



Seismological Analysis of the September 5, 2012 Afyonkarahisar (Türkiye) Military Ammunition Depot Explosion

Irem Ozkavaf^{1,2} and Emrah Budakoglu³

¹ Sakarya University, Institute of Natural Sciences, 54050 Sakarya, Türkiye

² Anadolu Hayat Emeklilik, Istanbul Anatolia Regional Sales Directorate, 34758 İstanbul, Türkiye

³ Sakarya University, Engineering Faculty, Department of Geophysical Engineering, 54050 Sakarya, Türkiye
ORCID: 0009-0006-4006-1782, 0000-0002-9897-2435

Keywords

Explosion seismology, Seismic and acoustic waves, Forensic seismology, Amount of explosive material

Highlights

- * Forensic seismology
- * Time and frequency domain analysis of seismograms
- * Estimation of the amount of detonate material using different methods

Aim

The study highlights the seismological analysis of a large explosion and its contribution to forensic processes

Location

This study has implemented in a field area Afyonkarahisar province

Methods

Explosion was analysed time-frequency environment, the amount of explosive were analysed by crater, magnitude and the secondary shock wave delay time methods

Results

The origin time of the explosion was 18:07:53.87 (UTC), $M_L=1.4$, the explosive yield was 21 t, and the dominant frequencies for P and acoustic waves were 3 and 20 Hz.

Supporting Institutions

The data used in the study were obtained from KOERI and AFAD

Financial Disclosure

The authors declared that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 05.04.2024

Revised: 14.08.2024

Accepted: 15.08.2024

Printed: 30.12.2024

DOI

10.46464/tdad.1465881



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Emrah Budakoglu

Email: ebudakoglu@sakarya.edu.tr

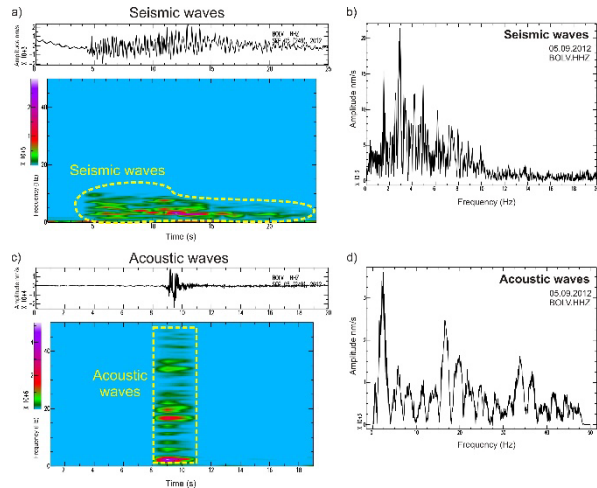


Figure
2012 Afyon ammunition depot explosion seismic wave seismogram and corresponding spectrogram (The spectrogram was calculated using the vertical component of the waveforms.)

How to cite:

Ozkavaf I., Budakoglu E., 2024. Seismological Analysis of the September 5, 2012 Afyonkarahisar (Türkiye) Military Ammunition Depot Explosion, Turk Deprem Arastirma Dergisi 6(2), 369-386, <https://doi.org/10.46464/tdad.1465881>.



5 Eylül 2012 Afyonkarahisar (Türkiye) Askeri Mühimmat Deposu Patlamasının Sismolojik Analizi

İrem Özkavaf ^{1,2} ve Emrah Budakoğlu ³

¹ Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 54050 Sakarya, Türkiye

² Anadolu Hayat Emeklilik, İstanbul Anadolu Bölge Satış Müdürlüğü, 34758 İstanbul, Türkiye

³ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 54050 Sakarya, Türkiye
ORCID: 0009-0006-4006-1782, 0000-0002-9897-2435

ÖZET

5 Eylül 2012 tarihinde Afyonkarahisar'daki 500. İstihkâm Ana Depo Komutanlığı Şehit Uzman Çavuş Mete Saraç Kışlası'nda bulunan 32 nolu mühimmat deposunda kuvvetli bir patlama meydana gelmiştir. Bu çalışmada patlamaya ilişkin sismik ve akustik dalga kayıtları zaman ve frekans ortamında incelenmiştir. Sismogramların analizinde patlamanın 18:07:53.87 (UTC)'de gerçekleştiği ve büyüklüğü $M_L=1.4$ olarak hesaplanmıştır. Üç farklı verim tahmini yönteminden ikincil şok dalgası gecikme süresi temelli analiz güvenilir bulunmuş ve infilak eden madde miktarı 21 ton olarak tespit edilmiştir. Frekans ortamı çalışmalarında P dalgalarının 3 Hz ve akustik dalgaların 20 Hz civarında baskın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, frekans ortamı analizlerinde çok kısa sürede birden fazla patlamanın gerçekleştiğine dair bulgulara rastlanmıştır. Patlamalara ilişkin sismolojik araştırmalar adli süreçlere, kriz yönetimine ve acil durum planlamalarına önemli katkı sunabilirler.

Anahtar kelimeler

Patlama sismolojisi, Sismik ve akustik dalgalar, Adli sismoloji, Patlayıcı madde miktarı

Öne Çıkanlar

- * Adli sismoloji
- * Sismogramların zaman ve frekans alanı analizi
- * Farklı yöntemler kullanılarak patlayan malzeme miktarının tahmini

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.04.2024

Düzeltilme: 14.08.2024

Kabul: 15.08.2024

Basım: 30.12.2024

DOI

10.46464/tdad.1465881

Sorumlu yazar

Emrah Budakoğlu

Eposta:

ebudakoglu@sakarya.edu.tr

Seismological Analysis of the September 5, 2012 Afyonkarahisar (Türkiye) Military Ammunition Depot Explosion

İrem Ozkavaf ^{1,2} and Emrah Budakoglu ³

¹ Sakarya University, Institute of Natural Sciences, 54050 Sakarya, Türkiye

² Anadolu Hayat Emeklilik, İstanbul Anatolia Regional Sales Directorate, 34758 İstanbul, Türkiye

³ Sakarya University, Engineering Faculty, Department of Geophysical Engineering, 54050 Sakarya, Türkiye
ORCID: 0009-0006-4006-1782, 0000-0002-9897-2435

ABSTRACT

On September 5, 2012, a powerful explosion occurred in Ammunition Depot No. 32 located in the Şehit Uzman Çavuş Mete Saraç Barracks of the 500th Engineering Main Depot Command in Afyonkarahisar. In this study, seismic and acoustic wave records related to the explosion were analysed in both time and frequency domains. Analysis of the seismograms determined that the explosion occurred at 18:07:53.87 (UTC) with a magnitude of $M_L=1.4$. Among three different yield estimation methods, the secondary shock wave delay time-based analysis was found to be reliable, and the amount of explosive material was estimated to be 21 tons. In the frequency domain studies, it was determined that the P-waves were dominant at around 3 Hz and the acoustic waves at around 20 Hz. Furthermore, findings from frequency domain analyses indicated the occurrence of multiple explosions within a very short time frame. Seismological investigations related to explosions can significantly contribute to forensic processes, crisis management, and emergency planning.

Keywords

Explosion seismology, Seismic and acoustic waves, Forensic seismology, Amount of explosive material

Highlights

- * Forensic seismology
- * Time and frequency domain analysis of seismograms
- * Estimation of the amount of detonate material using different methods

Manuscript

Research Article

Received: 05.04.2024

Revised: 14.08.2024

Accepted: 15.08.2024

Printed: 30.12.2024

DOI

10.46464/tdad.1465881

Corresponding Author

Emrah Budakoğlu

Email:

ebudakoglu@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ

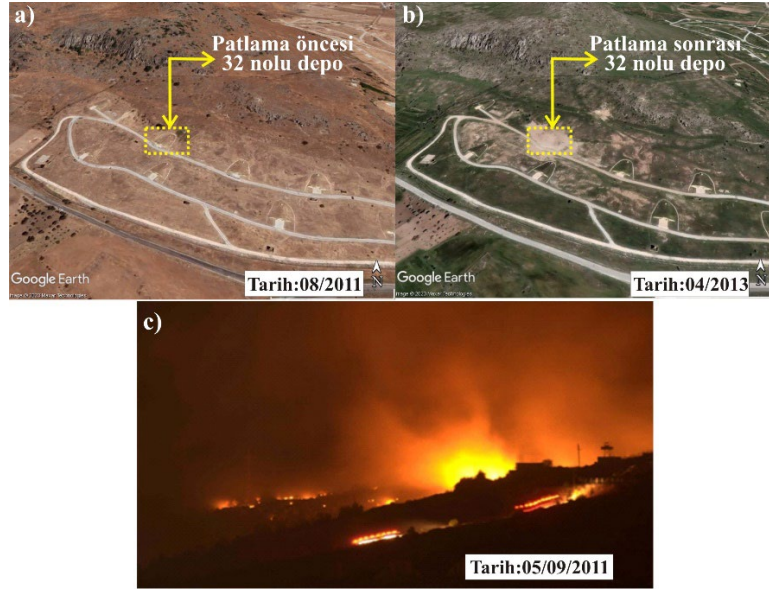
Adli bilimler, suç ve uyuşmazlıkların ortaya çıkarılması amacıyla kullanılan çok sayıda bilimin katkı sağladığı bilimler demeti olarak tanımlanmaktadır. Adli bilimler kendi özelinde düşünüldüğünde bir bilim hüviyeti kazanmamış olmasına rağmen farklı disiplinlerin (jeofizik, jeoloji, tıp, kimya, biyoloji, psikoloji ve sosyal bilim vb.) genel anlamda toplanması olarak nitelendirilebilir. Yer bilimlerinin son yıllarda gelişimine paralel olarak diğer farklı disiplinlere sağladığı katkılar azımsanmayacak derecede önemlidir. Jeoloji, Jeofizik, Jeokimya bilimleri ve alt dalları (sismoloji, mineraloji, sedimantoloji, jeomorfoloji vb.) kullanılarak adli olay soruşturmalarına büyük katkılar sağlanmaktadır. Son yıllarda özellikle doğal ve doğal olmayan sismik kaynakların detaylı analizleri soruşturmalara katkı sağlama açısından bir araç olarak kullanılmaktadır. Sismolojinin önemli bir kolu da adli (forensic) sismolojidir. Adli sismoloji, dünya genelinde soğuk savaş sırasında ortaya çıkmıştır. Çeşitli ülkelerin nükleer silahları geliştirme hamleleri ve geliştirilen silahların test edilmesi safhalarında meydana gelen sismik sinyallerin sismoloji bilimi tarafından izlenebilme yeteneğinin fark edilmesi dünyada merak uyandırmıştır. Sismik sinyallerin genellikle patlamaların olduğu yerlerden kilometrelerce uzakta tespit edilebilmesi, sismolojik yöntemlerin bu testleri gözlemlemek amacıyla kullanılmasının etkin bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Adli sismolojideki en büyük zorluklardan biri, depremler tarafından üretilen sismik sinyaller ile patlamalar tarafından üretilenler arasında ayrımın yapılmasıdır. Günümüzde bu konu da çok sayıda araştırmacı literatüre önemli katkılar sağlamıştır.

Dünya çapında sismolojik gözlemlerinin hızla gelişmesi, sismik gözlemlerin potansiyel olarak adli soruşturmaları desteklemek amacıyla nasıl kullanıldığına dair çok sayıda örnekle sonuçlanmıştır. Uçak kazaları sonucu meydana gelen sismik ve akustik sinyaller kullanılarak çarpma süreleri ve konum hakkında bilgiler (Kim ve diğ. 2001, McCormack 2003), terör saldırıları sonrasında patlama zamanı ve patlayıcı miktarına ilişkin tahminler (Koper ve diğ. 1999), yer altı nükleer denemeleri tespiti (Kim ve Richards 2007, Bowers ve Selby 2009, Zhang ve Wen 2015), kimyasal fabrika patlamalarına ilişkin detay tahminler (Budakoğlu 2022); patlama içeren hırsızlık olaylarına ilişkin sismolojik analizler (Hinzen ve diğ. 2022) bu kullanımlara verilebilecek önemli örneklerdir.

Bu çalışmada, 5 Eylül 2012 tarihinde Afyonkarahisar'daki 500. İstihkâm Ana Depo Komutanlığı Şehit Uzman Çavuş Mete Saraç Kışlası'nda bulunan 32 nolu mühimmat deposunda el bombalarının tasnif edilmesi esnasında meydana gelen patlama sismolojik açıdan değerlendirilmiştir. Bu amaçla adli olaylara ait oluş zamanı, patlayıcı miktarının belirlenmesi, patlamanın oluş düzeni gibi bilgilerin elde edilmesi ve kriz yönetimi, acil durum planlaması ve idari soruşturmalara fayda sağlayabilecek bilgiler üretilmesi hedeflenmektedir.

2. 5 EYLÜL 2012 AFYONKARAHİSAR MÜHİMMAT DEPOSU PATLAMASI

5 Eylül 2012 tarihinde yerel saat ile 21:15 civarında Afyonkarahisar'daki 500. İstihkâm Ana Depo Komutanlığı Şehit Uzman Çavuş Mete Saraç Kışlası'nda bulunan 32 nolu mühimmat deposunda el bombalarının tasnif edilmesi esnasında güçlü bir patlama meydana gelmiştir (Şekil 1). Patlamada Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) mensubu rütbeli ve erlerden oluşan 25 askerimiz şehit olmuş ve 4'ü asker olmak üzere 8 kişi ağır şekilde yaralanmıştır (Kuran ve Polat 2012). Patlama sonrası, patlamamış el bombaları, tank bombaları, mayınlar ve mühimmat parçaları 500 m ilerideki Çiftlik mevkiine kadar saçılmıştır. Yaklaşık 20 km uzaklıktan hissedilen patlama, çevredeki ağaçların yıkılmasına ve yanmasına sebep olmuştur. Askeri tesislerde de önemli hasarın meydana geldiği gözlemlenmiştir. İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü (AFAD) ekiplerince yapılan hasar tespit çalışmalarında Afyon Kışlacık köyü ve Ataköy mahallerinde toplam 240 ev ve 16 aracın hasar gördüğü rapor edilmiştir. Ana hasar nedeninin patlama sonucu oluşan basınç dalgalarının neden olduğu belirtilmiştir (Habername 2023).

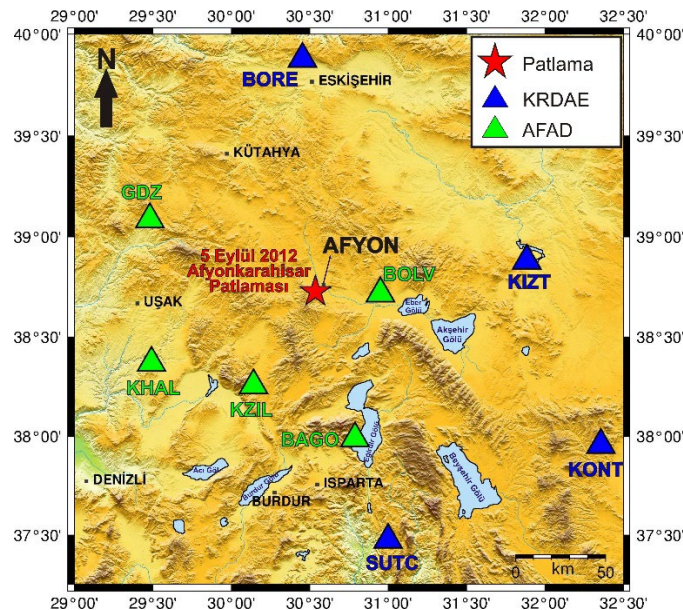


Şekil 1: Afyonkarahisar askeri mühimmat deposu a) Patlama öncesi, b) Patlama sonrası ve c) Patlama anı hemen sonrası görüntüleri (TRTHABER 2023)

Figure 1: Afyonkarahisar military ammunition depot a) Before the explosion b) After the explosion and c) Immediately after the explosion (TRTHABER 2023)

3. BÖLGEDEKİ SİSMİK AĞ VE SİSMİK KAYITLAR

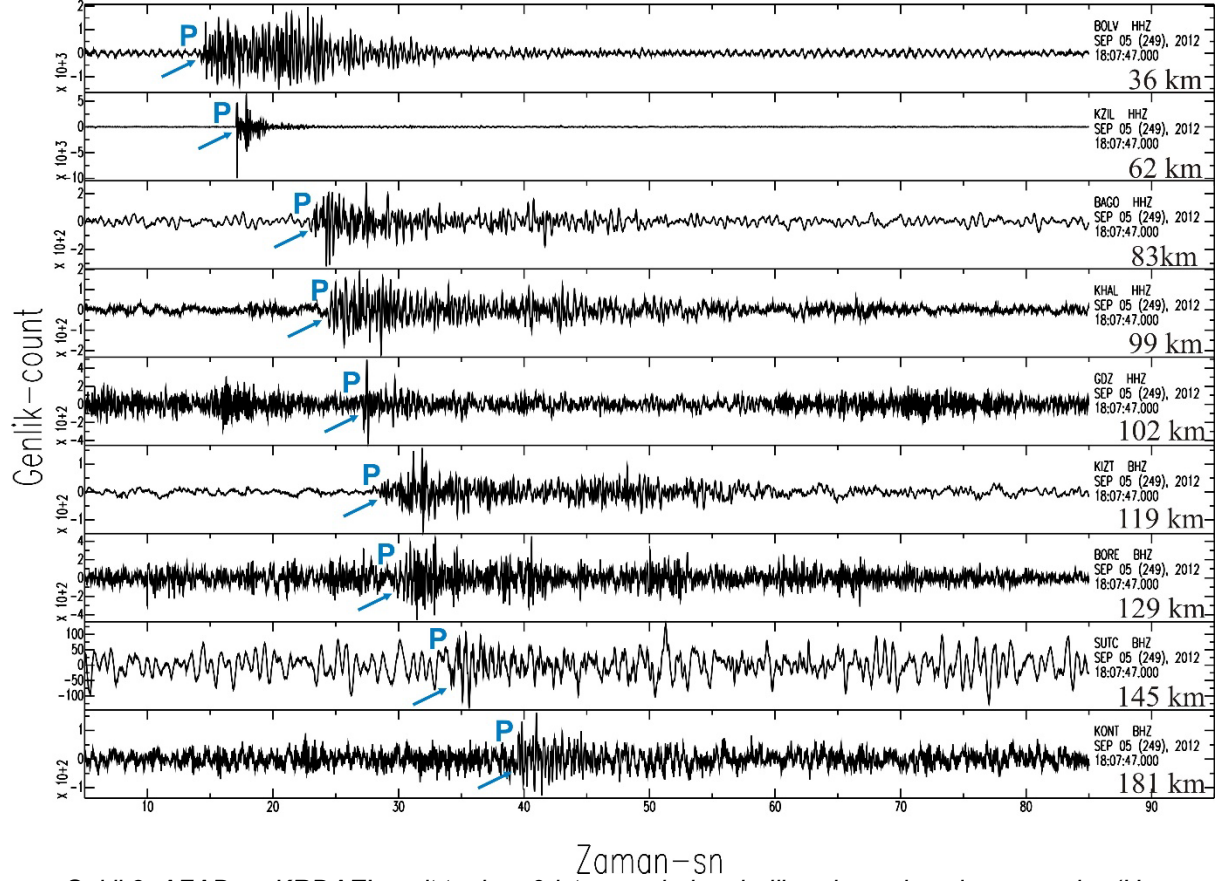
Patlamanın meydana geldiği bölgede iki farklı sismolojik gözlem evinin sismik istasyonları bulunmaktadır. İncelemelerde Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı'na (AFAD-DDB) ve Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü-Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Merkezi'ne (KRDAE-BDTİM) ait sismik istasyonlar kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: Afyonkarahisar patlaması lokasyon haritası (Patlama bölgesine yakın KRDAE ve AFAD'a ait istasyonlar üçgenler ile gösterilmiştir. Kırmızı yıldız patlama noktasını belirtmektedir.)

Figure 2: Afyonkarahisar explosion location map (KOERI and AFAD stations near the explosion site are indicated by triangles. The red star indicates the explosion region.)

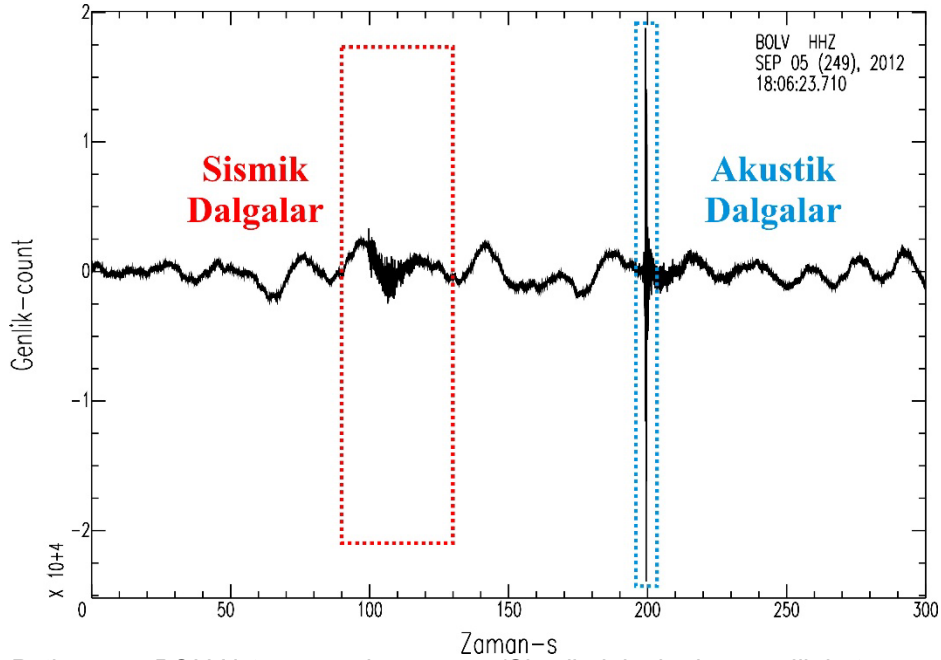
Analizlerde bölgesel sismik ağlar tarafından kaydedilen ve açıkça tanımlanabilen sismik varışlara sahip istasyonlar tercih edilmiştir. Meydana gelen patlamanın oluş yerinden yaklaşık 36 ila 181 km uzaklıktaki 9 adet üç bileşenli geniş bant hızölçer sismik istasyon (zayıf hareket) tarafından kaydedildiği tespit edilmiştir (Şekil 3). Tüm istasyonların örnekleme hızı saniyede 100 örnektir. Patlamalar depremlere kıyasla S dalgasından daha yüksek P dalgası enerjisi üretir (Baumgardt ve Young 1990). Bu nedenle çalışmada hız sismogramlarının düşey (Z) bileşenine odaklanması daha uygun görülmüştür. Mevcut istasyonların tümünde çevresel etkenlerden kaynaklanan gürültüler bulunmaktadır. Bu nedenle sismik fazların seçilebilmesi için 1 Hz-10 Hz aralığında bant geçişli Butterworth filtre uygulanmıştır. Özellikle 100 km'ye kadar uzaklıkta olan istasyonlarda patlamaya ilişkin sismik dalga gelişleri açıkça gözlemlenmektedir.



Şekil 3: AFAD ve KRDAE'ye ait toplam 9 istasyonda kaydedilen düşey hız sismogramları (Her istasyona ait P dalgası gelişleri mavi okla gösterilmiştir. Sismogramlar patlamaya ilişkin dış merkez uzaklıklarına göre çizilmiştir. Sıfır zamanı 21:07:47.0'dir.)

Figure 3: Vertical velocity seismograms recorded at 9 stations of AFAD and KOERI (P-wave arrivals for each station are indicated by the blue arrow. Seismograms are plotted according to the epicentre distances of the explosion. Zero time is 21:07:47.0.)

Güçlü patlamalarda sismogramlarda sismik dalgaların yanı sıra gözlemlenen bir diğer dalga türü de akustik dalgalardır. Tüm istasyonlara ilişkin yapılan incelemelerde bir tek en yakın BOLV istasyonu sismogramında akustik dalga varlığına rastlanmıştır. Patlamaya en yakın istasyon olan BOLV (merkez üssü uzaklığı ~36 km) patlamanın hemen hemen doğusunda yer almaktadır. BOLV istasyonu sismogramında gözlemlenen sismik ve akustik dalgalar Şekil 4'te gösterilmiştir. Sismik ve akustik dalgalara ilişkin detaylı değerlendirmeler ileriki bölümlerde yapılacaktır.



Şekil 4: Patlamanın BOLV istasyonu sismogramı (Sismik dalgalar kırmızı dikdörtgen ve Akustik dalgalar mavi dikdörtgen içinde gösterilmiştir.)

Figure 4: BOLV station seismogram of the explosion (Seismic waves are shown in the red rectangle and Acoustic waves in the blue rectangle.)

4. PATLAMANIN KONUMU, BAŞLANGIÇ ZAMANI VE BÜYÜKLÜĞÜNÜN BELİRLENMESİ

Patlamanın konumu, zamanı ve büyüklüğünü belirlemek için zSacWin EQ Processing bilgisayar yazılımını kullanılmıştır (Yılmaz 2012). Konum, zSacWin EQ içinde bulunan HYPO71 (Lee ve Lahr 1972) algoritması ile tahmin edilmiştir. Yazılım HYPO71 istasyon koordinatlarını, dalga faz okumalarını (P,S) ve depremin süresini kendine giriş (input) parametreleri olarak kullanır. Bu aşamada dalgaların yayılımına ilişkin hesaplamalar için kabuksal hız yapısının belirlenmesi gereklidir. Kabuksal hız modeli için Kalafat ve diğ. (1987) tarafından önerilen model tercih edilmiştir.

Sinyal/Gürültü oranı (S/N) ideal ortamlarda 1 civarındadır. Fakat teorik olarak hesaplanan bu değere, istasyonların konumu nedeniyle ortaya çıkan gürültü ve benzeri etkiler sebebiyle ulaşmak neredeyse imkânsızdır. Bu nedenle sismik istasyonlarda gürültülerin de kaydedilmesi fazların okunmasını zorlaştırabilmektedir. Ayrıca ilgilendiğimiz sismik olay yüzeyde gerçekleşmiş bir patlama olması nedeniyle enerjisinin büyük bir kısmı atmosfere şok dalgası olarak aktarılmıştır. Yani sismogramlarda gözlemlenen sismik dalgaların zayıf olması olağandır. Yukarıda bahsedilen tüm etkenlere rağmen sismogramlardan istasyona ilk gelen varışlar olan P dalgaları açıkça seçilebilmiştir. Patlamaların oluş düzenleri ve yayılım örüntüsü düşünüldüğünde S dalgalarının oluşmadığı söylenebilir. Sadece faz değişikliğine uğrayan dalgalar nedeniyle S dalgaları üretilebilir. Bu yüzden sismogramlarda S dalgalarını seçmek oldukça güçtür. 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması konum belirlemesi için 9 adet hız sismogramından P dalgası fazı ve sadece en yakın BOLV istasyonundan 1 adet S dalga fazı belirlenmiştir. Konum belirlemede kullanılan istasyonların faz okumalarının varış zamanlarını içeren detaylı bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Sismogramlardan belirlenen P ve S dalgalarına ait varış zamanları
 Table 1: Arrival times of P and S waves determined from seismograms

İstasyon	P-okunan (s)	P-hesaplanan (s)	S-okunan (s)	S-hesaplanan (s)
BOLV	1.22	1.17	6.52	6.5
KZIL	4.06	4.54	-	12.32
BAGO	8.56	8.53	-	19.24
KHAL	11.46	10.9	-	23.33
GDZ	11.67	11.46	-	24.3
KIZT	15.21	15.15	-	30.69
BORE	16.52	16.93	-	33.77
SUTC	18.04	18.47	-	36.42
KONT	23.9	23.48	-	45.1

Şu ana kadar yapılan tüm işlemler sismik olayın konumu ve büyüklüğünün belirlenmesi için yapılan hazırlıkları kapsamaktadır. Bu aşamada zSacWin EQ Processing bilgisayar yazılımında "Locate" sekmesi ile patlamaya ilişkin konum ve diğer parametreler belirlenebilir (Tablo 2). Yapılan işlemler sonucu çözümün kalitesini belirleyen RMS (Root Mean Square) değeri 0.33 olarak bulunmuştur. Değer 0'a doğru ne kadar yaklaştıkça yapılan çözümün kalitesi o kadar artar. Bu durum çözümün kalite göstergesi olan harflendirme (C1) ile de belirtilmiştir. Uzaklık hatası olayın konumunun belirtilen uzaklıklar çerçevesinde gerçekleştiğini gösterir. Depremlerin aksine patlamalardaki kolaylık patlamanın nerede gerçekleştiğinin bilinmesidir. 2012 Afyon Mühimmat deposu patlaması 38.7271°K-30.5350°D konumunda gerçekleşmiştir. Bilinen konum ile sismik dalgalar kullanılarak hesaplanan konum (38.6957°K-30.5102°D) arasındaki farkın küçüklüğü çözümün bir diğer kalitesinin göstergesidir. Bu analiz aynı zamanda bize kullandığımız istasyonların ve dolayısıyla sismik ağların güvenilirliğini göstermektedir. Küçük de olsa aradaki fark, özellikle kuzeydoğuda istasyonun bulunmaması (Azimutal Gap=82°) ve verilerin gürültü oranından kaynaklanmaktadır. Bir diğer neden ise kabuksal hız yapısıdır. Her ne kadar güvenilir bir kabuk yapısı tercih edilmiş olsa da genel bir alanı temsil ettiği için karşılaşılan hata miktarı beklenen bir durumdur. Sismik olayın derinliği ise patlamanın yüzeyde gerçekleşmesi nedeniyle 0 olarak beklenir. Ancak bu tür çözümlerde, derinlik genellikle bölgedeki depremlerin ortalama derinliği referans alınarak hesaplandığından, belirli bir hata payı içermesi doğaldır.

Tablo 2: Patlamaya ilişkin konum bilgisi ve diğer parametreler
 Table 2: Explosion location information and other parameters

	Tarih	120905
	Orijin Time (GMT)	18:07:53.87
	Enlem	38.6957°
	Boylam	30.5102°
	Derinlik	8.8 km
	Faz sayısı	10
	GAP (Azimutal Boşluk)	82°
	En yakın istasyon uzaklığı	38.4 km
	RMS hatası	0.33
	ERH (Uzaklık hatası)	1.7 km
	ERZ (Derinlik hatası)	0.5 km
	Çözümün kalitesi	C1

Analizlerle tespit edilen diğer önemli parametre ise patlamanın oluş zamanıdır. Tüm geçmiş arşivlerde patlamanın yerel saat ile 21:15 civarında meydana geldiği belirtilmektedir. Oysaki sismolojik araştırmalarımız ve analizlerimiz sayesinde patlamanın yerel saat ile 21:07:53 (GMT saati ile 18:07:53) civarında meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu tarz olaylarda yaşanan en büyük problem oluş zamanının belirlenmesinde çevrede bulunan kameraların güvenilir olmayan bilgiler vermesidir. Kameralarda yaşanan zaman problemleri oluş zamanının güvenilir olarak belirlenmesinin önüne geçmektedir. Çalışmamızda bu güçlüğün de üstesinden gelerek

güvenilir bir oluş zamanı sunulmaktadır. Bu bilgi adli soruşturmalarda etkin bir şekilde kullanılabilir ve oldukça önemlidir. Patlamanın büyüklüğü için zSacWin EQ Processing bilgisayar yazılımı içinde yerel büyüklük (M_L) hesaplanmıştır. Yerel büyüklük küçük depremlerin büyüklüğünün hesaplanmasına ilişkin daha doğru tahminler sağlamaktadır (Görgün 2003). Bu amaçla Görgün (2003) tarafından Türkiye için türetilen Eşitlik 1 kullanılmıştır.

$$M_L = \log_{10}A + 0.0334\Delta - 1.9236E-4 \Delta^2 + 4.0224 \Delta^3 + 1.265 \quad (\Delta \leq 200) \quad (1)$$

Burada A, mikron cinsinden en büyük genliği; Δ , km cinsinden dışmerkez uzaklığını temsil etmektedir. Yerel büyüklüğün hesaplanması işlemi zSacWin EQ Processing bilgisayar yazılımı tarafından gerçekleştirilmiştir. Yazılım sırasıyla her istasyonun üç bileşenin ilk olarak alet etkisini giderilir ve Wood-Anderson'a dönüştürülür. Verinin integrali alınır, mikron dönüşümü yapılır ve en büyük genlik elde edilir. Eğer üç bileşen sismogram kullanıldıysa her bileşenin ortalaması alınarak yerel büyüklük elde edilir. 2012 Afyon askeri mühimmat deposu patlamasına ilişkin zSacWin EQ Processing bilgisayar yazılımının tahmin ettiği büyüklükler Tablo 3'de verilmiştir. Sonuç olarak patlamanın yerel büyüklüğü 1.4 ± 0.1 olarak elde edilmiştir.

Tablo 3: 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması için her istasyondan hesaplanan yerel büyüklük değerleri

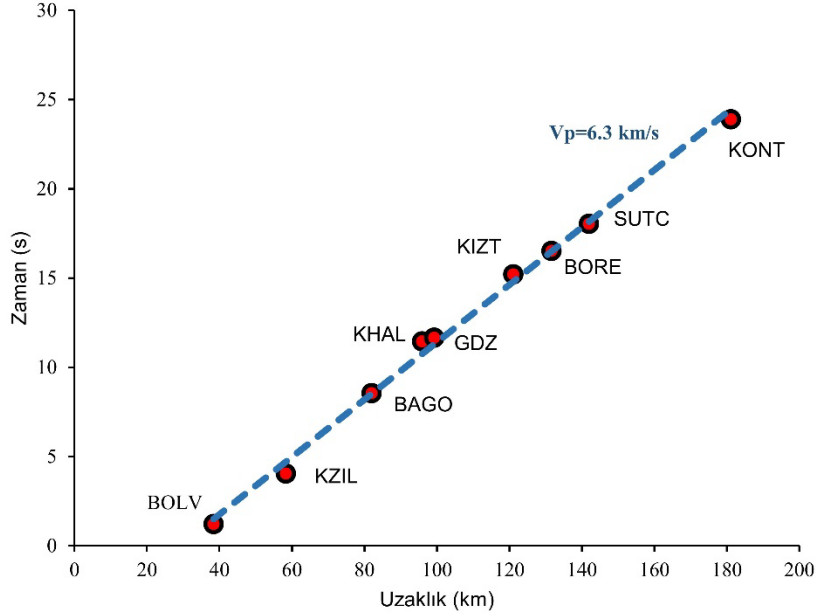
Table 3: Local magnitude values calculated from each station for the 2012 Afyon ammunition depot explosion

İstasyon	M_L -EW	M_L -NS	M_L -Z	Ortalama (ENZ)
BOLV	1.35	1.42	1.43	1.4
KZIL	1.38	1.39	1.35	1.4
BAGO	1.13	1.24	-	1.2
KHAL	1.42	1.51	1.45	1.5
GDZ	1.24	1.25	1.31	1.3
KIZT	1.32	1.29	1.33	1.3
BORE	-	-	1.72	1.7
SUTC	1.39	1.31	1.23	1.3
KONT	1.72	1.6	1.84	1.7

2012 Afyon mühimmat deposu patlaması büyüklüğünün hesaplanması patlamanın boyutunun belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. İleriki bölümlerde patlamanın büyüklüğü ve boyutu arasındaki ilişkiye detaylı bir şekilde değinilecektir.

5. SİSMİK FAZ TANIMLAMA VE AKUSTİK DALGALAR

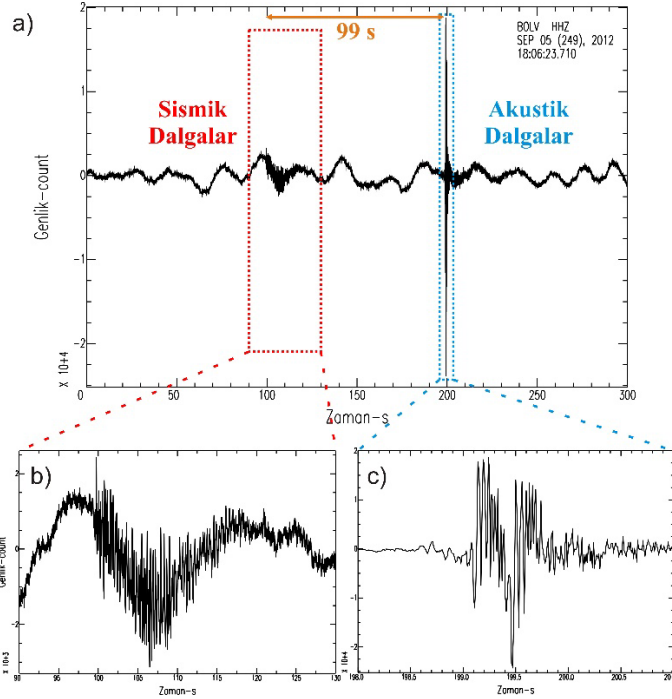
5 Eylül 2012 Afyonkarahisar askeri mühimmat deposu patlaması yer yüzeyi üstünde kurulmuş bir depo içinde gerçekleşmiştir. Bu nedenle de enerji salınımı daha çok atmosferdedir. Depremlere ya da yerin altında gerçekleşen patlamalara göre kıyasla sismik dalga genlikleri düşüktür. Ayrıca patlamanın hemen ardından çok kısa süre içinde başka patlamaların gerçekleşmesi muhtemel olduğundan sismogramlardaki kayıtlar oldukça karmaşıktır. Çoğu örnekte olduğu gibi, ardışık patlamaların ilk patlamanın dalgalarını maskeleyeceği ve bu nedenle dalga fazlarının tanımlanmasının zor olacağı aşikârdır. Bu patlama için kullanılan 9 istasyonda da P dalgası gelişleri net bir şekilde seçilebilmektedir (Şekil 3). Fakat S dalgasını belirlemek oldukça zordur. Her ne kadar zSacWin yazılımı kabuk hızı modeline dayalı olarak S dalgasını hesaplayıp işaretlese de, sismogramların detaylı incelenmesi bunun çok güvenilir olmadığını göstermektedir. Bu nedenle burada sadece P dalga fazlarına odaklanılacaktır. P dalgasının en yakın BOLV istasyonuna varış süresi olayın başlangıç süresinden yaklaşık 1.22 s sonradır. En uzakta bulunan KONT istasyonuna ise 23.9 s'dir. P dalgalarının varış sürelerini kullanarak P dalgasına ait hız belirlenmiştir. Bu doğrultuda her istasyon için P dalga varış süreleri elde edilerek doğrusal regresyon ile dalga hızı tespit edilmiştir. Vp dalga hızı 6.3 km/s olarak tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5: 2012 Afyonkarahisar patlaması için P dalgalarına ait varış süreleri ile merkez üssü mesafeleri (Kırmızı yuvarlaklar her istasyon için varış süresi okumalarını ve mavi kesikli çizgi P dalgaları için doğrusal regresyonların sonuçlarını temsil eder.)

Figure 5: P-wave arrival times and epicenter distances for the 2012 Afyonkarahisar explosion (The red circles represent arrival time readings for each station and the blue dashed line represents the results of linear regressions for P-waves.)

Yüzeyde gerçekleşen patlamalar sismik dalgaların yanı sıra şok dalgaları da üretirler. Şok dalgaları elastik davranış gösteren bir ortamda, patlamalar gibi basınçta ciddi değişimler gösteren olaylar tarafından üretilen çok güçlü basınç dalgalarıdır. Patlamanın meydana geldiği anda oluşan dalga cephesi gerilme, yoğunluk ve ani bir şekilde şiddetli sıcaklık değişimlerinin olduğu bir alandır. Bu nedenle şok dalgaları akustik dalgalardan farklı şekilde yayılır. Şok dalgaları ses dalgasından daha hızlı hareket eder. Şok dalgalarının genlikleri arttıkça hızları da artar. Patlamaların neden olduğu küresel şok dalgalarının şiddeti olayın merkezinden uzaklaştıkça sönümlenerek standart koşullarda 340 m/s olan ses hızına eşit hale gelir. Şok dalgaları enerjisinin bir kısmını bulunduğu ortamı ısıtmak için harcadığından yoğunluğu akustik dalgalara göre daha hızlı azalır. Bu nedenle patlama ilk gerçekleştiğinde muazzam bir ısı açığa çıkar. Güçlü bir patlama sonrası oluşan şok dalgalarının genliği mesafenin ters karesi ile orantılı ve akustik dalga yasalarına uyacak şekilde zayıflar (Settles 2006). Akustik dalga şekilleri sismogramlarda sismik dalgalara göre daha keskin, ani bir başlangıca ve kısa bir süreye sahiptir (Koper ve diğ. 2002). Akustik dalgaların genliği kaynağın gücüne, atenüasyona ve ortamdaki saçılmaya bağlı iken hızları ise atmosferdeki rüzgâr ve sıcaklık ile ilişkilidir (Settles 2006, Evers ve diğ. 2007, Schneider ve diğ. 2018, Budakoğlu 2022). 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasında yüksek basınçlı, dik ve ani bir şok dalga cephesi oluşmuştur. Daha sonra kaynaktan uzaklaştıkça bu şok dalgalarının hızları düşer ve ses hızına benzer hıza sahip bir akustik dalga cephesi gibi davranırlar. Bu hızlı dönüşüm sismogramlarda sadece BOLV istasyonunda rastlanmıştır. BOLV istasyonunda gözlemlenen sismik ve akustik dalgalar Şekil 6'da gösterilmiştir. 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması sonucu oluşan şok dalgası, kaynak civarında aşırı yüksek basınç ve akabindeki ısı nedeniyle büyük tahribat yaratmıştır. Şok dalga cephesi kaynaktan uzaklaştıkça basıncı azalarak akustik dalga formunda BOLV istasyonunda kaydedilmiştir.



Şekil 6: a) Patlamanın BOLV istasyonu sismogramı b) Patlamaya ilişkin sismik dalgalar ve c) Akustik dalgalar

Figure 6: a) BOLV station seismogram of the explosion b) Seismic waves of the explosion and c) Acoustic waves

BOLV istasyonu düşey bileşeni için sismik dalgalar (P dalgası) yaklaşık 18:08:04'de ve akustik dalgalar ise 18:09:43'de varmaktadır. Bu iki dalga arasında yaklaşık 99 s bulunmaktadır. BOLV istasyonu dışında başka istasyonda akustik dalga gözlemlenemediği için varış zamanlarına karşılık istasyon uzaklıklarını çizip dalga hızı belirlenmemiştir. Fakat BOLV istasyonu temel alınarak ortalama bir hız verilecek olursa dalganın kat ettiği mesafe varış süresine bölünerek Akustik dalga hızı ~ 356 m/s olarak verilebilir. Patlamanın gerçekleştiği saatte hava yaklaşık 21° ve rüzgar 3.60 km/sa ile güneybatı yönünden esmektedir. Akustik dalga hızları kaynak bölgesi ile istasyonların bulunduğu konumdaki rüzgâr hızı ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Bir başka etki de kaynak ile alıcı arasında dalganın maruz kaldığı kırılma ve bazen de yansımalarıdır. Ayrıca dalganın yayıldığı atmosferin anizotropik olması da hızı etkileyen önemli koşullardan biridir. Bu nedenle, elde edilen akustik dalga hızının ortalama bir değer olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

6. PATLAMAYA İLİŞKİN VERİM (YIELD) TAHMİNİ

Bir patlama meydana geldiğinde özellikle adli soruşturmalarda açısından infilak eden madde miktarının ne kadar olduğu depolamadaki sınırların aşıp aşılmadığının tespiti açısından oldukça önemlidir. Bu aşamada patlamaya sebep olan patlayıcının içeriği (ANFO, IMI, PE4, PETN, TNT vb.) gereklidir. Patlayıcı madde bilirse infilak eden madde miktarı deneysel bağıntılarla elde edilebilir. Farklı türde parametreler kullanılarak infilak eden madde miktarı tespit edilebilir. Bu çalışma özelinde 2012 Afyon mühimmat depo patlaması için krater boyutları, sismik dalgalar kullanılarak hesaplanan büyüklük-verim tahmini ve son olarak da akustik dalgalardan elde edilen ikincil şok dalga parametresi gibi üç farklı yöntem kullanılarak verim tahmini yapılmaya çalışılmıştır.

İlk olarak verim tahmini için patlama sonrası oluşan kraterin boyutlarına göre (derinlik ve çap) yapılan hesap yöntemidir (Ambrosini ve Luccioni 2007, Gitterman ve Hofstetter 2014). Bu amaçla Kinney ve Graham (1985) tarafından sunulan patlamanın yer yüzeyinin hemen üstünde gerçekleştiği kabulü olan Eşitlik 2 kullanılmıştır.

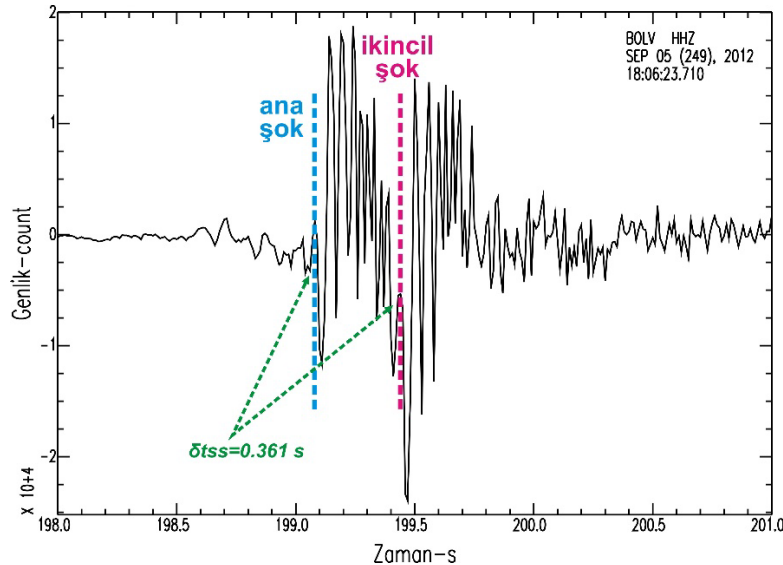
$$D(m) = 4.2W^{1/3} \quad (2)$$

Burada W ton cinsinden TNT eşdeğeridir; D patlama sırasında oluşan kraterin çapıdır. 2012 Afyon mühimmat deposu bilirkışı raporlarına göre depo için herhangi bir krater oluşmamıştır. Sadece cephaneliğin sağ ön giriş kesiminde 3 metre çaplı bir krater bulunmaktadır. Bu kraterin de küçük bir başka patlamadan kaynaklandığı belirtilmiştir. Eldeki verilere göre krater çapından bir hesap yapılacak olursak 0.89 ton patlayıcının infilak ettiği bulunmuştur. Bu değer büyük patlamaya ilişkin bir krater bilgisi olmaması nedeniyle eksik ve gerçek olandan oldukça düşük bir değerdir.

Patlayan madde miktarının tahminine yönelik kullanılan bir diğer yöntem ise ikincil şok dalgası yöntemidir. Detaylarıyla bir önceki bölümde bahsedildiği üzere güçlü patlamalar ardından şok dalgaları oluşurlar. Bu şok dalgasının ardından kırılan dalgaların, patlayıcı madde ile hava arasındaki temas yüzeyi nedeniyle patlamanın merkezine doğru hareket etmesi ve toprakla temas ettikten sonra tekrar dışarıya yansımalarıyla ikincil bir şok dalgası meydana gelir. Bazı durumlarda üçüncül dalgalar da gözlemlenebilir. İkincil şok dalgası gecikmesi kullanılarak patlayıcıların verimi belirlenebilmektedir (Gitterman 2013, Gitterman ve Hofstetter 2014). Rigby ve Gitterman (2016) tarafından verilen Eşitlik 3 kullanılarak 2012 Afyon patlamasının ikincil şok dalgası ile patlayıcının kütlesi tespit edilebilir.

$$W = (\delta t_{ss} V_{od} / (\rho^{1/3} (2.45 \log_{10}(R/W_1) + 1.36)))^3 \quad (3)$$

Burada δt_{ss} , ikincil şok dalgası gecikme süresi (s); W patlayıcı maddenin ağırlığıdır (kg); R , mesafe (m/kg^{1/3}); V_{od} , patlama hızı (m/s) ve ρ patlayıcının yoğunluğudur (kg/m³). Bu denklem sayesinde patlayıcının kütlesi, belirli bir mesafede kaydedilen ikincil şok dalgası gecikmesi kullanılarak hesaplanabilmektedir. 2012 Afyon patlaması patlayan maddenin kütle hesabı için ilk olarak denklemlerde bilinmeyenlerin elde edilmesi gerekir. δt_{ss} için BOLV istasyonu sismogram kaydı kullanılacaktır. Çünkü ana ve ikincil şok dalgası sadece BOLV istasyonuna kaydedilmiştir. Şekil 7'de BOLV istasyonu sismogram kaydı verilmiştir. İstasyona ait düşey bileşen sismogramından δt_{ss} değeri 0.361 s olarak okunmuştur.



Şekil 7: 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması için ana şok ve ikincil şok dalgasının BOLV istasyonunda kaydedilen düşey bileşen sismogramı (δt_{ss} , ikincil şok dalgası gecikme süresini temsil eder.)

Figure 7: 2012 Afyon ammunition depot explosion vertical component seismogram of the main shock and secondary shock wave recorded at BOLV station (δt_{ss} represents the secondary shock wave delay time.)

R , istasyonun kaynak bölgesine olan uzaklığıdır ve bu patlama için 36 000 m'dir. V_{od} değeri patlama hızını (m/s) temsil eder. Bilirkişi raporlarında "PETN" yani plastik patlayıcı kimyasalı tespit edilmiştir (TBMM 2013). Bu patlayıcı maddenin V_{od} değeri 8300 (m/s) ve ρ patlayıcının yoğunluğu 1.77 (kg/m³)'tür. Rigby ve Gitterman (2016) tahminler ile deneyler arasında %2'lik bir sapma olduğunu belirtmişlerdir. Eşitlik 3'te tüm bilinmeyenler yerine koyulduğunda yaklaşık 20 880 kg ~ (21 ton) \pm %2 bir maddenin infilak ettiği tespit edilmiştir. Bu değer patlamada infilak eden madde ağırlığının ton cinsinden ifadesidir.

Bir diğer yöntem ise patlamanın büyüklüğü kullanılarak yapılan tahmindir (Bowers ve diğ. 2001, Zhao ve diğ. 2016, Budakoğlu 2022). Bu yöntemde Bowers ve diğ. (2001) tarafından bu olaya benzer koşulda türetilmiş cisim dalgası büyüklüğü (m_b) ile patlayıcı madde miktarı arasındaki ilişkiyi veren deneysel Eşitlik 4 kullanılmıştır. Önceki bölümlerde 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması olayına ait büyük $M_L=1.4$ olarak bulunmuştur. Bu nedenle M_L 'nin m_b 'ye dönüştürülmesi için Eşitlik 5 tercih edilmiştir (Ambraseys 1990) ve olayın büyüklüğü $m_b = 2.1$ olarak bulunmuştur.

$$m_b = 4.25 + \beta \log_{10} W \quad (4)$$

$$m_b = (0.73 + 0.64 M_L) / 0.77 \quad (5)$$

$\beta=1$ olarak kabul edildiğinde (Zhao ve diğ. 2016) infilak eden patlayıcı miktarı 7.1 t olarak tahmin edilmiştir. Bu değer ton cinsinden TNT eşdeğer miktarı belirtmektedir. Bu tarz patlamalarda enerjinin küçük bir kısmı sismik enerji olarak yer içinde yayıldığından olayın büyüklüğüne ilişkin yapılan patlayıcı madde miktarı tahminlerinin en düşük miktarı vereceği göz önünde bulundurulmalıdır.

2012 Afyon mühimmat deposu patlamasında infilak eden madde miktarları üç farklı yöntem ile tespit edilmiştir (Tablo 4). Tüm yöntemler patlama ile ilgili farklı kıstasları temel alarak tahmin yapmıştır. Bu nedenle her yöntemin güçlü ve zayıf yönleri mevcuttur. Krater çapına dayalı tahminlerde, olayın hemen ardından arama ve kurtarma faaliyetleri esnasında patlama sonrası oluşan kraterler tahrip edilmektedir. Bu durum yöntemin hassasiyetini oldukça düşürmektedir. Ayrıca bu yöntemin %40 mertebesine varan bir sapma yüzdesi bulunmaktadır (Bull ve Woodford 1998). Yukarıda değinildiği üzere 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasında depo içinde bir krater bilgisi rapor edilmemiştir. Depo dışında rapor edilen küçük krater ile yapılan tahmin hesabı gerçekten çok uzaktır. Sismik dalgalardan hesaplanan olayın büyüklüğüne ilişkin temel alınarak yapılan tahmin ise patlamaya ilişkin sadece alt sınırı temsil etmektedir. Enerji transferinin büyük çoğunlukla atmosfere şok dalgaları ile gerçekleştiği düşünüldüğünde bu yöntem ile yapılan tahmin büyük oranda eksik kalmaktadır. İkincil şok dalga gecikme süresi kullanılarak verim tahmin etmek için infilak eden maddeye ait patlama hızı ve bileşik yoğunluğu, ölçeklendirilmiş mesafe ve sismogramlardan net okunabilen gecikme süreleri gibi detaylı parametreler kullanılır. Bu diğer yöntemlere nazaran hassasiyeti arttırmaktadır. Yöntemde ana ve ikincil şok; rüzgâr hızı ve yönü, sıcaklık, yükseklik gibi aynı etkenlere maruz kaldığından, atmosferik koşulların durağan kabul edilebilmesi yöntemin avantajıdır. Ayrıca diğer iki yöntemle kıyasla çok daha az bir hata miktarı (%2) içermektedir. Tüm bu koşullar değerlendirildiğinde verim tahmini için ikincil şok dalgası gecikme süresi ile yapılan tahminin 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması için gerçeğe daha yakın ve daha hassas değerler ortaya koyduğu düşünülmektedir.

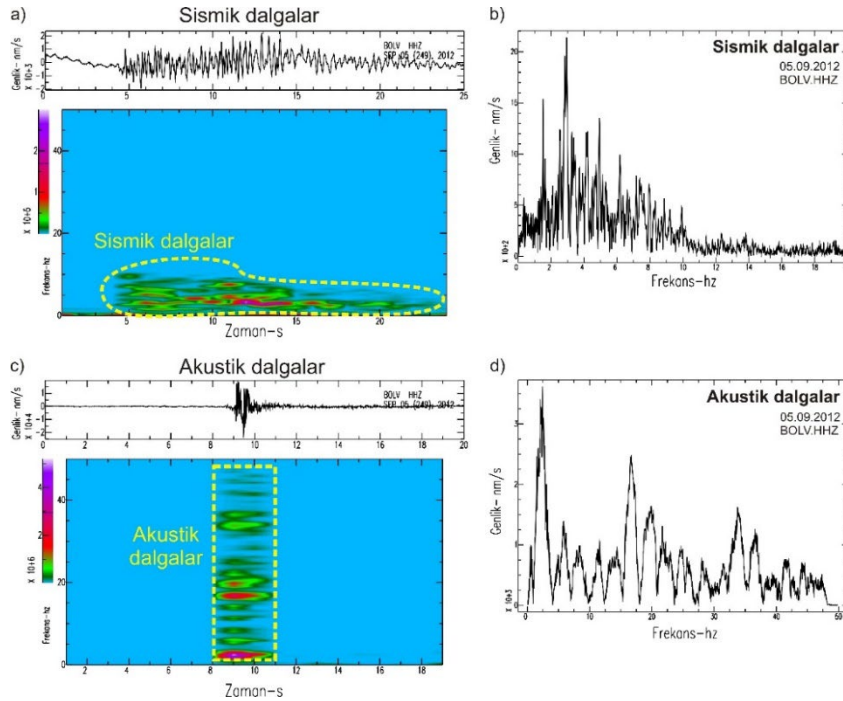
Tablo 4: Farklı yöntemler kullanılarak 2012 Afyon patlamasının hesaplanan tahmini verim değerleri
Table 4: Estimated yields of the 2012 Afyon explosion using different methods

Yöntem	2012 Afyon mühimmat deposu patlaması	
	TNT eşdeğer madde miktarı (t)	Patlayıcı madde ağırlığı (t)
Krater çapı (D)	0.9	-
İkincil şok dalgası gecikme süresi (δ_{tss})	-	21
Olay Büyüklüğü (m_b)	7.1	-

7. FREKANS ORTAM ANALİZLERİ

Sismik olaylara ilişkin dalga şekillerinin frekans ortamında incelenmesi spektral içeriklerin zamanla nasıl değiştiğini ortaya koymakta oldukça etkindir. Özellikle ardışık patlamaların söz konusu olduğu olaylarda zaman ortamında dalgalar birbirlerini maskeleyiği için frekans ortamında faydalı bilgiler sağlarlar. Aynı zamanda sismik olayların karakteristiklerinin birbirinden ayrılması veya sınıflandırılması için de frekans özelliklerinden faydalanılmaktadır (Gitterman ve diğ. 1998, Kristekova ve diğ. 2008, Horasan ve diğ. 2009, Ataeva ve diğ. 2017, Budakoğlu ve Horasan 2018, Yavuz ve diğ. 2019, Budakoğlu 2022). Sismik dalgalar, yerin doğası gereği zayıflama ve saçılma özelliklerinden dolayı düşük frekanslarda daha iyi yayılırlar. Akustik sinyaller ise daha duranıdır ve daha yüksek frekanslarda gözlemlenirler. Ayrıca sismik sinyaller yol etkilerinden dolayı bozulmaya daha fazla maruz kalırlar. Akustik sinyaller atmosferde nispeten daha az bozucu etkenle karşılaşılırlar. Sismik dalgaların aldıkları yol oldukça değişken ve karakterize edilmesi zordur. Akustik dalgalar spektrogramlarda yüksek frekanslarda spektral taraklanma (spectral scalloping - deniz kabuğuna benzer) gibi bir görünüm sergileyebilirler. Ayrıca bu görünüm sismik dalgalarda milisaniye mertebesinde gerçekleşen ardışık (gecikmeli) patlamalarda da gözlemlenmektedir (Leach ve Dowla 1995).

Bu çalışmada genliğin frekans ile nasıl değiştiğini sergilemek için Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ve sinyal gücündeki değişimin farklı frekanslarda zamanın fonksiyonu olarak nasıl değiştiğini gözlemlemek için ise patlamaya ilişkin spektrogramlar elde edilmiştir (Lacoss 1971, Hedlin ve diğ. 1989). Sismik ve akustik dalgaların birlikte gözlemlendiği BOLV istasyonuna ait spektrogramlar ve genlik spektrumları Şekil 8'de verilmiştir.

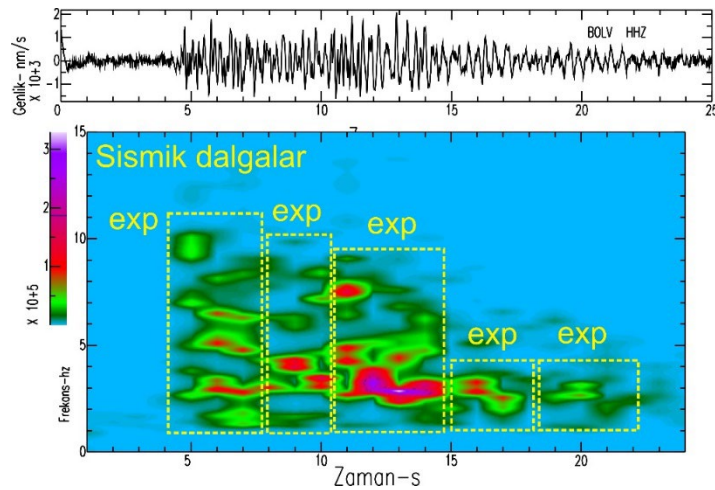


Şekil 8: 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasının a) sismik dalga spektrogramı, b) genlik spektrumu, c) Akustik dalga spektrogramı, d) genlik spektrumu (Spektrogramlar, dalga formlarının düşey bileşeni kullanılarak hesaplanmıştır. Yüksek enerjili içerik mor, kırmızı ve yeşil renklerle, düşük enerjili içerik ise koyu yeşil ve turkuaz renklerle temsil edilir. Çizimlerde patlama bölgesine en yakın istasyon olan BOLV kullanılmıştır.)

Figure 8: 2012 Afyon ammunition depot explosion a) seismic wave spectrogram, b) amplitude spectrum, c) Acoustic wave spectrogram, d) amplitude spectrum (Spectrograms were calculated using the vertical component of the waveforms. The high-energy content is represented by purple, red and green colors, while the low-energy content is represented by dark green and turquoise colors. BOLV, the station closest to the explosion site, was used for the plots.)

Patlama bölgesine en yakın olan BOLV istasyonu sismik dalgalarına ait spektrogram incelendiğinde (Şekil 8a) yaklaşık 5 ile 10 Hz arasında uzanan bir P dalgası gelişi gözlemlenmektedir. P dalgası gelişinden yaklaşık 7-8 s sonra (10 ile 15 s arasında) 5 Hz civarında kuvvetli enerji gelişi mevcuttur. Akustik dalga spektrogramı her ne kadar 2-3 Hz civarında güçlü bir enerji sergilese de bunun çevresel gürültü kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Akustik dalgalar yüksek genliğe ve yüksek frekanslara sahiptir (~20-45 Hz aralığında). 20 Hz civarında güçlü enerji karakteristiği sergilerler (Şekil 8c). Spektrogramda deniz kabuğu benzeri spektral taraklanmalar (scalloping) dikkati çekmektedir. 2012 Afyon mühimmat depo patlama spektrogramları sismik dalga enerjisinin yaklaşık 4-6 Hz civarında yoğunlaştığını ve 10 Hz'e kadar uzandığını göstermektedir. Öte yandan akustik dalgalar, 20 Hz'de güçlü olan ve 45 Hz'e kadar uzanan yüksek frekanslı bir içerik sergilemektedir. Patlamaya ilişkin dalga şekillerinin genliğin frekansla nasıl değiştiği Şekil 8b ve 8d'de gösterilmektedir. Yüksek genlikler düşük frekanslarda yaklaşık 3 Hz civarında yoğunlaşır. Yüksek frekanslardaki tepe noktaları akustik dalgalardan (20 Hz) kaynaklanır. Ayrıca patlamanın genlik spektrumunda modülasyon gözlenmiştir. Bu, ilave patlamalardan kaynaklanan katkıları yansıtılabileceğini akla getirmektedir.

Kristekova ve diğ. (2008) çalışmalarında akustik ve sismik dalgaların enerji maksimumlarının patlayıcı kaynağı ve süreci hakkında bilgi verebileceğini belirtmişlerdir. Şekil 9'da yaklaşık 5 s civarında P dalgası gelişi gözlemlense de asıl güçlü patlamanın 10-15 s arasında (~5 s sonra) meydana geldiği gözüküyor. Bu sismogramlarda gözlemlenen kuvvetli akustik dalganın kaynağı olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Sismik dalga spektrogramı patlamanın ilk olarak daha küçük bir patlama ile başladığı daha sonra parlama şeklinde alevin depodaki diğer mühimmatlara ulaştığı ve güçlü bir patlama gerçekleştiği şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca sismik dalga spektrogramı patlamanın sadece tek bir patlama ile değil çok kısa sürede gerçekleşen ardışık patlamalar şeklinde gerçekleştiğini önermektedir. Leach ve Dowla (1995)'nin önerdiği spektral taraklanma (scalloping) ve sismik dalga genlik spektrumları da sergiledikleri modülasyon ile bunu desteklemektedir. Şekil 9'da BOLV istasyonu sismik dalgalarına ait spektrogram frekans eksenini detaylı çizilerek olası diğer patlamalar işaretlemiştir.



Şekil 9: 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasının sismik dalga sismogramı ve bunlara karşılık gelen spektrogram (Spektrogram, dalga formlarının düşey bileşeni kullanılarak hesaplanmıştır. Yüksek enerjili içerik mor, kırmızı ve yeşil renklerle, düşük enerjili içerik ise koyu yeşil ve turkuaz renklerle temsil edilir. Olası ardışık patlamalar sarı kesikli dikdörtgenlerle ve exp kısaltması ile gösterilmiştir.)

Figure 9: 2012 Afyon ammunition depot explosion seismic wave seismogram and corresponding spectrogram (The spectrogram was calculated using the vertical component of the waveforms. The high-energy content is represented by purple, red and green colors, while the low-energy content is represented by dark green and turquoise colors. Possible consecutive explosions are indicated by yellow dashed rectangles and the abbreviation exp.)

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada 5 Eylül 2012 tarihinde Afyonkarahisar'daki 500. İstihkâm Ana Depo Komutanlığı Şehit Uzman Çavuş Mete Saraç Kışlası'nda bulunan 32 nolu mühimmat deposunda el bombalarının tasnif edilmesi esnasında meydana gelen patlamanın sismik ve akustik dalga kayıtları zaman ve frekans ortamında incelenmiştir. AFAD-DDB ve KRDAE-BDTİM sismik ağlarından elde edilen toplam 9 istasyona ait sismogramlar analiz edilmiştir. Patlamanın başlangıç zamanı 18:07:53.87 (UTC) olarak belirlenirken, konumu kabul edilebilir bir hata oranı ile 38.6957°K-30.5102°D olarak tespit edilmiştir. Patlamanın yerel büyüklüğünü belirlemek amacıyla üç bileşenli dalga formu istasyonları kullanılmıştır. Bu doğrultuda $M_L=1.4$ olarak tespit edilmiştir.

Tüm istasyonlardan okunan P dalgası varışları kullanılarak P dalgasına ilişkin kabuksal dalga hızları 6.3 km/s olarak hesaplanmıştır. Patlamada infilak eden madde miktarını tespit edebilmek amacıyla farklı kıstaslara dayalı tahmin yapabilen üç farklı metot tercih edilmiştir. Krater çapına dayalı tahmin yönteminde patlama esnasında oluşan kraterin bir bilgi bulunmaması nedeniyle bu yöntem güvenilirlikten uzaktır. Patlamanın büyüklüğü olan m_b kullanılarak yapılan tahmin metodunda ise olayın enerjisinin büyük bir kısmı şok dalgası ile atmosfere yayıldığından bir alt sınırı temsil ettiği kanaatine varılmıştır. İkincil şok dalgası gecikme süresi temel alınarak yapılan verim tahmini ise nispeten düşük hata tahmin değeri, patlayıcı maddenin kimyasına bağımlılığı ve patlamanın yük boyutunu belirlemedeki üstünlüğü dikkate alındığında diğer iki yöntemle göre daha güvenilirdir. Bu doğrultuda 2012 Afyon patlamasında infilak eden mühimmat miktarı 21 ton olarak tahmin edilmiştir.

Frekans ortamında yapılan incelemelerde sismik dalgalar 3 Hz civarında baskın ve akustik dalgalar ise 20 Hz civarında baskındır. Spektrogramlarda sismik dalgalar 5-10 Hz arasında güçlü bir geliş sergilemişlerdir. Ayrıca BOLDV istasyonuna ait sismik dalga spektrogramları incelenerek olası ardışık patlamalar belirlenmiştir.

Türkiye tektonik aktivite açısından oldukça aktif bir bölge olması nedeniyle farklı gözlem evlerine ait çok sayıda istasyon ile izlenmektedir. Bu sayede patlama gibi adli araştırmalara konu olan olaylara ilişkin detay bilgilere bu sismik istasyonların kayıtları incelenerek ulaşılabilir. Güçlü patlamalar sonrası arama kurtarma çalışmaları ile yaşanan kaostan etkilenmeden oluş zamanı, büyüklüğü, infilak eden madde miktarı gibi çok sayıda bilgiye hızlıca ulaşılabilir. Elde edilen güvenilir bilgiler ışığında kriz yönetimi, acil durum planlaması ve idari soruşturmalara fayda sağlanabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İrem ÖZKAVAF'ın Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim dalında gerçekleştirdiği Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir. Yazarlar çalışmada kullanılan veriler için Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı'na (AFAD-DDB) ve Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü-Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Merkezi (KRDAE-BDTİM) teşekkür ederler. Sismik dalga şekilleri analizlerinde SAC2000 (Goldstein ve diğ. 2003) ve bazı şekillerin çiziminde ise GMT (Generic Mapping Tools) (Wessel ve Smith 1998) ve sismolojik analizlerde zSacWin EQ (Yılmaz 2012) kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

Ambraseys N.N., 1990. Uniform magnitude re-evaluation of European earthquakes associated with strong-motion records, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 19(1), 1-20.

Ambrosini D., Luccioni B., 2007. Craters produced by explosions above the soil surface, *Mecánica Computacional*, 23, 2253-2266.

Ataeva G., Gitterman Y., Shapira A., 2017. The ratio between corner frequencies of source spectra of P-and S-waves—a new discriminant between earthquakes and quarry blasts, *Journal of Seismology*, 21, 209-220, <https://doi.org/10.1007/s10950-016-9598-0>.

Baumgardt D.R., Young G.B., 1990. Regional seismic waveform discriminants and case-based event identification using regional arrays, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(6B), 1874-1892.

Bowers D., Marshall P.D., Douglas A., 2001. The level of deterrence provided by data from the SPITS seismometer array to possible violations of the Comprehensive Test Ban in the Novaya Zemlya region, *Geophysical Journal International*, 146, 425-438. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.01462.x>.

Bowers D., Selby N.D., 2009. Forensic seismology and the comprehensive nuclear-test-ban treaty, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 209-236.

Budakoğlu E., Horasan G., 2018. Classification of seismic events using linear discriminant function (LDF) in the Sakarya region, Turkey, *Acta Geophysica*, 66, 895-906. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0179-1>.

Budakoğlu E., 2022. Seismological investigations of fireworks factory explosions in Hendek-Sakarya (Turkey), *Journal of Seismology*, 26(2), 283-299, <https://doi.org/10.1007/s10950-022-10082-z>.

Bull J.W., Woodford C.H., 1998. Camouflages and their effect on runway support, *Computers & structures*, 69(6), 695-706, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00135-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00135-7).

Evers L.G., Ceranna L., Haak H.W., Le Pichon A., Whitaker R.W., 2007. A seismoacoustic analysis of the gas-pipeline explosion near Ghislenghien in Belgium, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97:417–425, <https://doi.org/10.1785/0120060061>.

Gitterman Y., 2013. Secondary shock features for large surface explosions: results from the Sayarim Military Range, Israel and other experiments, *Shock Waves*, 24, 267-282. <https://doi.org/10.1007/s00193-013-0487-y>.

Gitterman Y., Hofstetter R., 2014. GT0 explosion sources for IMS infrasound calibration: Charge design and yield estimation from near-source observations, *Pure and Applied Geophysics*, 171, 599-619, <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0575-4>.

Gitterman Y., Pinky V., Shapira, A., 1998. Spectral classification methods in monitoring small local events by the Israel seismic network, *Journal of Seismology*, 2:237-256.

Goldstein P., Dodge D., Firpo M., Miner L., 2003. SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers. In: Lee WHK, Kanamori H, Jennings PC, Kisslinger C (eds) International handbook of earthquake and engineering seismology. Elsevier, New York, pp 1613-1614.

Görgün E., 2003. Calibration of various magnitude scales in Turkey using broadband data. M.Sc. Thesis, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, B.U., 66 pp.

Hedlin M.A., Minster J.B., Orcutt J.A., 1989. The time-frequency characteristics of quarry blasts and calibration explosions recorded in Kazakhstan, USSR, *Geophysical Journal International*, 99, 109-121, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1989.tb02019.x>.

Hinzen K.G., Krummel H., Weber B., Fleischer C., 2022. Forensic view on two Raspberry Shake burglargrams, *Journal of Seismology*, 26(5), 863-873.

Horasan G., Güney A.B., Küsmezer A., Bekler F., Öğütçü Z., Musaoğlu N., 2009. Contamination of seismicity catalogs by quarry blasts: an example from Istanbul and its vicinity, northwestern Turkey, *Journal of Asian Earth Sciences*, 34, 90-99.

<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.03.012> .

Habername, 2023. İşte rakamlarla Afyon patlaması!, Erişim adresi: <https://www.habername.com/haber-iste-rakamlarla-afyon-patlamasi-80256.htm>.

Kalafat D., Gürbüz C., Üçer B., 1987. Batı Türkiye’de Kabuk ve Üst Manto Yapısının Araştırılması, *Deprem Araştırma Bülteni*, 59, 43-64.

Kim W.Y., Richards P.G., 2007. North Korean nuclear test: Seismic discrimination low yield, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 88(14), 158-161.

Kim W.Y., Sykes L.R., Armitage J.H., Xie J.K., Jacob K.H., Richards P.G., West M., Waldhauser F., Armbruster J., Seeber L., Du W.X., Lerner-Lam A., 2001. Seismic waves generated by aircraft impacts and building collapses at World Trade Center, New York City. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(47), 565-571, <https://doi.org/10.1029/01EO00330>.

Kinney G.F., Graham K.J., 1985. Explosions, Explosive Shocks in Air, 1-17.

Koper K.D., Wallace T.C., Reinke R.E., Leverette J.A., 2002. Empirical scaling laws for truck bomb explosions based on seismic and acoustic data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 527–542, <https://doi.org/10.1785/0120000242> .

Koper K.D., Wallace T.C., Hollnack D., 1999. Seismic analysis of the 7 August 1998 truck-bomb blast at the American embassy in Nairobi, Kenya, *Seismological Research Letters*, 70(5), 512-521.

Kristekova M., Moczo P., Labak P., Cipciar A., Fojtikova L., Madaras J., Kristek J., 2008. Time-frequency analysis of explosions in the ammunition factory in Novaky, Slovakia, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98, 2507-2516, <https://doi.org/10.1785/0120080048> .

Kuran F., Polat S., 2012. 5 Eylül 2012 Afyonkarahisar Mühimmat Deposu Patlamasının Sismik Kayıtlar Kullanılarak İrdelenmesi, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 14-16 Ekim 2015, DEÜ, İzmir, Erişim adresi: https://www.tdmd.org.tr/pdf/pdf2015/TDMSK_047.pdf.

Lacoss R.T., 1971. Data Adaptive Spectral Analysis Methods, *Geophysics* ,36, 661-675.

Leach Jr., R.R., Dowla F.U., 1995. Towards data fusion in seismic monitoring: Source characterization of mining blasts with acoustic and seismic records, United States, <https://doi.org/10.2172/171276> .

Lee W.H.K., Lahr J.C., 1972. HYPO71: a computer program for determining hypocenter, magnitude and first-motion pattern of local earthquakes, U.S. Geological Survey Open-file Report, 75-311, <https://doi.org/10.3133/ofr75311> .

McCormack D.A., 2003. Using seismic data in air crash investigations, CTBTO Spectrum, Erişim adresi: https://www.ctbto.org/sites/default/files/2022-08/010803_issue2_spectrum_internet.pdf.

Rigby S.E., Gitterman Y., 2016. Secondary shock delay measurements from explosive trials. In: Proceedings of the 24th international symposium on military aspects of blast and shock (MABS24), Halifax, Nova Scotia, Canada, Erişim adresi: <https://eprints.whiterose.ac.uk/105006/>.

Schneider F.M., Fuchs F., Kolínský P., Caffagni E., Serafin S., Dorninger M., Bokelmann G., AlpArray Working Group., 2018. Seismo-acoustic signals of the Baumgarten (Austria) gas explosion detected by the AlpArray seismic network, *Earth and Planetary Science Letters*, 502, 104-114, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.08.034> .

Settles G.S., 2006. High-speed imaging of shock waves, explosions and gunshots: new digital video technology, combined with some classic imaging techniques, reveals shock waves as never before, *American Scientist*, 94(1), 22-31.

TBMM, 2013. Türkiye Büyük Millet Meclisi Tutanak Dergisi, Erişim adresi: <https://www5.tbmm.gov.tr/tutanak/donem24/yil4/ham/b00801h.htm>.

TRTHABER, 2023. Afyonkarahisar'dan Kara Haber: 25 Şehit, Erişim adresi: <https://www.trthaber.com/haber/gundem/afyonkarahisardan-kara-haber-25-sehit-54631.html>.

Wessel P., Smith W.H.F., 1998. New, improved version of the generic mapping tools released, *EOS Trans AGU*, 79, 579.

Yavuz E., Sertçelik F., Livaoğlu H., Woith H., Lühr B.G., 2019. Discrimination of quarry blasts from tectonic events in the Armutlu Peninsula, Turkey, *Journal of Seismology*, 23, 59-76.

Yilmazer M., 2012. zSacWin: A rapid earthquake processing and archiving system, User Guide v1.0. December 2012, Supported by the Research Fund of the Boğaziçi University PN: 5725P.

Zhang M., Wen L., 2015. Seismological evidence for a low-yield nuclear test on 12 May 2010 in North Korea, *Seismological Research Letters*, 86(1), 138-145.

Zhao X., Feng W., Tan Y., Li J., Pei S., An Y., Hua W., He S., Zhao Y., Liu J., Yao Z., 2016. Seismological investigations of two massive explosions in Tianjin, China, *Seismological Research Letters*, 87, 826-836, <https://doi.org/10.1785/0220150229> .

ARAŞTIRMA VERİSİ (*Research Data*)

Çalışma kapsamında kullanılan patlamaya ilişkin veriler Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü-Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Merkezi (KRDAE-BDTİM) (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-verileri/sayisal-veriler/>) ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı Türkiye Deprem Veri Merkezi Sistemi (AFAD-DDB-TDVMS) (https://tdvms.afad.gov.tr/continuous_data) üzerinden temin edilebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (*Conflict of Interest / Relationship*)

Araştırma kapsamında herhangi bir kişiyle ve/veya kurumla çıkar çatışması/ilişkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): İ.Ö., E.B.
- Literatür araştırması (*Literature research*): İ.Ö.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): İ.Ö., E.B.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): İ.Ö., E.B.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): İ.Ö., E.B.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): İ.Ö., E.B.
- Makale yazımı, düzenleme, kontrol (*Writing, editing and checking of manuscript*): İ.Ö., E.B.