal metro tunnel, *Engineering Geology*, 100, 82-90.
- Özer, Ü., Karadoğan, A., Kahriman, A., Aksoy, M., (2013). Bench blasting design based on site-specific attenuation formula in a quarry, *Arab J Geosci*, 6, 711–721
- Park D, Jeon B, Jeon S (2009) A numerical study on the screening of blast-induced waves for reducing ground vibration. *Rock Mech Rock Eng* 42(3):449–473.
- Rad HN, Hasanipanah M, Rezaei M, Eghlim AL (2018) Developing a least squares support vector machine for estimating the blast-induced flyrock. *Eng Comput* 34:709–717.
- Raina, A.K., Haldar, A., Chakraborty, A.K., Choudhury, P.B., Ramulu, M., Bandyopadhyay, C. (2010). Human response to blast-induced vibration and air-overpressure: an Indian scenario, *Bull Eng Geol Env*, 63, 209-214.
- Rezaei M, Monjezi M, Yazdian Varjani A (2011) Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining. *Saf Sci* 49:298– 305.
- Shahri, A.A., Asheghi, R. (2018). Optimized developed artificial neural network- based models to predict the blast- induced ground vibration, *Innovative Infrastructure Solutions* 3:34.
- Shi, X.; Zhang, Z.; Qiu, X.; Luo, Z., (2023). Experiment study of stemming length and stemming material impact on rock fragmentation and dynamic strain. *Sustainability*, 15, 13024.
- Simangunsong, G.M., Maehara, S., Shimada, H., Matsui, K., Kubota, S., Wada, Y., Ogata, Y., (2006). Vibration and fragmentation by changing the blast burden at Funao limestone quarry, *Sci. Tech. Energetic Materials*, 67 (3), 102-110.
- 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 No. RI 8507, Washington, DC, US Bureau of Mines.

- Uyar, G.G., Aksoy, C.O., (2015). Patlatma kaynaklı titreşim analizlerinde en yüksek parçacık hızı ölçekli mesafe ilişkisini esas alan yaklaşımın olumsuzlukları, VIII. Delme-Patlatma Sempozyumu, 19-20 Kasım 2015, İstanbul, s. 119-132.
- Uysal, Ö., Erarslan K., Cebi, M.A., Akcakoca, H., (2008). Effect of barrier holes on blast induced vibration, International Journal of Rock Mechanics & Minind Sciences, 45, 712-719.
- Uysal, Ö., Arpaz, E., Berber, M. (2007). Studies on the effect of burden width on blast-induced viibration in open-pit mines, Environ Geol, 53, 643-650.
- Yang J, Lu W, Jiang Q, Yao C, Jiang S, Tian L., (2016). A Study on the vibration frequency of blasting excavation in highly stressed rock masses. Rock Mech Rock Eng 49:2825
- Yılmaz, P. (2010). Basamak ayna profilinin patlatma performansına etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 187 s.
- Yuvka, S., Beyhan, S., Uysal, Ö., (2017). The effect of the number of holes on blast-induced ground vibrations, Environ Earth Sci, 76, 621.
- Zeng, X., Zhang, X., Zhou, X., Duan, Y., Chen, J. (2023). Prediction of tunnel blasting vibration velocity considering the influence of free surface, Applied Science, 13 (3), 1373.

ÖZGEÇMİŞ

Esra ÜNVER, ilköğrenimini Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra lise eğitimini 2009 yılında Yunus Emre Lisesi'nde tamamladı. 2011-2012 öğrenim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2016 yılında bu bölümden mezun oldu. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı.

