

Bu makale aşağıda atıf bilgisi verilen makalenin Türkçe çevirisidir.
Atıf bilgisi: Aksoy Uyar, G. G., Aksoy, C. O., Yaman, H. E. 2022. Estimation of blast vibrations by numerical modelling and signal analysis. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 169, 39-48. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1066943>



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Patlatma kaynaklı titreşimlerin sayısal modelleme ve sinyal analizi ile tahmin edilmesi

Estimation of blast vibrations by numerical modelling and signal analysis

Güzin Gülsev UYAR AKSOY^{a*}, Cemalettin Okay AKSOY^b ve Hasan Eray YAMAN^c

^aHacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, Ankara, Türkiye

^bDokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, İzmir, Türkiye

^cDokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksek Okulu, Maden Mühendisliği, İzmir, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Patlatma, Titreşim, Sismik Dalga, Sayısal Model, Maden.

ÖZ

Sismik dalgalar, ilerledikleri yol boyunca geçtikleri birimlerin bütün jeolojik ve jeoteknik özelliklerini üzerlerinde taşırlar. Bu nedenle sismik dalgalara, geçtikleri yolun imzası denilebilir. Patlatma noktası kaynak olarak düşünüldüğünde, bu noktadan belirli bir mesafede (hedef olarak adlandırılabilir) ölçülen patlatma kaynaklı sismik dalgaların kaynak noktasındaki formu ortaya konur ve bu form dinamik sayısal modele entegre edilebilirse, modelin herhangi bir noktasında oluşacak olan etkiler önceden tahmin edilebilir. Bu durumda hem patlatma kaynaklı çevresel etkiler hem de şev duraylılığı açısından daha hassas çözümler üretilir. Bu çalışmada, bir tek delik (pilot) patlatması ve pilot patlatma deliği ile aynı özelliklere sahip deliklerden oluşan grup patlatmasından oluşan sismik dalgaların belirli mesafelerdeki sismograflardan alınan hız verileri kullanılarak, kaynaktaki patlatma kaynaklı sismik dalga formu elde edilmiş ve sayısal modele entegre edilmiştir. Kullanılan veri işlem tekniği, pilot veriden teorik grup patlatma verisini lineer süperposition prensibine göre tahmin etmek ve gerçek grup patlatma verisi ile karşılaştırarak aradaki farktan, patlatma kaynağında olan doğrusal olmayan davranış etkisini (plastik deformasyon etkisini) belirlemektir. Gerek grup patlatmasının sayısal modeldeki sonuçları, gerekse gerçek patlatma alanından alınan veriler incelendiğinde, sayısal model sonuçları ile saha ölçümlerinin örtüştüğü görülmüştür. Patlatma kaynaklı sismik dalgaların hem çevresel etkilerini, hem de şev duraylılığına etkilerini belirlemeye yönelik bu çalışma sonuçlarının kaya mühendisliği bilimine önemli katkı koyacağı düşünülmektedir.

Geliş Tarihi: 17.03.2021

Kabul Tarihi: 24.01.2022

Keywords:

Blasting, Vibration, Seismic Wave, Numerical Model, Mining.

ABSTRACT

Seismic waves carry all the geological and geotechnical characteristics of the units they pass along the route they travel on. Therefore, seismic waves can be called the signature of the route it passes through. If the blasting point is considered as source, blast-induced seismic waves measured at a certain distance from the source can be revealed and this form can be integrated into the dynamic numerical model, the effects that will occur at any point of the model can be predicted. In this study, seismic waves induced from single-hole blast and a group blast consisting of holes with the same characteristics as a pilot blast hole were obtained using particle velocity data obtained from seismographs at certain distances and integrated into the numerical model. The data processing technique used is to estimate the theoretical group blasting data from the pilot data according to the linear superposition principle and compare with the real group blasting data to determine the

*Başvurulacak yazar: Güzin Gülsev UYAR AKSOY, gulsevaksy@hacettepe.edu.tr

nonlinear behavior effect on the blast source from the difference. When the results were examined, it was observed that the numerical model results and field measurements coincided. The results of this study will make a significant contribution to the science of rock engineering.

1. Giriş

Özellikle büyük ölçekli madencilik çalışmalarında patlatma kaynaklı sismik dalgaların kontrol edilmesi çok önemlidir. Patlatma kaynaklı sismik dalgalar hem açık işletmelerde basamakların duraylılığını olumsuz yönde etkileyebilir, hem de yeraltı madenciliğinde tahkimata zarar verebilirler. Her iki madencilik yönteminde ve tünellemede sık aralıklarla, neredeyse günde 2, 3 defa grup patlatması yapılır. Bu patlatmalar zaman içerisinde kaya kütlelerini yorar ve dayanımının azalmasına neden olur. Bu etkiler nedeniyle heyelanlar ve göçükler oluşabilir. Patlatma kaynaklı etkilerin tam ölçekli olarak modellenmesine yönelik çalışmalar, birçok parametrenin konuya dahil olması nedeniyle sınırlı kalmıştır. Bu parametrelerden en önemlisi süreksizlik setlerinin sayısı, eğimi ve eğim yönüdür. Sing ve Narendrula (2004) küçük ölçekli patlatma deneylerinde tek bir süreksizlik setinin farklı yönlenmelerdeki durumu için en yüksek titreşim hızı (peak particle velocity - PPV) ölçmüştür. Çalışmaya göre, PPV en küçük değerini süreksizlik seti yöneliminin 45° olduğu durumda, 113,3 mm/s olarak almıştır. En yüksek PPV ise 90° 'li süreksizlik seti yöneliminde elde edilmiştir. Bu durumda titreşim iletimi en düşük 45° ve en yüksek, süreksizlik setine paralel durumda gerçekleşmektedir. Simangunsong ve Wahyidi (2015) farklı yönelim ve aralıklardaki süreksizliklerde yaptıkları titreşim ölçümlerinde benzer sonuçlar elde etmenin yanı sıra artan süreksizlik ile titreşimlerin azaldığını ortaya koymuşlardır. Zhou (2016) yaptığı modelleme çalışmasında benzer sonuçlar elde etmiştir. Zou ve Gong (2017), tabakalı kayalarda yaptıkları çalışmada eğimin yükselmesiyle PPV'nin yükseldiğini ortaya koymuşlardır ki bu sonuçlar literatürle uyumludur. Patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmin edilmesine yönelik en önemli katkı Blair (2020) tarafından konmuştur. Blair (2020) öncelikle dinamik sonlu elemanlar yöntemi ile sismik dalga yayılımını incelemiş ve sonrasında ise Monte Carlo Wave Form Superposition Model ile dalga modelini geliştirmiştir ki bu model kaya anizotropisinin etkisini de barındırmaktadır. Bu çalışmada her ne kadar malzemenin deformasyon modülü verilmemiş ise de

bu deformasyon modülü, tanımlanan malzemenin yük iletimi, deforme kabiliyeti, sinyal iletimini etkiler. Patlatmayı simule etmek için modelin ortasına bir yük uygulanmış ve 4×4 m'lik tek ve çift süreksizlik içeren modellerden elde edilen sonuçlarla Monte Carlo Waveform Superposition Model oluşturulmuştur. Normalize edilmiş model incelendiğinde, 4×4 m'lik modelde bile, modelin ortasından uzaklaştıkça dalga yayılım paterninde AFEM sonuçları ile polar yaklaşım sonuçlarının benzerliklerinin azaldığı görülmektedir. Patlatmaların çok daha büyük alanlarda yapılıyor olması, Blair'in bu çalışmasının uygulanabilirliği açısından bir olumsuzluk olsa da, Blair bu çalışmasıyla literatüre çok önemli bir katkı koymuştur.

Bu tip modelleme çalışmalarının en büyük olumsuz yönü, tam ölçekli olarak patlatma yapılan sahayı temsil etmede yaşanan zorluklardır. Çünkü, doğada süreksizliklerin sayısı, eğimi, eğim yönü, yönelimi hiç bir zaman sabit değildir. Ayrıca, doğadaki gerilmeler üç boyutludur. Patlatma kaynaklı sismik dalgalar farklı yönlerde farklı oranlarda dağılırlar. Diğer bir deyişle, bir patlatmadan kaynaklanan sismik dalgalar, kaya kütlelerinin değişik yönlerde gösterdiği farklı özelliklerden dolayı, farklı yönlerde farklı oranlarda yayılırlar ve soğrulurlar. Ayrıca, kaya ortamının patlatmaya yakın bölgelerde doğrusal olmayan özellik gösterdiği bilinmektedir (Uyar ve Aksoy, 2019). Bu şu anlama gelmektedir: Patlatmaya çok yakın bir noktadan alınan ölçümlerdeki dalga formu ile daha uzak bir noktadan alınan ölçümlerdeki dalga formu arasında davranışsal farklılıklar bulunmaktadır. Yakın mesafede, plastik etkiler görülürken (parçalanma), uzak mesafede artık bu etkiler yok olmuştur, sadece elastik etkiler görülür.

Bu çalışmanın en önemli amacı, tam saha modellemesindeki zorlukları ortadan kaldırmaya yönelik olarak 3 boyutlu dinamik sonlu elemanlar yöntemi kullanarak, patlatma sonucu oluşacak sismik dalga kaynaklı titreşimleri, patlatmadan istenilen uzaklıktaki bir mesafede tahmin edebilmektir. Burada kritik olan, sayısal modele doğru girdi parametresi verilebilmesi için kaynaktaki enerjiyi doğru tahmin

edebilmektir. Bunu sağlamak için, pilot patlatma ve her bir deliği pilot patlatma deliği gibi hazırlanmış deliklerden oluşan grup patlatmasından kaynaklanan sismik dalgaların spektral ortamda oranlanması ile elde edilen doğrusal olmayan davranış sinyali kullanılır. Yöntemin ayrıntıları bir sonraki bölümde anlatılmıştır. Yöntemin geliştirilmesi için saha çalışmaları bir altın madeninde yapılmıştır. Pilot ve grup patlatma verileri kullanılarak elde edilen sıfır noktasındaki (kaynak) dalga formu, 3B dinamik sayısal modele entegre edilerek model çözülmüştür. Daha sonra, pilot patlatma sinyali kullanılarak titreşimleri en aza indiren en uygun gecikmelerin önerildiği yöntemimiz kullanılarak (Uyar ve Ecevitoglu, 2008) grup patlatması tasarlanmıştır. Grup patlatması yapılmış; bu patlatmadan kaynaklı sismik dalgaların yarattığı ve istenilen mesafelerde ölçülen parçacık hızları, sayısal modelin bulduklarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birbiriyle çok uyumludur. Böylece bu çalışma sonucunda, bir grup patlatması sonucu oluşacak sismik dalgaların nasıl bir yayılım izleyeceği, hangi mesafelerde ne kadar titreşime sebep olacağı sayısal modelleme ile tahmin edilebilecektir.

2. Patlatma ile Oluşacak Sismik Enerjinin Kaynakta ve Hedef Noktada Hesaplanması

3B dinamik sayısal modele kaynaktaki sismik enerji iki şekilde girilebilir;

i) en yüksek parçacık hızı ya da ivme değeri olarak,

ii) sismik dalga biçimi olarak

2017 yılında tamamlanan TÜBİTAK projemizde (Aksoy ve Uyar, 2014) yaptığımız yeraltı ve yerüstü patlatma deneyleri sonucunda her iki durum için de kaynaktaki sismik enerji üretilebilmiştir. O dönemde sayısal modelleme ile yapılan maden şevlerindeki duraylılık analizlerinde patlatmaların dinamik etkilerini gerçekçi olarak girebilmek için yapılan bu çalışmalar, zaman içerisinde, patlatmanın kaynağındaki enerji bilirse 3B dinamik sayısal modelleme ile, patlatmaya istenilen mesafedeki etkilerin tahmin edilmesine evrilmiştir. Bu ise 1960'lardan günümüze dek halen kullanılma sebebi var olan düzenin pekiştirilmesinden öteye gitmeyen PPV - SD (en yüksek parçacık hızı-ölçekli mesafe) ilişkisine bağlı görgül denklem kullanılması

paradigmasının yıkılması anlamına gelmektedir. Aşağıda önce her iki şekilde de sismik enerjinin patlatma kaynağında tahmin yöntemi, sonra da bunlardan birisi ile yapılan karşılaştırmalı örnek çalışma verilmiştir.

2.1. Kaynakta ve Hedef Noktada Patlayıcı İvmesinin (ya da Parçacık Hızının) Hesaplanması

Bunun için yapılması gereken işlem sırası aşağıda verilmiştir (Aksoy ve Uyar, 2014):

1. Örnek patlayıcı patlama noktasına yerleştirilir.

2. Güvenli ama olabildiğince yakın bir uzaklığa sismograf yerleştirilir. Kaya sızramalarından korumak için sismografin üzeri kapatılabilir (kapağın sismografa değmemesi gerekir).

3. Patlatma gerçekleştirilir ve patlatma noktasına en yakın mesafedeki parçacık-ivmesi A_0 ölçülür.

4. Denklem 1'den ölçek katsayısı k hesaplanır.

5. Hedef noktadaki parçacık-ivmesi B_0 ölçülür.

6. Denklem 2'den soğrulma katsayısı α hesaplanır.

7. Denklem 3'den asıl patlayıcının patlama noktasındaki parçacık-ivmesi A hesaplanır.

8. Denklem 4'den asıl patlayıcının hedef noktadaki parçacık-ivmesi B hesaplanır.

Denklem 5'den asıl patlayıcının limit kütlesi m_{limit} hesaplanır.

$$k = \frac{A_0^2}{m_0} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\ln \frac{A_0}{B_0}}{x_0} \quad (2)$$

$$A = \sqrt{k m} \quad (3)$$

$$B = A e^{-\alpha} \quad (4)$$

$$m_{limit} = \frac{(B_{limit} e^{\alpha x})^2}{k} \quad (5)$$

$$\alpha_e = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \Delta x_i}{\sum_{i=1}^n \Delta x_i} \quad (6)$$

Bu denklemlerde yer alan; k : hesaplanan ölçek katsayısı ($g^2 \text{ kg}^{-1}$), A_0 : örnek patlayıcının patlama noktasında ölçülen parçacık ivmesi (g), m_0 : örnek patlayıcının kütlesi (kg), α : hesaplanan soğrulma

katsayısı (m^{-1}), B_0 : örnek patlayıcının hedef noktada ölçülen parçacık ivmesi (g), x_0 : patlama noktası ile örnek patlama hedef noktası arasındaki uzaklık (m), A : asıl patlayıcının patlama noktasında hesaplanan parçacık-ivmesi(g), m : asıl patlayıcının kütlesi (kg) (muhtemelen $m > m_0$), B : asıl patlayıcının hedef noktada hesaplanan parçacık-ivmesi (g), x : patlama noktası ile asıl patlama hedef noktası arasındaki uzaklık (m) (muhtemelen $x > x_0$), Δx : yakın ve uzak istasyonlar arası uzaklık (m), α_e : etken soğrulma katsayısı (m^{-1}), n , i : ölçüm sayısı, m_{limit} : asıl patlayıcının limit kütlesi (kg), B_{limit} : asıl patlayıcının hedef noktada seçilen limit parçacık ivmesi (g)'dir.

Sismik kaynak olarak kullanılan patlatma ile üretilen enerjinin yetişmediği uzak mesafeler için Denklem 6' daki α_e 'yi tek seferde hesaplamamız mümkün değildir. Sismik sinyal alabildiğimiz Δx ara uzaklıkları içinde kalmamız gerekir. Arazi şartlarına bağlı olarak, Δx ' ler arasında boşluklar kalabilir, Δx ' ler üst üste gelebilir veya Δx ' ler hat dışına çıkabilir. Bu durumda parçalı ölçümler yaparak, Denklem 2' den α ' nın ara değerleri hesaplanır. α_e etken soğrulma katsayısı, α ara soğrulma katsayılarının uzaklık-ağırlıklı ortalamasından Denklem 3 yardımıyla hesaplanır. Başka bir deyişle, α_e , sismik sinyal alabildiğimiz Δx ara uzaklıkları için hesaplanan soğrulma katsayılarının uzaklık-ağırlıklı ortalamasıdır. Bu çalışmada farklı α (soğrulma katsayısı) hesaplanma sebebi, Δx ara uzaklıkları için ayrı ayrı hesap yapılmasıdır. Son değer olarak α_e kullanılmıştır. Formüller, Çizelge 1'de uygulama parametreleri verilen bir çalışmada denenmiştir. Çalışma İmbat yeraltı kömür madeninde 2016 yılında gerçekleştirilmiş olan patlatmadan alınan ivme değerlerine uygulanmıştır. Bu patlatmada toplam 28,8 kg patlayıcı kullanılarak kaynak elde edilmiştir.

Çizelge 1- İmbat yeraltı kömür madeninde patlatma kaynaklı ivme-uzaklık tablosu.

Jeofon	Uzaklık (m)	Ölçülen İvme (g)
13638	31,5	1,564
12270	42,0	0,835
12269	52,5	0,742
14465	63,0	0,517

$$k = \frac{A_0^2}{m_0} = \frac{1,564^2}{28,8} = 0,0849 \text{ g}^2 \text{ kg}^{-1}; \alpha = \frac{\ln \frac{A_0}{B_0}}{x_0} = \frac{\ln \frac{1,564}{0,875}}{10,5} = 0,0553 \text{ m}^{-1};$$

$$\alpha = \frac{\ln \frac{A_0}{B_0}}{x_0} = \frac{\ln \frac{1,564}{0,742}}{21} = 0,0355 \text{ m}^{-1}; \alpha = \frac{\ln \frac{A_0}{B_0}}{x_0} = \frac{\ln \frac{1,564}{0,517}}{31,5} = 0,0351 \text{ m}^{-1};$$

$$\alpha_e = \frac{0,0553+0,0355+0,0351}{3} = 0,042 \text{ m}^{-1};$$

$$A = \sqrt{k m} = \sqrt{0,0849 \times 100} = 2,9138 \text{ g};$$

$$B = A e^{-\alpha x} = 2,9138 e^{-0,042 \times 63} = 0,02067 \text{ g};$$

$$m_{limit} = \frac{(B_{limit} e^{\alpha x})^2}{k} = \frac{(0,1 e^{0,042 \times 63})^2}{0,0849} = 23,4 \text{ kg}$$

olarak hesaplanmaktadır. Patlatma verileri formüllere konduğunda elde edilen sonuçlar şöyle yorumlanabilir: Patlayıcı miktarı $m = 100$ kg olduğunda, patlama noktasında 2,9138 g'lik bir ivme yaratır. Patlama noktasına $x = 63$ m uzaklıkta $B = 0,02067$ g'lik bir ivme yaratır. Bu ivmenin 0,1 g'ye düşmesi için 23,4 kg'lık bir patlama yapmak gerekir.

2.2. Kaynakta ve Hedef Noktada Sismik Dalganın Tahmin Edilmesi

Kaynakta sismik enerjini parametrik olarak tahmin edebilmek için, patlatma yapılacak sahada, pilot patlatma yapılarak sismografin satüre olmadan konabileceği en yakın mesafeye (örneğin 10 m) yerleştirilen sismografla ve bu sismografa belli mesafe uzaklıkta aynı hat üzerine yerleştirilmiş en az bir başka sismografla sismik dalga verisi alınması gereklidir. Daha sonra, o sahadaki kazı çalışmalarında uygulanan rutin grup patlatma yapılarak yine aynı şekilde ölçüm alınır. Pilot patlatmanın yaratacağı enerjini kullanarak, istenen miktarda patlayıcının yaratacağı enerji teorik olarak hesaplanır, yani grup patlatmasından ortaya çıkacak toplam sismik enerji teorik olarak hesaplanır. Gerçekte yapılan grup patlatması ile oluşan enerji de ölçülür ve teorik olarak hesaplanana göre oranlanır. Böylece enerjinin olması gerekenden ne kadar azaldığı ortaya çıkar ki bu kısım bizim sismografla ölçtüğümüz, elastik kısımdır. Geri kalan enerji ise, kayayı kırma için kullanılan plastik enerjidir ve sayısal modelde kaynak verisi olarak kullanmamız gereken, işte enerjinin bu bölümüdür. Böylece, o saha için, istenen miktarda patlayıcının kaynaktaki plastik enerjisi ve istenen hedef noktadaki elastik enerjisi hesaplanabilecektir. Ortam değiştiğinde, yine bir pilot patlatma yapılmalı ve veriler tekrar oluşturulmalıdır.

3. Önerilen Yöntemin Uygulandığı Saha Çalışması

Çalışmanın yapıldığı maden sahası bir altın madenidir. Maden sahasında hakim kayalar volkanik, metamorfik ve intrusif kayalar olup, patlatma çalışmasının olduğu alanda volkanik kayalar mevcuttur. Bu bilgiler sahadan alınmıştır.

3.1. Kaynakta Sismik Enerjinin Hesaplanması

13.01.2021 tarihinde Şekil 1’de SV-GRUP ve SV-PİLOT adı ile gösterilen lokasyonda yapılan grup patlatmasından kaynaklanan sismik dalgalar, 4 adet sismograf ile kaydedilmiştir. Sismograf lokasyonları, Şekil 1’de sismografların seri numaraları ile

adlandırılarak gösterilmiştir (13638, 12269, 12270 ve 14465).

Grup ve pilot patlatmasına ait tasarım bilgileri Çizelge 2’de, patlatma kaynaklı ölçülen titreşim, frekans ve süre verileri Çizelge 3’te verilmiştir.



Şekil 1- 13.01.2021 grup ve pilot patlatması ve sismograf yerleri.

Çizelge 2- Grup ve pilot patlatmasına ait tasarım bilgileri.

Patlatma Sahası	Patlatma Tipi	Delik Çapı	Delik Geometrisi	Delik Sayısı	Delik Boyu	Q	Gecikme
SV	Pilot	102 mm	3 mx3,5 m	1	5-6 m	20 kg Anfo, 0,5 kg yemleme	Delikler arası 42ms; sıralar arası 67ms
	Grup	102 mm	3 mx3,5 m	84	5-6 m	20 kg Anfo, 0,5 kg yemleme	Delikler arası 42ms; sıralar arası 67ms

Çizelge 3- Patlatma kaynaklı ölçülen titreşim, frekans, süre verileri.

Sismograf	Mesafe m	Yanal mm/s	Düşey mm/s	Boyuna mm/s	Vektörel Toplam mm/s	Frekans Hz	Süre saniye
12270	Pilot:5	183,1	180,1	217,6	260,8	2	0,2
	Grup:10	90,68	63,50	49,40	96,02	22	0,5
13638	Pilot:10	24,26	38,86	42,80	48,65	21	0,2
	Grup:15	40,51	65,02	31,37	66,67	22	1
12269	Pilot:20	23,75	36,83	41,02	54,27	35	0,2
	Grup:30	19,30	36,96	31,62	44,84	24	1,2
14465	Pilot:40	11,81	38,86	12,70	39,08	30	0,5
	Grup:45	18,54	35,18	19,30	39,21	24	1,2
Mikro	Pilot:261	0,875	1,324	1,915	2,317	7,5	1
	Grup:303	2,514	3,003	3,153	3,927	12	1,5

Sayısal modele patlatmalara ait bir zaman-serisi verebilmek için yapılan pilot ve grup patlatmalardan zaman serileri oluşturularak ascii.txt formatta kaydedilmiştir. Çalışmanın uygulama kısmında, iki adet ascii.txt dosyası kullanılmıştır. İkisi de altın madeninde, kaynaktan 10 m uzaklıkta alınmış sismik kayıtlardır. Birinci dosya, toplam patlayıcının 20 kg (pilot delik), olduğu sismik sinyaldir. İkinci dosya, 84 delikli grup patlatmasına ait veri dosyasıdır. Grup patlatmadaki her delik de aynı pilot delik gibi 20 kg patlayıcıya sahiptir ve aynı şekilde doldurulmuştur.

Pilot patlatma, grup patlatmanın hemen yakınındadır. Pilot patlatmadan kaynaklanan sismik sinyal 84 kere toplanarak 84x20 kg'lik patlayıcının, delik aralarına gecikme verilerek patlaması ile yaratacağı toplam sinyal üretilmiş, sonra da gerçek grup patlatma sinyali ile karşılaştırılmıştır. Aradaki fark kullanılarak pilot patlayıcı sinyalinden istenilen miktarda patlayıcının yaratacağı teorik sinyal üretilmiştir. Program çalıştırıldığında oluşan Energy.EXE programı 3 soru sormaktadır:

1) Big-charge filename (no TXT) :

Örneğin: 12270-G

2) Small-charge filename (no TXT) :

Örneğin: 12270-P

3) Multiplication factor :

Örneğin: 84

Şekil 2, bu ekranı göstermektedir.

Energy.EXE programı 3 yeni dosya yaratır:

1) _maxi dosyası

Örneğin: source_maxi.dat

12270-P.TXT dosyasındaki PPV, 12270-G.dat dosyasındaki PPV (96,02 mm/s) ile eşitlenmiş halde.

2) _multi dosyası

Örneğin: source_multi.dat

12270-P.TXT dosyasındaki PPV, Multiplication Factor (84) ile çarpılmış halde.

3) Rapor.TXT dosyası

Big-charge energy: Transversal Vertical Longitudinal

Small-charge energy: Transversal Vertical Longitudinal

Maximum energy: Transversal Vertical Longitudinal

Multiplier energy: Transversal Vertical Longitudinal

Yukarıdaki enerji miktarlarından, enerjinin ne kadarının (yüzde olarak) elastik dalga yayılımına, ne kadarının (yüzde olarak) plastik deformasyona harcandığı hesaplanabilir (Uyar vd., 2014).

Şekil 3'de kırmızı ile gösterilen dalga biçimi kuramsal olarak 84 kere pilot patlatma sinyalinin toplanması ile üretilen (delikler arasına gecikme verilerek) yanal-bileşen parçacık-hızı verisidir. Mavi ise, grup patlatmada görülen en yüksek PPV kadar normalize edilmiş kuramsal yanal-bileşen parçacık

```
Big-charge filename (no TXT) : 12270-G
Small-charge filename (no TXT) : 12270-P
Multiplication factor : 84
```

Şekil 2- Energy.EXE programı çalıştırıldığında ekran görüntüsü.

hızı verisidir. Pilot patlatmaya göre grup patlatmasında görülen genlik büyümesinin 84 kat değil de sadece 4,7 kat olması ($96 \text{ mm/s} \times 84 / (1680 \text{ mm/s})$), ortamda lineer olmayan bir davranışın (non-linear behavior) hakim olduğunu gösteriyor. Enerjinin büyük bir kısmı plastik deformasyona harcanıyor. Bu şekilde hesaplanan kaynaktaki enerji, 3B dinamik sayısal modele ascii.txt dosyası olarak entegre edilmektedir.

3.2. Çalışmanın 3 Boyutlu (3B) Dinamik Sayısal Modelleme Safhası

Şekil 1'deki haritada yerleri gösterilen grup ve pilot patlatması ve sismograf yerleri Plaxis 3D'de Şekil 4'de gösterilen biçimde tanımlanmıştır.

Çalışma alanı volkanik kayalardan oluşmaktadır. 3B modelde kullanılan kaya parametreleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Sismografların patlatma alanına uzaklığı aşağıda verilmiştir;

-Sismograf 2. 10 metre; Sismograf 3. 15 metre

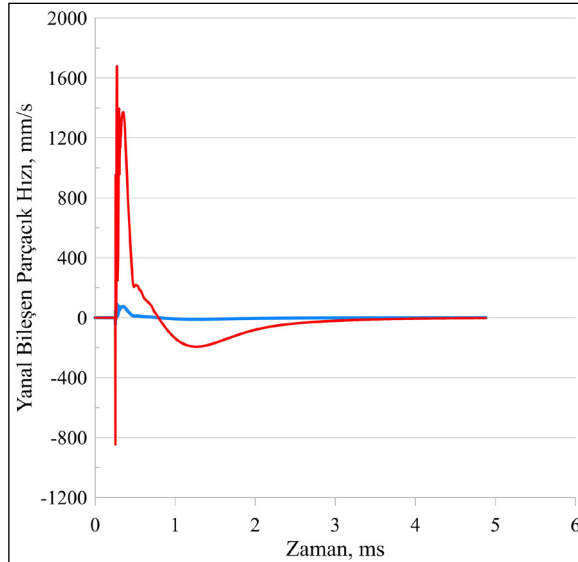
-Sismograf 4. 30 metre; Sismograf 5. 45 metre

-Sismograf 6. 100 metre; Sismograf 7. 200 metre

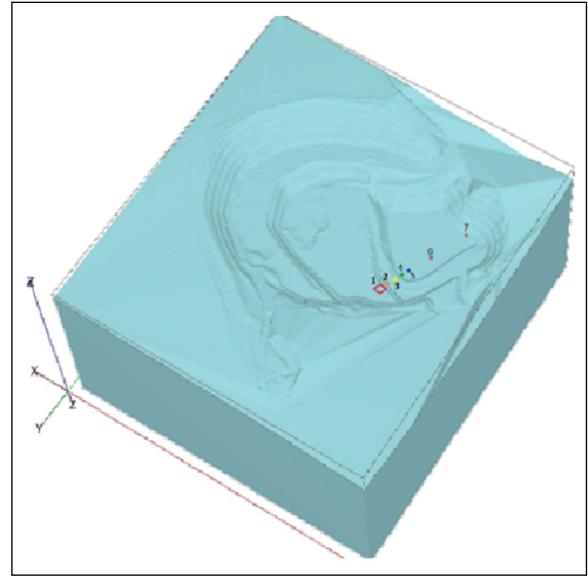
Patlatma noktasındaki patlama kaynağı verilerinin sayısal modele entegre edilmesiyle elde edilen sismik dalga hızları, tüm bileşenlerdeki (yanal, düşey ve boyuna) gerçek patlama kaynaklı sismik dalgalarla uyumludur. Şekil 5, 6 ve 7 bu uyumluluğu göstermektedir.

Bu durum, başka kaynak verileri ile de test edilerek görülmüş olup, yer kaplamaması için makalede sadece bu altın madenindeki karşılaştırmaya yer verilmiştir. Bu uyum görüldükten sonra, sayısal modelin 20, 30 ve 40 m'deki tahminleri de, gerçek patlatma verileriyle karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir (Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10).

Sayısal modelde mesafeyle değişen toplam deformasyon miktarları da görülebilmektedir. Şekil 11'de 40 m'den sonra patlatma kaynaklı



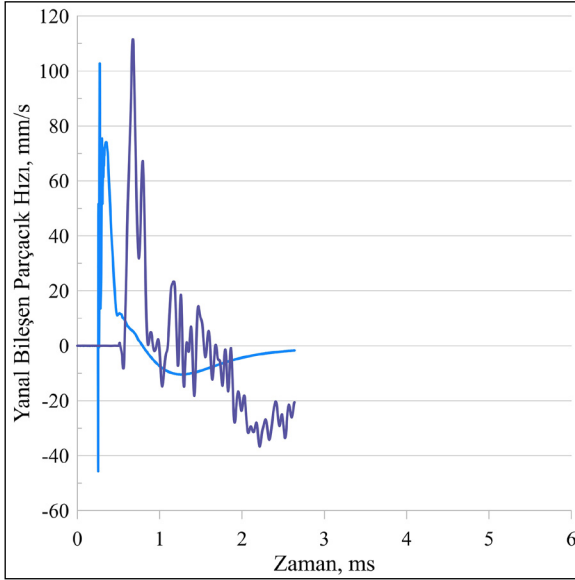
Şekil 3- Sıfır noktasındaki sismik enerji: pilot sinyalin linear toplanması ile elde edilen (kırmızı) ve non-linear davranışa göre hesaplanan, (mavi) sismik dalga formu. Kabul edilen mavi olmalıdır.



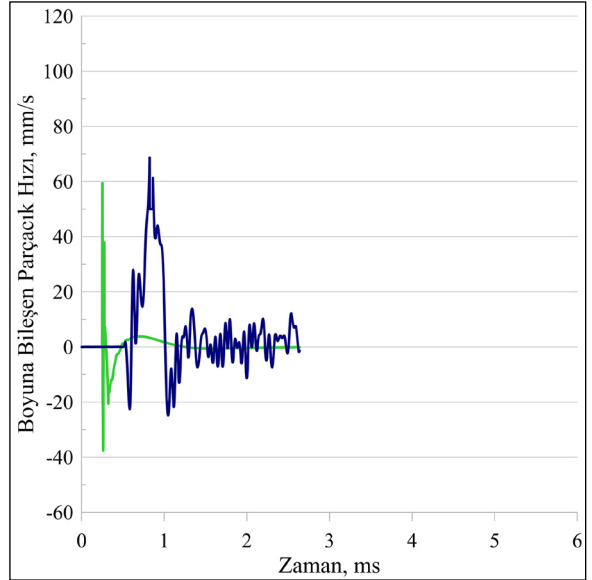
Şekil 4- Modelde tanımlanan grup ve pilot patlatması ve sismograf yerleri. No:1 patlatma yeri; No:2,3,4,5,6 ve 7 sismograf lokasyonları.

Çizelge 4- Sayısal modelde kullanılan kaya parametreleri.

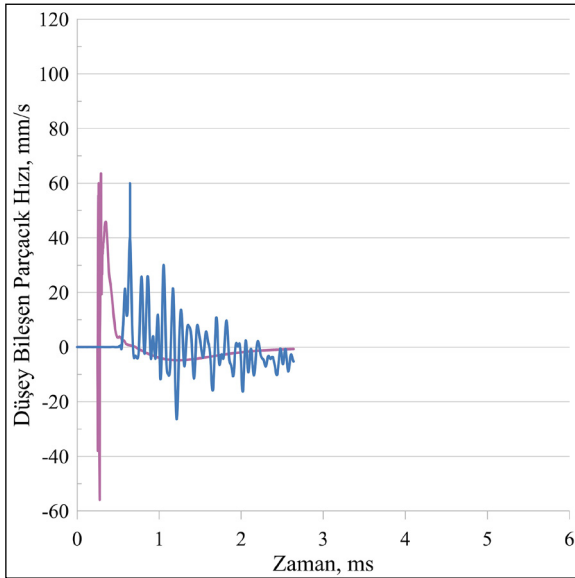
Kaya Tipi	Deformasyon Mod. (MPa)	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Poisson Oranı
Volkanik Kaya	553,2	667	24,34	24	0,25



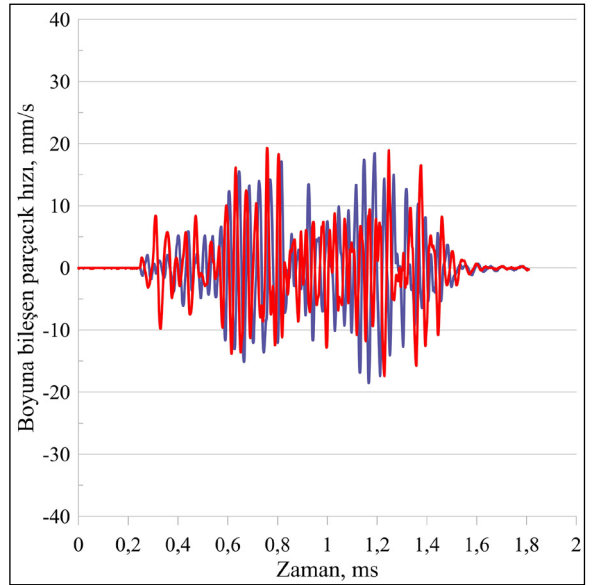
Şekil 5- Gerçek patlatma yanal bileşen kaynak sinyali ve sayısal modelleme ile tahmin edilen sinyal karşılaştırma (açık mavi gerçek veri- koyu mavi sayısal modelleme verisi).



Şekil 7- Gerçek patlatma boyuna bileşen kaynak sinyali ve sayısal modelleme ile tahmin edilen sinyal karşılaştırma (yeşil gerçek- mavi sayısal modelleme).



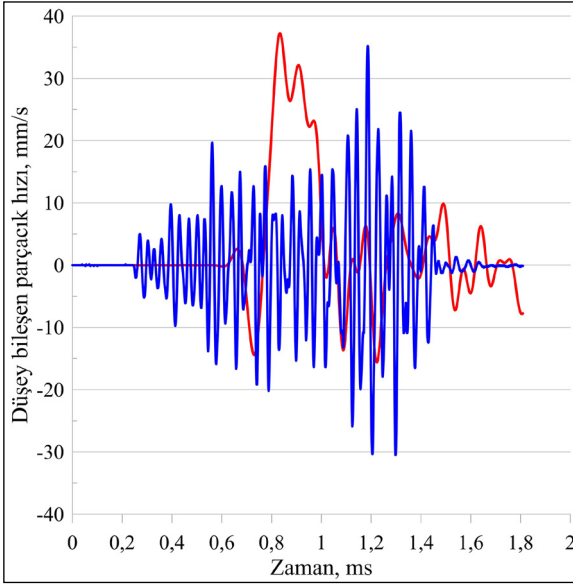
Şekil 6- Gerçek patlatma düşey bileşen kaynak sinyali ve sayısal modelleme ile tahmin edilen sinyal karşılaştırma (mor gerçek veri- mavi sayısal modelleme verisi).



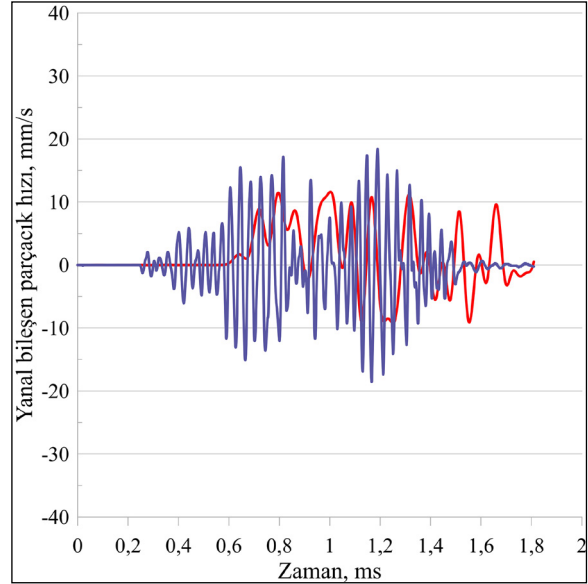
Şekil 8- Sayısal modelin tahmin ettiği (kırmızı) ve gerçek patlatma verisi (mavi) (patlatmaya 20 m mesafede).

deformasyonların sıfırlandığı görülmektedir. Ayrıca, aynı patlatmadan kaynaklı sismik dalgaların 10 ve 40. metredeki sismograf verilerini kullanarak hesaplanan sismik kalite faktörlerindeki değişiklik de dikkat çekicidir (sismik kalite faktörünün patlatma dalgalarından hesaplanması tarafımızdan 2020 yılında yayınlanmıştır (Aksoy ve Aksoy, 2020). Patlatmadan

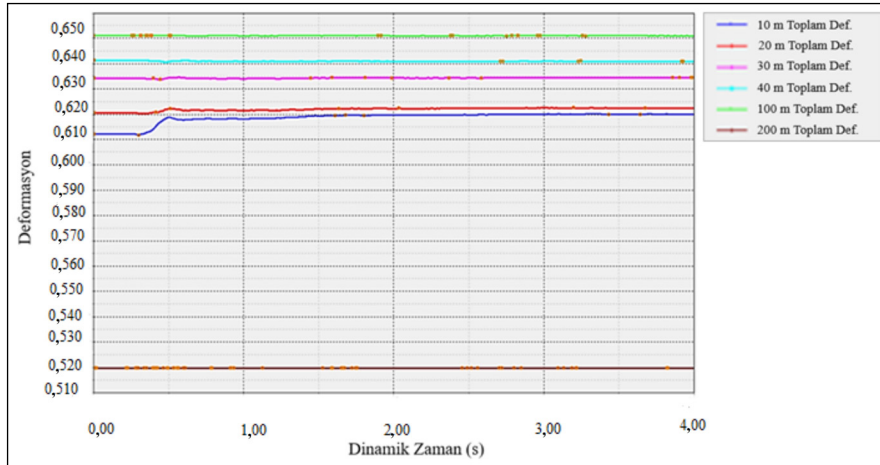
ilk 40 metreye kadar sismik kalite faktörü 0,43-0,85 aralığında değişirken, 40 metreden sonra 3,12'ye yükselmiştir. Sayısal modelleme ile deformasyonların sıfırlandığı alanın belirlenebilmesi ve bu alanın sismik kalite faktörü hesaplarıyla da uyumlu olması, patlatmanın doğrusal olmayan davranış gösterdiği alanın 40 m içerisinde olduğu, bu mesafeden sonra



Şekil 9- Sayısal modelin tahmin ettiği (kırmızı) ve gerçek patlatma verisi (mavi) (patlatmaya 30 m mesafede).



Şekil 10- Sayısal modelin tahmin ettiği (kırmızı) ve gerçek patlatma verisi (mavi) (patlatmaya 40 m mesafede).



Şekil 11- Sayısal modelde mesafeyle değişen toplam deformasyon miktarları. X eksenini dinamik zamanı (s), y eksenini deformasyon miktarını (m) gösterir.

sismik dalgaların doğrusal davranış gösterdiğini anlamamıza sebep olmuştur.

4. Sonuçlar

Belirli dönemlerde, bir olayı açıklamaya yönelik hipotezler arasından bir veya birkaç tanesi Egemen Paradigma olarak o dünyada yerini alır (Yazgan, 2016). Paradigmaya aykırı olan, onunla ters düşen görüşleri araştırmaya yönelen ya da tümüyle başka bir çizgide ilerleyen çalışmalar yeterince iltifat almazlar. Egemen Paradigma ile uyumlu, bağlantılı çalışmalar ise bir çeşit var olan düzen pekiştiricisi muamelesi

görerek, bağlılıklarının ödülünü alırlar. Bu ödül, yayının saygın bir dergiye kabulünden, araştırmaya maddi destek sağlamaya kadar uzanır. Patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmin edilmesi için 1960'lı yıllarda geliştirilen ve halen kullanılan parçacık hızı-ölçekli mesafe kuramı böyle bir paradigmadır. Mevcut paradigmanın ortadan kalkması, var olan düzeni bozarak kaotik sonuçlara sebebiyet verebileceği için 60 yıldan fazla süre geçmesine rağmen, patlatma kaynaklı titreşimlerin en aza indirilebilmesi ve tahmin edilebilmesi için hala patlayıcı madde kısıtlama temelli görgül formüller kullanılmaktadır.

Bu çalışma,

- Pilot patlatmadan kaynaklı yayılan sismik dalganın ortamın bütün jeoteknik parametrelerini (süreksizlik seti sayısı, yönü, doğrultusu, yeraltı suyu vb.) bünyesinde barındıran sismik imzası ile yapılması açısından,

- Patlatmanın sıfır noktasında yani kaynağında oluşan sismik enerjinin pilot ve grup patlatma sinyallerinden elde edilmesi açısından,

- Bu kaynak sinyalin 3B dinamik sayısal modele beslenmesi ve patlatma şartlarının tanımlandığı modelden istenilen hedef noktada titreşimlerin tahmin edilmesi açısından,

- Patlatmanın doğrusal olmayan davranış gösterdiği yani plastik deformasyon bölgesinin hem sayısal modellerle hem de sismik kalite faktörü hesaplanmasıyla belirlenmesi açısından,

- Patlatmaların dinamik etkilerinin önceden belirlenmesi sayesinde, henüz planlama aşamasında çevre duraylılığı analizlerine gerçek patlatma etkilerinin girilebilmesi açısından,

- Patlatma ve jeoteknik mühendisleri açısından bundan sonra daha hassas tasarımlar vermesine izin vermesi açısından,

çok önemlidir ve mevcut paradigmayı yıkmayı hedeflemektedir.

Katkı Belirtme

Bu çalışmada patlatma deneylerinin yapılması için maden sahalarını kullanımımıza açan TÜMAD Lapseki Altın madeni yöneticileri ve sahada yardımlarını esirgemeyen mühendislerine; yeraltı uygulaması için de İmbat madencilik yöneticileri ve mühendislerine çok teşekkür ederiz.

Değinilen Belgeler

- Aksoy, G. G., Aksoy, C. O. 2020. Patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmininde sismik kalite faktörü kullanımı. MT Bilimsel, 8(18), 133-145.
- Aksoy, C. O., Uyar, G. G. 2014-2017. Deformasyona izin vermeyen tahkimat sisteminin geliştirilmesi. TÜBİTAK, Proje No: 114M566.
- Blair, D. P. 2020. Approximate models of blast vibration in non-isotropic rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 128, 104-245.
- Singh, S. P., Narendrula, R. 2004. Assessment and prediction of rock mass damage by blast vibrations. International Proceeding 13th International Symposium Mine Planning and Equipment Selection, Wrocław, 317-322, 1-3.
- Simangunsong, G. M., Wahyudi, S. 2015. Effect of bedding plane on prediction blast-induced ground vibration in open pit coal mines. International Journal of Rock Mechanism and Mining Science 79, 1-8.
- Uyar, G. G., Aksoy, C. O. 2019. Comparative review and interpretation of the conventional and new methods in blast vibration analyses. Geomechanics and Engineering 18(5), 545-554.
- Uyar, G. G., Aksoy, C. O., Ecevitöglü, B., Kaypak, B. 2014. Partition of elastic/plastic energy in mine blast. International Conference of Mining, Material and Metallurgy, MMM'14.
- Uyar, G. G., Ecevitöglü, B. 2008. Waveform analysis in mitigation of blast-induced vibrations. Journal of Applied Geophysics 66, 25-30.
- Yazgan, Y. 2016. Yaşantıların Psikolojisi ve Biyolojisi. Remzi Kitabevi, 285.
- Zhou, J. M. 2016. The effect of joints on rock masses under blast-induced vibration. PhD Thesis, University of Hong Kong.
- Zou, F., Gong, L. 2017. Experimental study on the propagation characteristics of blasting vibration in layered rock masses. International Asia-Pacific Engineering Technology Conference, Kuala Lumpur, 889-896, 25-26.