

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**5 EYLÜL 2012 AFYONKARAHİSAR ASKERİ MÜHİMMAT
DEPOSU PATLAMASININ SİSMOLOJİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem ÖZKAVAF

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

MAYIS 2024

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**5 EYLÜL 2012 AFYONKARAHİSAR ASKERİ MÜHİMMAT
DEPOSU PATLAMASININ SİSMOLOJİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem ÖZKAVAF

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Emrah BUDAKOĞLU

MAYIS 2024

İrem ÖZKAVAF tarafından hazırlanan “5 Eylül 2012 Afyonkarahisar Askeri Mühimmat Deposu Patlamasının Sismolojik Analizi” adlı tez çalışması 16.05.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Dr.Öğr.Üyesi Emrah BUDAKOĞLU (Danışman)
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Dr.Öğr.Üyesi Günay BEYHAN
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi BERNA TUNÇ
	Kocaeli Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “5 EYLÜL 2012 AFYONKARAHİSAR ASKERİ MÜHİMMAT DEPOSU PATLAMASININ SİSMOLOJİK ANALİZİ ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(16/05/2024).

İrem ÖZKAVAF





Canım Kızım Zeynep Duru'ma...



TEŞEKKÜR

Lisans ve Yüksek Lisans öğrenimim boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol göstererek bu çalışmamda da tüm destekleriyle tezimin şekillenmesinde büyük emekleri olan çok kıymetli hocam Sayın Dr.Öğr.Üyesi Emrah BUDAKOĞLU desteği ve mesleki tüm deneyimlerini paylaştığı için çok teşekkür ederim.

Her daim bana Yüksek Lisans yapmam için teşvik eden ve hem küçük kızım ile hem iş hem de okul dönemlerimin bir arada olması sebebiyle her zaman gösterdikleri sabır, destek ve motivasyon için canım annem Hamiyet ÖZALTAN ve canım babam Kamil ÖZALTAN'a çok teşekkür ederim.

Hep yanımda olan ve hayallerimi gerçekleştirmek için tüm desteklerini esirgemeyen canım eşim Murat ÖZKAVAF ve en büyük motivasyon kaynağım canım kızım Zeynep Duru ÖZKAVAF'a çok teşekkür ederim.

İrem ÖZKAVAF



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	27
1.1. Literatür Özeti	28
1.2. Doğal ve Yapay Sismik Kaynaklar	30
1.3. Sismik Dalga Türleri	32
1.4. Deprem ve Deprem Olmayan Sismik Kaynaklar Arasındaki farklar	38
2. ANALİZLERDE KULLANILAN PROGRAMLAR VE YÖNTEMLER	43
2.1. zSacWin EQ Processing Bilgisayar Yazılımı	43
2.2. Seismic Analysis Code (SAC)	44
2.3. Spektrogram	46
2.4. Fourier Genlik Spektrumu	47
2.5. Sismik Olayın Büyüklüğü ile Patlayıcı Verim Miktarının Belirlenmesi	48
2.6. İkinci Şok Dalgası ile Patlayıcı Verim Miktarının Belirlenmesi	49
2.7. Krater Boyutları ile Patlayıcı Verim Miktarının Belirlenmesi	52
3. UYGULAMA	55
3.1. 5 Eylül 2012 Afyonkarahisar Mühimmat Deposu Patlaması	55
3.2. Bölgede Sismik Ağlar, Sismik İstasyonlar ve Kayıtlar	57
3.3. Patlamanın Konumu, Başlangıç Zamanı ve Büyüklüğünün Belirlenmesi	60
3.4. Sismik faz tanımlama ve akustik dalgalar	66
3.5. Patlamaya ilişkin verim (yield) tahmini	70
3.6. Frekans ortam analizleri	73
4. SONUÇLAR	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	87



KISALTMALAR

ANFO : Amonyum nitrat fuel oil karışımı

m_b : Cisim dalgası büyüklüğü

M_L : Yerel Büyüklük

PE4 : Plastik patlayıcı

PETN : Pentaeritritol tetranitrat

TNT : Trinitrotoluen





SİMGELER

R	: Mesafe [m]
<i>Vod</i>	: Patlama hızı [m/s]
W	: Ton cinsinden TNT eş değeri
ρ	: Patlayıcının yoğunluğu [kg/m ³]
D	: Krater Çapı [m]
δt_{ss}	: İkincil şok dalgası gecikme süresi [s]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Patlama bölgesine yakın konumda bulunan KRDAE ve AFAD istasyonları Patlama bölgesine yakın konumda bulunan KRDAE ve AFAD istasyonları	58
Tablo 3.2. Sismogramlardan okunan P ve S dalgalarına ait varış zamanları Sismogramlardan okunan P ve S dalgalarına ait varış zamanları	62
Tablo 3.3. Patlamaya ilişkin konum bilgisi ve diğer parametreler.....	63
Tablo 3.4. 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasına ilişkin süreye bağlı büyüklük değerleri.....	64
Tablo 3.5. 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasına ilişkin yerel büyüklük değerleri	65
Tablo 3.6. Farklı yöntemler kullanılarak 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması infilak eden madde miktarları	72



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1.** Deprem dışındaki sismik kaynaklara örnekler (Rogers ve Koper, 2012).. 32
- Şekil 1.2.** Farklı sismik dalga türleri ve parçacık hareketi; Şeklin sol tarafında cisim dalgaları (P ve S dalgaları) ve sağ tarafında yüzey dalgaları (Love ve Rayleigh dalgaları) (Shearer 2009) 34
- Şekil 1.3.** Telesismik mesafeden kaydedilmiş güçlü bir deprem için tipik bir sismogram: Önce P dalgaları, ardından S dalgaları ve en yıkıcı enerjiye sahip olan yüzey dalgaları gelir. Her bir dalga türünün gelişi açıkça ayırt edilebilir (Hohensinn, 2019). 37
- Şekil 1.4.** Depremler ve patlamalara ilişkin yaygın örüntüleri (Budakoğlu ve ark. 2018) 39
- Şekil 1.5.** Bir patlama (3 Temmuz 2020 Hendek/Sakarya havaifşek patlaması) esnasında farklı istasyonlar tarafından kaydedilen sismik ve akustik dalgalar (Budakoğlu 2022) 40
- Şekil 1.6.** Farklı türdeki sismik olayların (deprem, taş ocağı patlaması ve havaifşek patlaması) düşey bileşen sismogramlarına ait dalga şekilleri 41
- Şekil 2.1.** zSacWin yazılımında bir depremin farklı istasyonlarındaki sismogram kaydının görünümü 44
- Şekil 2.2.** Deprem (a) ve taş ocağı patlatmasına (b) ilişkin spektrogram örneği (Budakoğlu ve Horasan, 2018) 47
- Şekil 2.3.** Sakarya’da bulunan SAUV istasyonunda kaydedilen deprem (a) ve taş ocağı patlaması (b) için normalleştirilmiş genlik spektrumları 48
- Şekil 2.4.** a) İkincil şok özelliklerini gösteren basıncı kaydı örneği, b) Bir hız sismometresi ve basınç ölçerde sismik dalgalar ve akustik dalgaların gelişi ve anaşok-ikincil şokların gösterilmesi. δt_{ss} : İkincil şok gecikmesi (Gitterman 2013)..... 51
- Şekil 2.5.** Patlama sonucu oluşan krater boyutu şematik gösterimi..... 53
- Şekil 3.1.** Afyonkarahisar patlama lokasyon haritası. Kırmızı yıldız patlama noktasını göstermektedir..... 56
- Şekil 3.2.** Afyonkarahisar 500. İstihkam Ana Depo Komutanlığı Şehit Uzman Çavuş Mete Saraç Kışlası mühimmat deposu a) Patlama öncesi (<https://earth.google.com/>) b) Patlama sonrası (<https://earth.google.com/>) ve c) Patlama anı hemen sonrası görüntüleri (<https://www.> 57
- Şekil 3.3.** KRDAE ve AFAD’a ait istasyonların patlama bölgesine ilişkin konumları. Kırmızı yıldız patlama konumunu işaret etmektedir..... 58
- Şekil 3.4.** KRDAE ve AFAD’ a ait toplam 9 istasyonda kaydedilen düşey hız sismogramları. Sismik dalgalar kırmızı kesikli alanla işaretlenmiştir. Sismogramlar patlamaya ilişkin dış merkez uzaklıklarına göre çizilmiştir. Sıfır zamanı 21:07:47.0'dir..... 59
- Şekil 3.5.** 5.Patlamanın BOLV istasyonu sismogramı. Sismik dalgalar kırmızı dikdörtgen ve Akustik dalgalar mavi dikdörtgen içinde gösterilmiştir..... 60

Şekil 3.6. 5 Eylül 2012 Afyonkarahisar mühimmat depo patlaması konum tespitinde kullanılan istasyonlar ve okunan dalga varışları. P dalgaları için mavi, S dalgaları için pembe ve olayın süresi için yeşil çubuk kullanılmıştır. Kesikli çubukların tümü yazılım önerdi	61
Şekil 3.7. BOLV ve KZIL istasyonu için olay süresi okumaları. Mavi çubuk P dalası varışını, yeşil çubuk ise olayın bitiş zamanına işaret etmektedir.	64
Şekil 3.8. KRDAE ve AFAD' a ait toplam 9 istasyonda kaydedilen düşey hız sismogramları.	66
Şekil 3.9. 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.	67
Şekil 3.10. a) Patlamanın BOLV istasyonu sismogramı. b) Patlamaya ilişkin sismik dalgalar ve c) Akustik dalgalar.....	69
Şekil 3.11. 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması için ana şok ve ikincil şok dalgasının BOLV istasyonunda kaydedilen düşey bileşen sismogramı. dtss, ikincil şok dalgası gecikme süresini temsil eder.	71
Şekil 3.12. 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasının sismik ve akustik dalga sismogramları ve bunlara karşılık gelen spektrogramları. Spektrogramlar, dalga formlarının düşey bileşeni kullanılarak hesaplanmıştır. Yüksek enerjili içerik mor, kırmızı ve yeşil renklerle.....	75
Şekil 3.13. Sismik ve akustik dalgaların genlik spektrumları. Çizimlerde patlama bölgesine en yakın istasyon olan BOLV kullanılmıştır.	76
Şekil 3.14. 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasının sismik ve akustik dalga sismogramları ve bunlara karşılık gelen spektrogramları. Spektrogramlar, dalga formlarının düşey bileşeni kullanılarak hesaplanmıştır. Yüksek enerjili içerik mor, kırmızı ve yeşil renklerle	77

5 EYLÜL 2012 AFYONKARAHİSAR ASKERİ MÜHİMMAT DEPOSU PATLAMASININ SİSMOLOJİK ANALİZİ

ÖZET

Sismik izleme, sadece tektonik kökenli olayları değil aynı zamanda doğal veya kazara gerçekleşen olaylara da ışık tutabilecek potansiyele sahiptir. Sismolojinin bir kolu olan adli (forensic) 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. Sismolojik analizlerle adli olaylara ait oluş zamanının, konumunun, büyüklüğünün, patlayıcı miktarının belirlenmesi ve patlamanın oluş düzeni gibi bilgiler elde edilebilmektedir. 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. El bombalarının tasnif edilmesi esnasında meydana gelen patlama can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Patlama esnasında sismik dalgaların yanı sıra yüksek basınçlı şok dalgaları oluşmuş ve bunlar bölgeye yakın olan sismometreler tarafından kaydedilmiştir. Bu çalışmada patlamaya ilişkin sismik ve akustik dalga kayıtları KOERİ ve AFAD istasyonlarından temin edilmiş ve zaman ve frekans ortamında incelenmiştir. Sismografların analizinde patlamanın 18:07:53.87 (UTC)'de gerçekleştiği tespit edilmiştir. Süreye ve yerel bağlı büyüklükleri sırasıyla $M_d=1.4$ ve $M_L=1.4$ olarak hesaplanmıştır. Patlamaya ilişkin konum tahmini ise güvenilir bir şekilde elde edilmiştir. Patlamada ne kadar malzemenin infilak ettiği sorusu ise krater çapı, ikincil şok dalgası gecikme süresi ve olay büyüklüğünü temel alan metotlar kullanılarak aydınlatılmaya çalışılmıştır. Üç verim tahmini yönteminden ikincil şok dalgası gecikme süresi temel alınarak yapılan verim tahmini patlayıcı malzemenin kimyasal özelliklerini hesaba katması ve sismogramlardan ikinci şok dalga gecikmelerinin net olarak tespit edilebilmesi nedeniyle diğer metotlara göre daha güvenilir bulunmuştur. Böylece infilak eden madde miktarı 21 ton olarak tespit edilmiştir. Frekans ortamı çalışmalarında P dalgalarının 3 Hz ve akustik dalgaların ise 20 Hz civarında baskın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çok kısa sürede birden fazla patlamanın gerçekleştiğine dair frekans ortamı analizlerinde bulgulara rastlanmıştır. Sismolojik araştırmalar terör saldırıları, büyük patlamalar ve çeşitli doğal olamayan olayların oluş süreçlerinin aydınlatılmasına bilgi sunmaktadırlar. Bu sayede acil durum planlamalarına katkılar sağlanabilir ve adli süreçlere ışık tutulabilir.



SEISMOLOGICAL ANALYSIS OF 5 SEPTEMBER 2012 AFYONKARAHİSAR MILITARY AMMUNITION STORE EXPLOSION

SUMMARY

Forensic sciences are defined as a bundle of sciences contributed by a large number of sciences used to reveal crimes and disputes. Although forensic sciences have not gained the identity of a science on its own, it can be described as a general collection of different disciplines (geophysics, geology, medicine, chemistry, biology, psychology, social science, etc.). The concept of forensic event can be defined as the events that are investigated by law enforcement officers, prosecutor's office and courts ex officio or through a complaint and that have an element of crime within the scope specified in criminal law. In order to clarify these events, the collection of crime scene and all kinds of evidence related to the crime provides significant benefits. In parallel with the development of earth sciences in recent years, its contributions to other different disciplines are significant. Geology, Geophysics, Geochemistry and their sub-disciplines (seismology, mineralogy, sedimentology, geomorphology, etc.) are used to make great contributions to forensic investigations. In recent years, detailed analyses of natural and unnatural seismic sources have been used as a tool to contribute to investigations. Seismology, one of the main branches of geophysical engineering, studies earth movements and earthquakes. An important branch of this main science is forensic seismology. Forensic seismology emerged worldwide during the Cold War. The realisation of the ability of seismological science to monitor the seismic signals that occur during the development of nuclear weapons by various countries and the testing of the developed weapons has aroused curiosity in the world. The fact that seismic signals can often be detected many kilometres away from the sites of explosions quickly made it clear that seismological methods are a powerful tool for monitoring these tests. One of the biggest challenges in forensic seismology is to distinguish between seismic signals generated by earthquakes and those generated by explosions. Today, many researchers have made significant contributions to the literature on this subject. The rapidly developing seismological observatories around the world have resulted in numerous examples of how seismic observations are potentially being used to support forensic investigations. Important examples include the use of seismic and acoustic signals to estimate the time of impact and location of aircraft crashes, to estimate the time of detonation and quantity of explosives after terrorist attacks, to detect underground nuclear tests, to estimate the details of chemical factory explosions, and to analyse explosive burglaries.

Natural and artificial seismic sources represent movements in the earth's crust. Natural seismic sources refer to seismic waves caused by earthquakes and other movements in the earth's crust. Some of the energy generated is propagated in the form of seismic waves and recorded by seismometers. Artificial seismic sources are sources of vibration or energy produced deliberately or accidentally by humans. Artificial vibrations are generated as a result of forensic events such as factory explosions, terrorist attacks, aircraft crashes and some of them are recorded by devices. Both

natural and artificial seismic sources serve to understand the internal structure and movements of the Earth's crust. Earthquakes and explosions release enormous amounts of energy into the environment when they occur. In terms of waveforms, since the forces related to these events are different, there are differences in waveforms. Explosions occur in very shallow parts of the earth's surface. All the energy released during their realisation is emitted from a volumetrically small source. When the force mechanism of explosions is analysed, there is a force mechanism with equal forces in all directions. If a large explosion occurs, a chemical reaction starts rapidly. As the reaction progresses, the explosive material turns into a very dense, very hot and highly pressurised gas. At the beginning of the explosion, the explosive material attempts to equilibrate with the ambient air at high temperatures and a high-pressure shock wave is released. Shock waves are powerful pressure waves generated by events (e.g. explosions) that produce severe changes in pressure in an elastic medium. The wave front where compression occurs is a region of sudden and violent changes in stress, density and temperature. Shock waves therefore propagate differently from acoustic waves. Shock waves travel faster than sound and their speed increases as the amplitude increases. The intensity of spherical shock waves caused by explosions decreases rapidly as they move away from the centre of the explosion and becomes equal to the speed of sound (average 340 m/s under standard conditions). The intensity of the shock wave decreases faster than the intensity of the acoustic wave. Acoustic waveforms have a sharper onset and shorter duration than seismic waveforms. Acoustic and seismic waves can be recorded by seismometers and observed in seismogram.

On 5 September 2012, around 21:15 local time, an explosion occurred during the sorting of hand bombs at the ammunition depot in Afyonkarahisar. 25 soldiers were martyred in the explosion. In addition, 8 people, including 4 soldiers, were seriously injured. After the explosion, unexploded grenades, tank bombs, mines and pieces of ammunition were scattered as far as Çiftlik, 500 metres away. The explosion, which was felt from a distance of approximately 20 kilometres, caused the destruction and burning of trees in the vicinity. Significant damage was also observed in military facilities. In the damage assessment studies conducted by the Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD) teams, it was reported that a total of 240 houses and 16 vehicles were damaged in Afyon Kışlacık village and Ataköy neighbourhoods. It was stated that the main cause of damage was the pressure waves caused by the explosion. In this study, the explosion will be evaluated seismologically. For this purpose, it is aimed to obtain information such as the time of occurrence, determination of the amount of explosives, the order of the explosion and to produce information that can be useful for emergency planning and administrative investigations. Different types of seismic events were analysed in time and frequency domain. The zSacWin EQ Processing computer software was used to analyse and display the data. Seismic Analysis Code (SAC) analysis package was preferred for analysing the waveforms of seismic events in time and frequency domain. SAC is a free software package that is widely used for general analysis and processing of seismic data (remote or regional). With SAC, seismic events can be displayed in time domain, Fourier amplitude spectra and spectrograms can be obtained. In addition, it is of great importance to determine the amount of explosive material after a seismic event in order to shed light on forensic investigations. There are many methods in this context. In the following sections, frequently used ones will be detailed.

Seismic stations of two different seismological observatories are located in the area where the explosion occurred. Seismic stations of Kandilli Observatory and

Earthquake Research Institute-Regional Earthquake and Tsunami Monitoring Centre (KRDAE-BDTIM) and Disaster and Emergency Management Presidency Earthquake Department (AFAD-DDB) were used in the investigations. Stations with clearly identifiable seismic arrivals recorded by regional seismic networks were preferred in the analyses. It was determined that the explosion was recorded by 9 three-component broadband seismic stations (weak motion) at a distance of approximately 36 to 181 km from the location of the explosion. The closest station to the explosion, BOLV (epicentre distance ≈ 36 km), is located east of the explosion. In the analyses of 9 stations, acoustic waves were observed only in the seismogram of the nearest BOLV station.

The zSacWin EQ Processing computer software was used to determine the location, origin time and magnitude of the explosion. Based on the arrival times of P and S waves read from the seismograms, the location of the explosion was determined at coordinates 38.6957°N-30.5102°D. The original time of the explosion was determined to have occurred at 21:07:53 local time (18:07:53 GMT). The local and duration dependent magnitudes were calculated as $M_d=1.4$ and $M_L=1.4$, respectively.

The velocity of P wave was determined by using the arrival times of P waves. For this purpose, P wave arrival times were obtained for each station and wave velocity was determined by linear regression. Vp wave velocity was determined as 6.3 km/s. The acoustic wave velocity calculated based on the BOLV station is 356 m/s.

If the explosive material is known when an explosion occurs, the amount of detonating material can be obtained by experimental relations. In addition, the amount of detonating material can be determined by using different types of parameters. In this study, for the 2012 Afyon ammunition depot explosion, three different methods such as crater dimensions, magnitude-yield estimation calculated using seismic waves, and finally the secondary shock wave parameter obtained from acoustic waves were used to estimate the yield.

Firstly, it is a calculation method based on the dimensions (depth and diameter) of the crater formed after the explosion for yield estimation. According to the 2012 Afyon ammunition depot expert reports, no crater was found in the depot. There is only a crater with a diameter of 3 metres at the right front entrance of the armoury. It was stated that this crater was caused by another small explosion. According to the available data, a calculation based on the diameter of the crater shows that 0.89 tonnes of explosive detonated. Another method is the secondary shock wave method. Using the equations given by Rigby and Gitterman (2016), the mass of the explosive can be determined with the secondary shock wave of the 2012 Afyon explosion. ‘PETN’, i.e. plastic explosive chemical, was detected at the scene in the expert reports. The V_{od} value of this explosive substance is 8300 (m/s) and the density of the explosive substance ρ is 1.77 (kg/m³). Based on this information, it was determined that 20 880 kg $\sim$ (21 tonnes) $\pm 2\%$ of a material detonated. This value is the weight of the material detonated in the explosion expressed in tonnes. Another method is to estimate the size of the explosion. With this method, the amount of explosive detonated was estimated as 7.1 t. In the 2012 Afyon ammunition depot explosion, no crater was reported inside the depot. The estimate based on the small crater reported outside the depot is far from the truth. The estimate based on the magnitude of the event calculated from seismic waves represents only the lower limit of the explosion. Considering that most of the energy transfer to the atmosphere takes place by shock waves, the estimation made with this method is largely incomplete. In order to estimate the yield using secondary

shock wave delay time, detailed parameters such as explosion velocity and compound density of the detonating material, scaled distance and delay times that can be clearly read from seismograms are used. This increases the precision compared to other methods. When all these conditions are evaluated, it is considered that the yield estimation with the secondary shock wave delay time is closer to reality and more accurate for the 2012 Afyon ammunition depot explosion.

Analysing the waveforms of seismic events in the frequency domain reveals how the spectral content changes with time. In the analyses, Fast Fourier Transform (FFT) was used to show how the amplitude changes with frequency and spectrograms of the burst were obtained to observe how the signal strength changes as a function of time at different frequencies. For the BOLV station, Fast Fourier Transform (FFT) was used to show how the amplitude changes with frequency and spectrograms were obtained to observe how the signal strength changes as a function of time at different frequencies. In the frequency environment analysis, it was determined that P waves were dominant around 3 Hz and acoustic waves were dominant around 20 Hz. In addition, there were findings in the frequency environment analysis that more than one explosion occurred in a very short period of time.

In recent years, the number and quality of seismic networks has been increasing all over the world, especially for the study of earthquakes. With detailed seismic monitoring, detailed information on events subject to forensic investigations such as explosions can be obtained by analyzing the records of these seismic stations. In the aftermath of powerful explosions, a large amount of information such as the origin time, size and amount of material exploded can be quickly obtained without being affected by the chaos of search and rescue operations. In the light of the reliable information obtained, emergency planning and administrative investigations can benefit.

1. GİRİŞ

Adli bilimler, suç ve uyuşmazlıkların ortaya çıkarılması amacıyla kullanılan çok sayıda bilimin katkı sağladığı bilimler demeti olarak tanımlanmaktadır. Adli bilimler tek başına bir bilim hüviyeti kazanmamış olmasına rağmen farklı disiplinlerin (jeofizik, jeoloji, tıp, kimya, biyoloji, psikoloji, sosyal bilim vb.) genel anlamda toplanması olarak nitelendirilebilir. Adli olay kavramı ise meydana gelen bir olayın soruşturmasının resen veya şikâyet yolu ile kolluk kuvvetleri, savcılık ve mahkemeler tarafından tahkikatı başlanmış olan ve ceza hukukunda belirtildiği kapsamda suç unsuru taşıyan olaylar olarak tanımlanabilir. Bu olayların aydınlatılması için olay yeri ve suçla ilişkili her türlü delillerin toplanması önemli faydalar sağlamaktadır.

Yer bilimlerinin son yıllarda gelişimine paralel olarak diğer farklı disiplinlere sağladığı katkılar azımsanmayacak derecede önemlidir. Jeoloji, Jeolojik, Jeokimya bilim dalları ve bunların alt bilim 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. Jeofizik mühendisliği ana bilim dallarından biri olan sismoloji, yer hareketlerini ve depremleri inceler. Bu ana bilim dalının 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 izlemek için güçlü bir araç olduğu kısa sürede anlaşılmıştır. 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 (McCormack, 2003; Kim ve ark. 2001), terör saldırıları sonrasında patlama zamanı ve patlayıcı miktarına ilişkin tahminler (Holzer ve ark. 1996; Koper ve ark. 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 ark. 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 değerlendirilecektir. Bu amaçla adli olaylara ait oluş zamanı, patlayıcı miktarının belirlenmesi, patlamanın oluş düzeni gibi bilgiler elde edilmesi ve kriz yönetimi, acil durum planlaması ve idari soruşturmalara fayda sağlayabilecek bilgiler üretilmesi hedeflenmektedir.

1.1. Literatür Özeti

Ringdal ve ark. (1992) Shagan Nehri test sahasındaki Sovyet yeraltı nükleer patlamaları P ve Lg tabanlı kaynak boyutları ile test alanının Chinrau fayı ile bölünmüş kuzeydoğu ve güneybatı kısımlarının farklı jeofizik özellikleri 14 Eylül 1988 patlamasında incelenmiştir.

Koper ve ark. (1999) 7 Ağustos 1998'de Kenya'nın Nairobi kentindeki Amerikan Büyükelçiliği'nde meydana gelen bombalı kamyon saldırısının sismik istasyonlar tarafından kaydedilen P ve Rayleigh dalgalarını inceleyerek sismolojik analizini yapmışlardır.

Sismik ve akustik verilere dayalı kontrollü kamyon bombası patlamaları yaparak yük boyutu ile dalga biçimleri özellikleri arasında ilişkileri inceleyerek analiz etmişler (Koper ve ark. 2002).

Ambrosini ve ark. (2002) yeryüzünde veya üstünde patlayıcı yüklerin deneysel yöntemleri kullanarak yer seviyesinin üzerinde bulunan patlatıcı yüklerin boyutları

yeraltında ve yüzeye yakın patlamalarda gözlemlenenlerden daha küçük olduğunu tespit etmiştir.

Evers ve ark. (2007) 30 Temmuz 2004'te Belçika'daki Ghislenghien kentinde gaz boru hattı patlaması sonucu yakınlardaki üç simometrede kaydedilen verilerle patlamanın başlangıç zamanı, Rayleigh dalgalarını simoakustik analizlerle adli araştırmalardaki kapasiteyi ölçümlledi.

11 Aralık 2005 tarihinde İngiltere'nin Hemel Hempstead kenti yakınlarındaki Buncefield yakıt deposunda meydana gelen patlama ile ortak sismoakustik analiz yoluyla hem sismik hız modelini hem de atmosferik modelin incelemesiyle bu çalışmada ana patlamayı ele almıştır. (Ottemöller ve Evers 2008).

Kuran ve Polat (2012), 5 Eylül 2012 Afyonkarahisar'da meydana gelen mühimmat deposundaki patlama ile yer hareketi ve akustik titreşimlerin sismogram kayıtları kullanılarak patlamanın zamanı, konumu, kaç kez patlama olduğu ve infilak eden mühimmatın TNT eşdeğer miktarı hesaplanarak analizler yapılmıştır.

Zhao ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada 2016 yılında Kuzey Kore tarafından gerçekleştirilen yer altı nükleer test denemesi sismolojik açıdan ele alınmıştır. Bu çalışmada P dalgaları ve Rayleigh dalgaları sismogram kayıtlarından incelenmiştir. Olaya ilişkin Mb ve Ms hesaplanarak çeşitli analizler yapılmıştır.

Ataeva ve ark. (2017) P ve S dalgalarının kaynak spektrumlarının frekansları arasındaki oran ile depremler ve taş ocağı patlamaları arasında ayrımları incelemişlerdir. Böylelikle, depremler, patlama kaynaklarından çok daha büyük S dalgası ürettiğini tespit eder.

Pilger ve ark. (2020)'de 4 Ağustos 2020 yılında Lübnan'ın Beyrut şehrinde bir liman deposunda meydana gelen patlamanın sismolojik analizlerini, gerçekleştirdiler. Patlayıcı kaynak olarak bildirilen 2,75 kt amonyum nitratın infilakı sonucu patlamanın gerçekleştiğini elde edilmişlerdir.

4 Ağustos 2020 Beyrut Limanı kimyasal patlamasının sismik konumunun araştırılması amacıyla yapılan bir başka çalışmada ise 58 istasyondan oluşan bir ağ ve Bayes yöntemi kullanılarak olayın konumu elde edilmiştir (Ghalib ve ark.2022)

Budakoğlu (2022) 3 Temmuz 2020'de Sakarya'nın Hendek havai fişek fabrikasında meydana gelen patlamada sismik ve akustik dalgaların zaman ve frekansları

incelenerek bölgede büyük iki ayrı patlamanın yanı sıra en az beş patlamanın daha meydana geldiğini tespit etmiştir.

1.2. Doğal ve Yapay Sismik Kaynaklar

Doğal ve yapay sismik kaynaklar, yer kabuğundaki hareketleri temsil ederler. Doğal sismik kaynaklar, depremler ve diğer yer kabuğu hareketlerinden kaynaklanan sismik dalgaları ifade ederler. Yer kabuğu içindeki meydana gelen kırılmalar sebebiyle aniden oluşan enerjinin dalga cepheleri formunda ilerleyerek bulunduğu ortamı ve yerin yüzeyini titreştirme olayına deprem denilmektedir. Bu enerjinin bir bölümü sismik dalgalar şeklinde yayılır ve sismometreler tarafından kaydedilirler. Depremler çeşitli kategorilerde sınıflandırılabilir. Oluşumları göz önüne alındığında dünyada en çok karşılaşılan tektonik depremlerdir. Tektonik kuvvetler nedeniyle kayaların kırılması sonucu oluşurlar. Yerin oldukça derinlerinden geçebilen dalgalar üretebildiklerinden yerin iç yapısının özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilirler. Volkanik depremler, volkanların aniden patlamasıyla meydana gelirler. Çöküntü depremler, yerin altında galerilerin ya da madenlerin çökmesi ile oluşurlar. Bu tür depremlerde oluşan dalgalar çok mesafe kat edemezler. Yapay depremler ise insan kaynaklı üretilen titreşimler ile oluşan depremlerdir. Depremler derinliklerine göre ise sığ ($0 < d < 60$ km), orta derinlikte ($60 < d < 300$ km) ve derin depremler ($300 < d < 700$ km) olarak sınıflandırılırlar. Uzaklıklarına göre depremler ise dış merkez uzaklığı 100 km'den az ise yerel, 600-800 km'ye kadar olanlar bölgesel, 800 km'den büyük dış merkez uzaklığına sahip olanlar ise uzak depremler olarak nitelendirilir.

Yapay sismik kaynaklar, insanlar tarafından bilinçli ya da kaza eseri üretilen titreşim veya enerji kaynaklarıdır. Fabrika patlamaları, terör saldırıları, uçak kazaları gibi adli olaylar sonucu yapay titreşimler üretilir ve bunların bir kısmı cihazlar tarafından kaydedilir. Aynı zamanda yapay sismik kaynaklar sayesinde (patlayıcı, çekiç darbeleri, sismik vibratörler vs. tarafından üretilen) yer kabuğuna titreşimler iletilebilir. Bu sayede yeryüzünün sığ katmalarından bu titreşimlerin nasıl yansıdığı veya kırıldığı incelenerek detay bilgiler elde edinilebilir. Sismik yansıma ve sismik kırılma gibi teknikler bu prensiple çalışırlar ve yer altındaki katmanların yapısı hakkında bilgi edinmek amacıyla kullanılırlar. Ayrıca, bu tür çalışmalar, enerji sektöründe petrol ve gaz rezervlerinin tespitinde, inşaat projelerinde yer seçiminde ve

deprem riskinin değerlendirilmesinde kullanılır. Doğal ve yapay sismik kaynakların her ikisi de yer kabuğunun iç yapısının ve hareketlerinin anlaşılmasına hizmet ederler. Depremler dışındaki sismik kaynaklara örnek sınıflandırma Rogers ve Koper (2012) tarafından yapılmıştır (Şekil 1.1.). Taş ocağı patlamaları dünyada en çok çalışılan ve depremlerden ayırt edilmesi için yöntemlerin irdelendiğı yapay sismik kaynak türüdür. Taş ocağı işletmelerinde dinamit, barut ve gamzit gibi patlayıcılar kullanılarak işlem yapılmaktadır. Faydalı enerji grubunda şok enerjisi ve gaz enerjisidir ki bunlar işi gerçekleştiren enerjilerdir. Faydasız enerji grubunda ise sismik, ışık, ses ve ısı enerjisi bulunmaktadır. Bunların kaya parçalanması işleminde bir faydası bulunmamaktadır (Konya, 1990). Nükleer patlamalar, atom çekirdeklerinin nükleer reaksiyonlar sonucunda serbest bırakılan büyük miktardaki enerjiyle meydana gelirler. Bu patlamalar, büyük bir yıkım potansiyeli taşıdığından ve ciddi radyoaktif kirlilik yaratabildiğinden, uluslararası anlaşmalarda ciddi olarak denetlenmektedir. Bu sebeple sismolojik analizlerle nükleer patlama denemelerinin irdelenmesi ve incelenmesi oldukça önemlidir. Bu analizlerle patlamanın türü, yeri, zamanı ve patlamanın karakteristik özellikleri ortaya konulabilmektedir. Son yıllarda endüstriyel fabrika patlamaları, terör saldırıları, uçak kazaları, nükleer silah testleri için yapılan sismolojik analizler oldukça popülerdir.

DEPREM DIŐI SİSMİK KAYNAK ÖRNEKLERİ	
<u>Doğal Olaylar</u>	<u>İnsan Kaynaklı Olaylar</u>
Meteor Düşmesi	Nükleer Silah Testleri
Volkanik Patlamalar	Kimyasal Patlamalar
Maden Çökmeleri	Terör Saldırıları
Kaya Düşmesi/Toprak Kaymaları	Endüstriyel Kazalar
Kasırgalar	Maden Faaliyetleri
	Uçak Kazaları
	Tren Kazaları (raydan çıkma)

Şekil 1.1. Deprem dışındaki sismik kaynaklara örnekler (Rogers ve Koper, 2012)

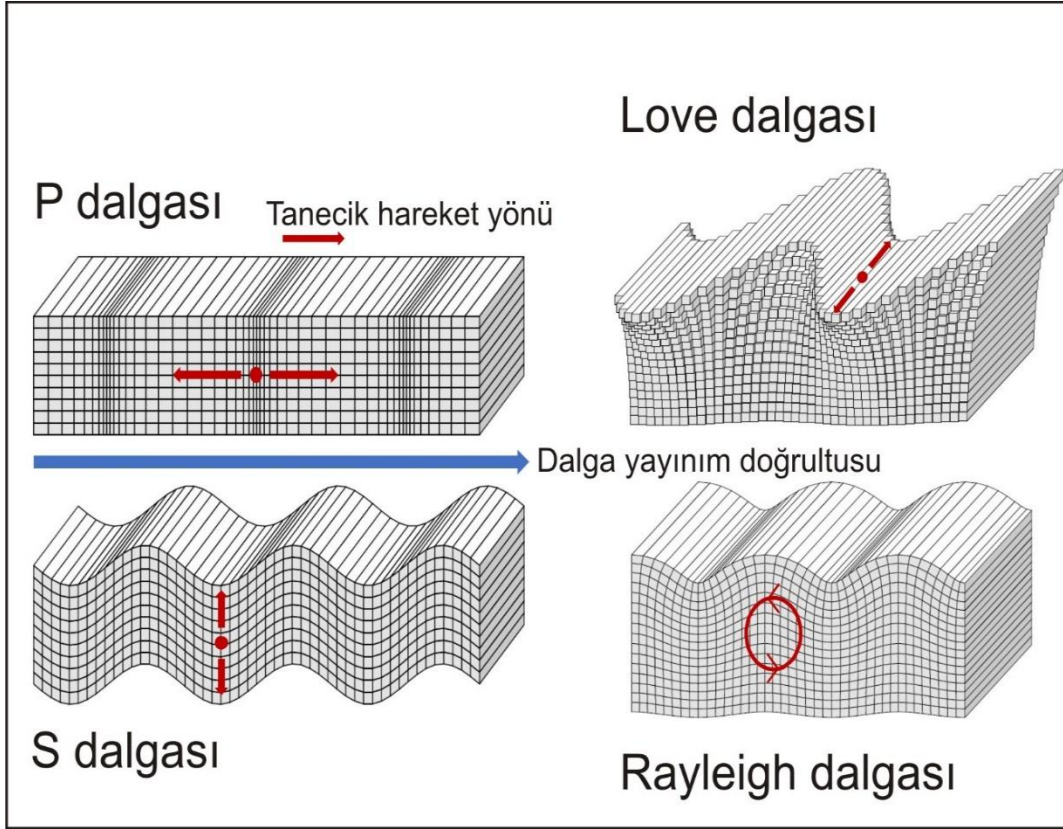
1.3. Sismik Dalga Türleri

Kayaçlarda biriken gerilme elastik limitleri aştığında fay yırtılır, kayaç kütleleri aniden yer değiştirir ve faydan sismik dalgalar yayılmaya başlar. Fay kırılması devam ederken, gerilme ile ortaya çıkan enerji boşalır ki bu enerji faylanmanın aktif kısmındadır. Böylece, fayın her bir noktası, belirli bir zaman gecikmesiyle (yırtılma ilerlemesinin hızına bağlı olarak) sismik dalgaların şeklini oluşturmaya katkıda bulunur ve karmaşık bir dalga treni oluşmasına neden olur. İlk bakışta, kaynaktaki yırtılmanın süresi (bu kırılma bir saniye ile birkaç dakika arasındadır) ile gözlenen sismogramın uzunluğu (büyük ve uzak depremler için birkaç saati aşar) arasında bir bağ bulunmamaktadır. Bu, bir çelişki gibi görülebilir. Ancak, sismogramın uzunluğu, gerçekten, yansıma, kırılma, faz dönüşümü, dispersiyon gibi dalga yayılımının değişik etkilerine bağlıdır ve yırtılmanın süresiyle çok az ilgilidir. Sismologlar koda (coda)

terimini ana fazları izleyen, azalan genliklere sahip, sismogramın belirli bir kısmını tanımlamada kullanırlar.

Temel olarak, cisim dalgaları (body waves) (Yeryuvarının içerisinde ilerleyen dalgalar) ve yüzey dalgaları (surface waves) (yeryuvarının serbest yüzeyi boyunca veya yeryuvarı içerisindeki diğer yüzeye yakın süreksizlikler boyunca yayılırlar) olmak üzere iki tür sismik dalga vardır. Yüzey dalgaları sığ depremlerdeki enerjinin büyük bir kısmını taşırlar ve genellikle, nüfus yoğunluğu yüksek yerleşim alanlarının etkilendiği depremlerde yıkımlarının birincil nedenidir. Cisim dalgaları bir kaynaktan yola çıkarak tüm doğrultuda yayılabilirler (serbest dalgalar-free waves). Yüzey dalgaları sınırlar boyunca etkileşen cisim dalgalarından sonra yayılmaya başlarlar. Bu nedenle, yüzey dalgaları her zaman süreksizlik yüzeyleri yakınlarında yoğunlaşırlar ve bu yüzden, bazen sınırlanmış dalgalar (bounded waves) veya yönlendirilmiş dalgalar (guided waves) olarak adlandırılırlar. Başka bir deyişle, homojen, sınırı olmayan ortamlarda yüzey dalgaları yoktur.

Yüzey dalgaları cisim dalgalarından daha yavaş ilerlerler ve sıkışma (compressional) veya boyuna (longitudinal) dalgalar ve makaslama (shear) veya enine (transverse) dalgaları olmak üzere iki tipi vardır. Elastik bir cismin, cisim dalgalarının iki farklı tipini (P ve S dalgaları) geçirebileceği ilk olarak 1829'da S.D.Poisson tarafından kanıtlanmıştır. Cismin verilen herhangi bir noktasındaki yayılım hızı, bu noktadaki elastik modül ve yoğunluğa bağlıdır. Boyuna dalgalar, enine dalgalarında yaklaşık 1.7 kez daha hızlı yayılırlar ve çoğu kez P dalgaları veya birincil (primary) dalgalar (latince *undae primae*) olarak adlandırılırlar. Adından da anlaşılacağı üzere sismik sensörlere ilk ulaşan P dalgalarıdır. Bu dalgalar yol alırken kayaç bünyesinde bulunan tanecikler (particles) dalga yayılımı ile aynı yönde öne ve arkaya doğru gidip gelirler (ses dalgalarında olduğu gibi) (Şekil 1.2.). S dalgalarında ise durum, ışık veya elektromanyetik dalgalarda olduğu gibidir ve bunlar bulunduğu ortamdan ilerleme doğrultusuna dik şekilde yer değiştirirler (Şekil 1.2.). Depremler P ve S dalgalarını oluşturdukları için, sismik dalga kayıtları üzerinde yapılan çalışmalar, ses veya elektromanyetik dalgaları üzerindeki çalışmalardan daha karmaşıktır. Akışkanlar makaslama gerilmesini iletmezler ve bu yüzden Yeryuvarının sıvı kısımlarında S dalgaları yayılmazlar. Oysa, P dalgaları Yeryuvarının hem katı hem de sıvı kısımlarında yayılabilirler. P ve S dalgalarının ilk gerçek kayıtları 19. yüzyılın sonlarında elde edilebilmiştir.



Şekil 1.2. Farklı sismik dalg türleri ve parçacık hareketi; Şeklin sol tarafında cisim dalgaları (P ve S dalgaları) ve sağ tarafında yüzey dalgaları (Love ve Rayleigh dalgaları) (Shearer 2009)

Yüzey dalgaları, Love dalgaları (Love waves) ve Rayleigh dalgaları (Rayleigh waves) olarak adlandırılan iki temel tipe ayrılırlar. Bu dalgalar, büyük genlik ve uzun periyodları ile gerçek sismogramlarda hakim olan dalgalardır. Love dalgaları, genellikle, LQ, Rayleigh dalgaları da LR ile gösterilir, burada L uzaklık (yani, long waves) için, Q, Love dalgaları için Almanca, Querwellen'(enine dalgalar) dan kısaltmasıdır ve R Rayleigh dalgaları içindir. LR ve LQ dalgaları Yeryuvarı'nın serbest yüzeyi boyunca veya Kabuk ve Üst Manto içerisindeki tabakalarda yayılırlar. Bu dalgalar kayıtlarda, yüzey dalgası treni üzerinde üst üste binmiş yüksek frekans bileşenler şeklinde görülen, farklı modlarda (mode/overtone) da yayılabilirler. Biz temel mod (fundamental mode) ve yüksek modlu (higher-mode) yüzey dalgalarından bahsedeceğiz. Yüksek modlar, çok sık olarak kıtasal yolları geçen dalgalarda gözlenmektedir. Bazı durumlarda, yüksek modlar okyanusal yollarla da ilişkilidir. Bununla birlikte, yüzey dalgaları kıtasal ve okyanusal yapılardan geçen yollarda yüksek mod göstermezler. Yüksek modlar temel moddan daha hızlı yayılırlar ve bu yüzden LQ ve LR'nin baş tarafında kaydedilirler.

LR ve LQ dalgalarının genlikleri yüzey veya yüzeye yakın derinlikte büyüktür ve derinlikle hızla (kabaca üstel olarak) azalır. Bu nedenle, sığ (kabuksal) depremler büyük yüzey dalgaları oluştururlar ve odak derinliğinin artmasıyla yüzey dalgaları gittikçe küçülür. Kabuksal (sığ) depremlerin sismogramlar genellikle yüzey dalgaları hakimdir ve derin depremler için ($h > 100\text{km}$) bu dalgalar sismogram üzerinde önemsiz hale gelirler. Bu durum, sığ depremlerin derin depremlerden kolaylıkla ayrılmasını sağlar.

Love ve Rayleigh dalgaları, hız dispersiyonu (velocity dispersion) gösterirler. Dispersiyon özeliği göstermiş yüzey dalgalarına ait yayılım hızları, P ve S dalgalarındaki gibi her periyod için stabil değil, değişkenlik gösterir ve dalga periyodu arttıkça hız da artar (normal dispersiyon). Pratikte bunun anlamı, uzun periyodlu yüzey dalgalarının sismik sensörlere ilk olarak gelir ve kısa periyodlu dalgalarından önce algılanırlar. Bu yüzden, L veya R dalgalarının olağan kayıtları uzun periyodlu hareketle başlar ve periyod zaman arttıkça yavaş yavaş kısalmır.

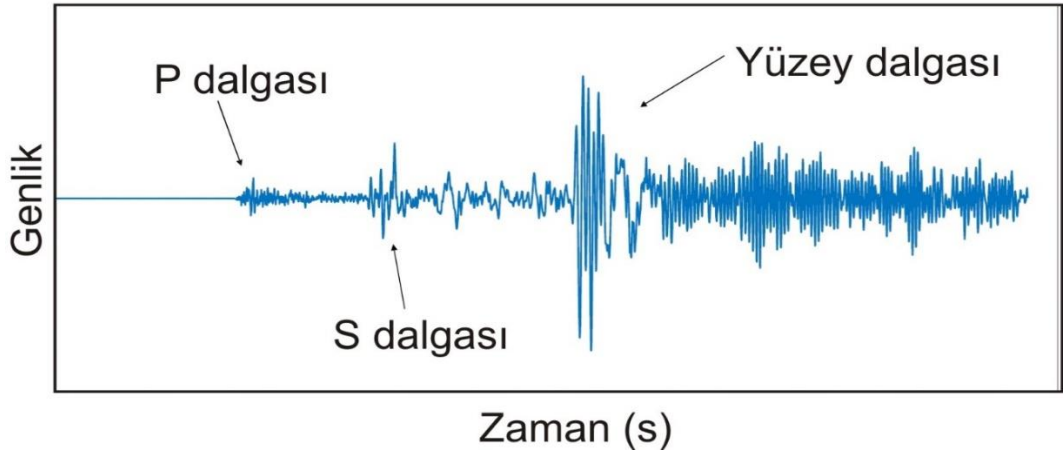
Rayleigh dalgalarında, kayaç taneciklerinin hareketi düşey düzlem içinde retrograd (retrograde) eliptik bir yörünge izler (Şekil 1.2.). Love dalgalarında düşey yönde bir tanecik hareketi yoktur. Tanecikler, dalga yayılımının yönüne dik yatay düzlemde hareket ederler (Şekil 1.2.). Cisim dalgalarının durumunda olduğu gibi, tanecik hareketinin farklı polarizasyonu, LQ ve LR yüzey dalgalarının ayrılmasını sağlayan önemli bir ipucudur. Örneğin, yukarıdaki tanımlamalara göre, düşey bileşen sismograflar Love dalgası kaydetmezler. Diğer önemli bir özellik de LQ dalgaları biraz daha hızlıdır ve bu yüzden sismogram üzerinde LR dalgasından önce görünürler.

Eğer belirli bir magnitüdün üzerindeki depremler incelenecek olursa, bu depremin sismik dalgaları sondaj kuyuları, okyanus dipleri, terk edilmiş madenler vb yerlere yerleştirilmiş Yeryuvarı üzerindeki tüm duyarlı sismograflar tarafından kaydedilebilirler. Dalgaların genlikleri olayın merkezinden uzaklaştıkça, elastik olmayan atenüasyon (soğurma), geometrik yayılım ve ara yüzey sınırlarındaki yansımalar ve kırılmalar şeklinde enerji kayıpları, mod dönüşümü, kırınım ve saçılma (scattering) etkileriyle azalım gösterir. Yüksek frekanlı dalgalar yüksek soğurma olayına maruz kalırlar ve bu yüzden enerjilerini hızla yitirirler, fakat yakın bölgedeki sismik cihazlar tarafından kaydedilebilirler.

Geometrik açılıma nedeniyle genlik azalımı frekansa bağlı değildir. Yeryuvarı'nın iç yapısı nedeniyle, belirli episantr uzaklıklarında, örneğin, 20° veya 144° civarında, yayılan sismik dalgaların enerjilerinin yoğunlaşması (odaklanması) meydana gelir. Bu uzaklıklarda kaydedilen sismik sinyallerde çoğu kez odaktan olan uzaklık artmasına rağmen genliğin arttığı görülür. Bu olay özel bir durumdur (birkaç dar uzaklık aralıklarında gözlenir) ve normalde, episantr uzaklığının artmasıyla genlikleri azalır.

Gelen sismik dalganın genliğini etkileyen diğer faktörler, kaynak mekanizması ve kaynak yayılım özellikleridir. Tektonik depremler, yeraltı patlatmalarının tersine, küresel simetrik nokta kaynak gibi davranmazlar, çünkü açığa çıkan sismik enerji, belirli yönlere yayılan, belirli dalga tipleri tarafından taşınır. Bu yüzden, aynı episantr uzaklığına, fakat farklı azimutlara sahip iki veya daha fazla sismograf kullanıldığında, depreme de bağlı olarak, kaydedilen sismik dalgaların genliklerinde önemli farklılıklar görülecektir. Yine, sismograflar farklı azimutlarda yerleştirilirse, gelen P ve S dalgaları arasındaki genlik oranlarında da farklılık görülecektir.

Farklı tiplerdeki sismik dalgalar farklı hızlara sahip oldukları için, kayıt istasyonlarındaki varış zamanları birbirinden iyi bir şekilde ayrılır ise, bu dalgaların sismogram üzerinde tanınmaları, kuramsal olarak, zor değildir. Kısa mesafelerde ve sık depremlerde bu dalgalar S dalgasının gelişinden hemen sonra gelirken, telesismik mesafelerdeki derin depremler için zaman farkı daha büyüktür (Şekil 1.3.). Bununla birlikte, bu örnekte, P veya S dalgalarının genliklerine göre gürültü oranı çok düşüktür. P dalga treninde genliklerindeki (P koda olarak adlandırılır) azalmanın çok fazla olması nedeniyle, S başlangıcı da kolaylıkla tanımlanabilmekte ve varış zamanları doğru olarak ölçülebilmektedir. Ne yazık ki, günlük çalışmalarında karşılaşılan pek çok kayıt, yüksek gürültü içerir ve gürültü tarafından örtülen çeşitli dalga varışları tanınmaz duruma gelir. Bu küçük ve/veya uzak depremlerde böyledir.



Şekil 1.3. Telesismik mesafeden kaydedilmiş güçlü bir deprem için tipik bir sismogram: Önce P dalgaları, ardından S dalgaları ve en yıkıcı enerjiye sahip olan yüzey dalgaları gelir. Her bir dalga türünün gelişi açıkça ayırt edilebilir (Hohensinn, 2019).

Yeryuvarı her zaman hareket halindedir. Sanayi, trafik, inşaat faaliyetleri gibi farklı türdeki insan kaynaklı aktiviteler nedeniyle oluşan gürültüler kültürel gürültü (cultural noise) olarak nitelendirilir. Bunların hakim frekansları genellikle 1 Hz'in yukarısındadır. Genellikle yakın uzaklıkta kaydedilirler, bu nedenle lokal öneme sahiptirler. Özellikle yakın bölgede meydana gelen sismik olayların kayıtlarını kirlitebilirler. Mikrosismik türdeki gürültüler ise (microseismic noise) atmosfer, yeryuvarı ve okyanuslar arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Bu gürültü türünün hakim periyodu 0.01 Hz ile 0.5 Hz'e aralığındadır. Oldukça genel bir tanımlamayla mikrosismik gürültüler sabit olarak yaklaşık 6s civarındadır. Bu gürültüler birkaç yüz kilometrik uzaklıklardan bile kaydedilebilirler. Süreleri birkaç saatten birkaç haftaya kadar sürebilir. Sismik kayıtçılar tarafından algılanarak uzak alan olayların üzerine binebilirler. Aynı zamanda periyodları veya frekansları mevsimsel olarak değişkenlik gösterebilir.

Sismik dalgalar bir süreksizlikle karşılaşınca yansır ve/veya kırılır (Yeryuvarı'nın serbest yüzeyinden aşağı doğru yansır) ve gelen bir P veya S dalgası, S ve P dalgaları oluştururlar (mod dönüşümü-*mode conversion*). Böylece, bir uzak depremin sismogramında, zaman içinde dağılmış, az çok farklı ve çok sayıda faz adı verilen, farklı yayınım yollarında ilerleyen, P'nin S'ye ve S'nin P'ye dönüşümleri ile oluşan, farklı dalgalar görülür.

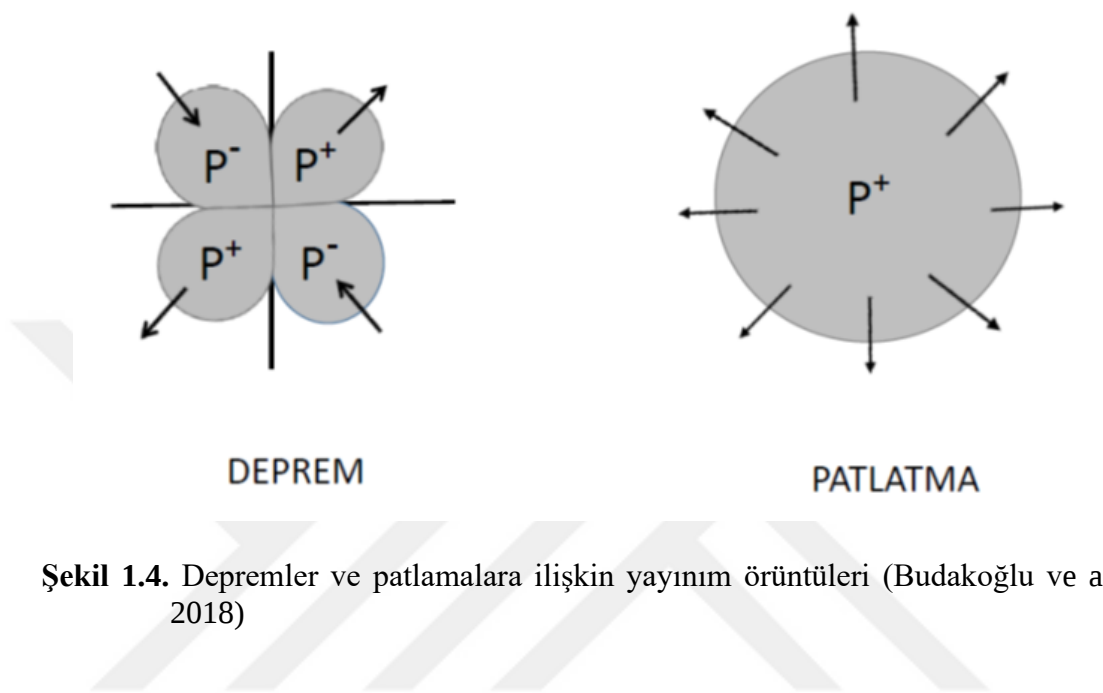
Dalga enerjisi, aynı zamanda, geçilen yayınım yollarındaki hız heterojenitesinden dolayı saçılır (*scattered*). Verilen bir periyod için, S dalgasının saçılma etkisi P

dalgasından daha fazladır. Saçılan dalgalar, Yer yüzeyine P dalgasından sonra gelirler ve P kodasının oluşmasına yardımcı olurlar (bunlar sonradan, anlaşılması güç fazlara dönüşür). Bu yüzden, P ilk varışı hariç, sonraki tüm varışlar, kendisinden önce gelen fazların kodasından etkilenir.

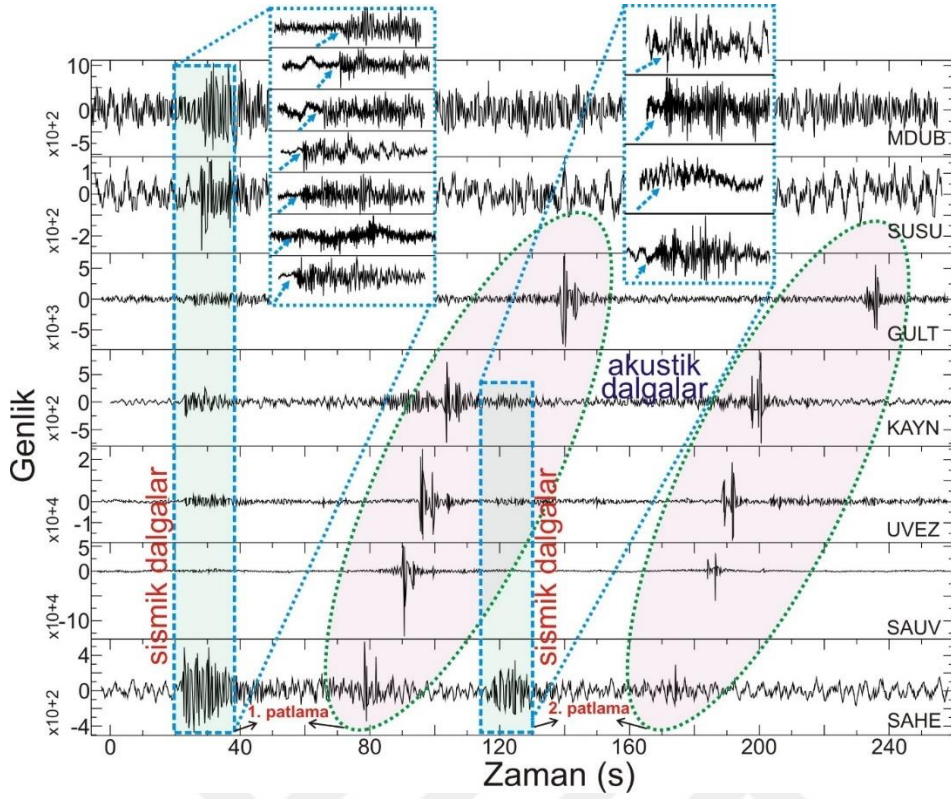
1.4. Deprem ve Deprem Olmayan Sismik Kaynaklar Arasındaki Farklar

Deprem ve patlamalar gerçekleştiği esnada çok büyük miktarda enerjiyi ortama salarlar. Dalga biçimleri açısından değerlendirildiğinde ise bu olaylara ilişkin kuvvetler farklı olduğundan dalga şekillerinde de farklılıklar mevcuttur. Patlamalar yeryüzeyinin oldukça sığ kesiminde meydana gelirler. Gerçekleştikleri esnada açığa çıkan bütün enerji hacimsel olarak küçük bir kaynaktan yayılır. Patlamaların kuvvet mekanizması irdelendiğinde her yöne eşit kuvvetlerin olduğu bir kuvvet mekanizması söz konusudur (Şekil 1.4.). Büyük bir patlama meydana geldiğinde hızlı bir şekilde kimyasal tepkime başlar. Tepkime ilerledikçe patlayıcı malzeme oldukça yoğun, çok sıcak ve yüksek derecede basınçlı gaza dönüşür. Patlama başlangıcında patlayan malzeme yüksek sıcaklıklarda ortamdaki hava ile denge girişiminde bulunur ve açığa yüksek basınçlı bir şok dalgası ortaya çıkar. Şok dalgaları, elastik bir ortamda basınçta ciddi değişiklikler yaratan olaylar (örneğin patlamalar) tarafından üretilen güçlü basınç dalgalarıdır. Sıkıştırmanın meydana geldiği dalga cephesi, stres, yoğunluk ve sıcaklıkta ani ve şiddetli değişimlerin olduğu bir bölgedir. Bu nedenle şok dalgaları akustik dalgalardan farklı şekilde yayılır. Şok dalgaları sestten daha hızlı hareket eder ve genlik arttıkça hızları da artar. Patlamaların neden olduğu küresel şok dalgalarının şiddeti, patlama merkezinden uzaklaştıkça hızla azalarak ses hızına (standart koşullarda ortalama 340 m/s) eşit hale gelir. Şok dalgasının yoğunluğu akustik dalganın yoğunluğundan daha hızlı azalır (Budakoğlu, 2022). Akustik dalga formları sismik dalga formlarına göre daha keskin bir başlangıca ve daha kısa süreye sahiptir (Koper ve ark. 2002). Genlikleri kaynağın gücüne, zayıflamaya ve yayıldıkları ortamdaki saçılmaya bağlıdır. Akustik dalga hızı atmosferdeki rüzgar ve sıcaklıkla ilişkilidir (Koper ve ark. 2003; Settles 2006; Evers ve ark. 2007; Gitterman 2013; Schneider ve ark. 2018). Patlamalar sırasında yüksek basınçlı, dik ve anlık şok dalgası cepheleri oluşur. Daha sonra şok dalgası cepheleri kaynaktan uzaklaştıkça ses hızında hareket eden akustik dalga cephesi gibi davranmaya başlar. Akustik dalgalara olan bu hızlı dönüşümler sismogramlara kaydedilir (Şekil 1.5.). Patlayıcı şok dalgasının aşırı yüksek basıncı, patlama anında yüksek tahribat yaratır. Şok cephesi patlamadan

uzaklaştıkça dalga biçimi yumuşar ve basınç düşer. Aynı zamanda mesafe boyunca yüksek frekansların soğurma kayıpları şok cephesinin yumuşamasına neden olur. Yüzeydeki patlamalarda sismik dalga yayılımı da meydana gelir. Şok ve sismik dalgalar sismometreler tarafından kaydedilerek sismogramlarda gözlemlenebilir (Şekil 1.5.).



Şekil 1.4. Depremler ve patlamalara ilişkin yayılım örüntüleri (Budakoğlu ve ark. 2018)



Şekil 1.5. Bir patlama (3 Temmuz 2020 Hendek/Sakarya havaifişek patlaması) esnasında farklı istasyonlar tarafından kaydedilen sismik ve akustik dalgalar (Budakoğlu 2022)

Depremler ise yeryüzeyinin kilometrelerce derinliklerinde meydana gelirler. Açığa çıkan enerji fay yüzeyinden salınırlar ve enerjinin boyutu fay boyutuna bağlı olarak değişebilir. Depremleri meydana getiren fayların kırılması zıt kuvvet çiftleri ile temsil edilir. Depremler sismogramlarda derinlik, kaynak ile kayıcı arasındaki mesafe ve boyuttaki farklılıklara göre değişik dalga formlarında gözlemlenebilirler. Deprem ve patlatmaların sismogramlarda sergiledikleri özellikler bunların birbirine göre sınıflandırılmasını sağlar. Bu özellikler kısaca şu şekildedir:

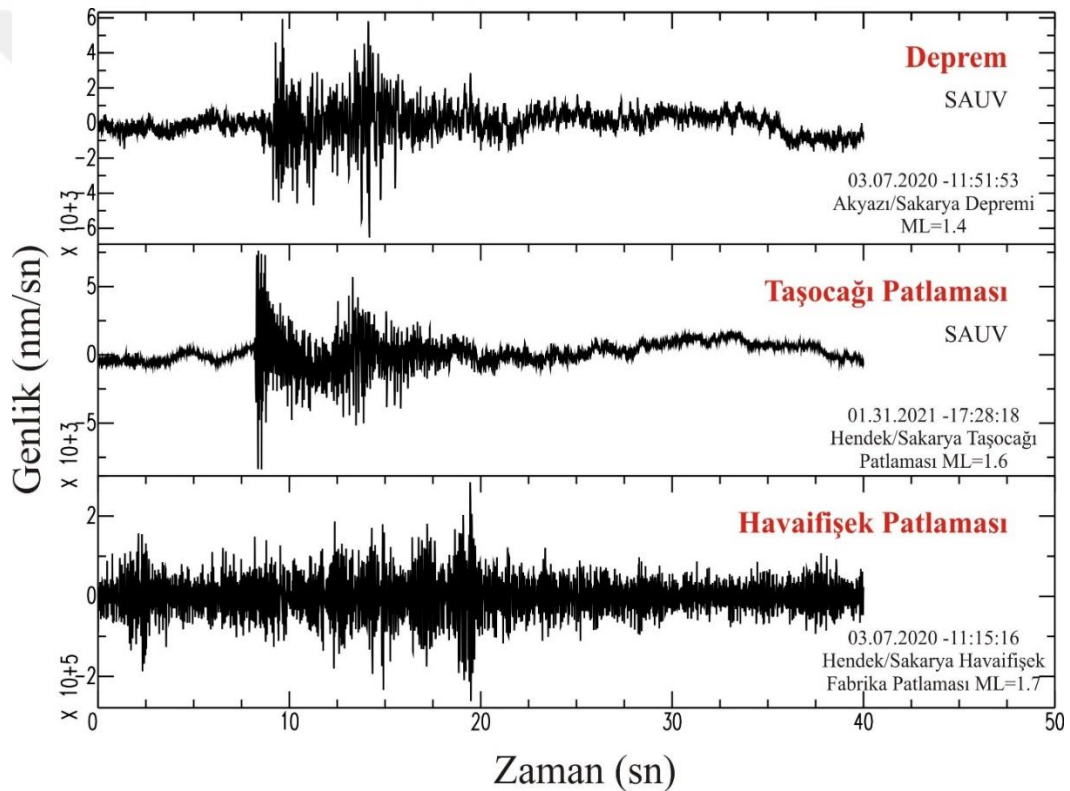
Patlatmalar:

- İstasyona gelen ilk dalga'nın hareket yönü yukarı yönlüdür;
- P dalgaları genlikleri daha büyüktür;
- Her en kadar teoride S dalgaları gözlenmese de pratikte S dalgaları gözlemlenir;
- Olayın kaynağı yapay olduğu için konumu, zamanı ve patlayıcı madde miktarı kişiye bağlı olabilir ya da kaza eseri gerçekleşen patlamalarda olmayabilir;

- Kuvvet mekanizması açısından değerlendirildiğinde her yöne hemen hemen eşdeğer kuvvetlerin uygulanır.

Depremler:

- İstasyona gelen ilk dalganın hareket yönü yukarı yada aşağıya yönlü olabilir;
- Küçük P dalgası genliği ve
- S dalgası genliği gözlemlenir.
- Depremlerde kaynak doğal olduğu için konumu, zamanı ve büyüklüğü gerçekleşmeden önce bilinemez;
- Kuvvet mekanizmaları zıt kuvvet çiftlerinden oluşur.



Şekil 1.6. Farklı türdeki sismik olayların (deprem, taş ocağı patlaması ve havaifişek patlaması) düşey bileşen sismogramlarına ait dalga şekilleri

Şekil 1.6.'da kaynakları farklı olan sismik olaylara ilişkin sismogramlar verilmiştir. Sismogramlar incelendiğinde depremlerde P ve S dalgaları net bir şekilde gözlemlenmektedir. Taş ocağı patlatma kaydında ise P dalgası çok daha baskındır. Aynı durum havaifişek patlaması için de geçerlidir. Patlamalar oldukça sık ya da yerin yüzeyinde gerçekleştiğinden ve sismik mekanizma farklılıklarından ötürü S dalgaları üretmezler. Bu nedenle sismogramlarda gözlemlenmezler. Havaifişek patlaması

sismogramındaki karmaşıklık dikkat çekicidir. Muhtemel ardışık patlamalar nedeniyle sismogramlar oldukça karmaşık gözükmektedir. Ayrıca bu tür patlamalar yeryüzünün çok sığı veya yüzeyinde meydana geldikleri için enerjilerinin bir kısmı atmosfere yayılırlar. Bu nedenle kuvvetli sismik dalgalar üretmezler. Kabaca bu tür farklılıklarla bile sismogramlarda sismik olaylar yüksek güvenilirlikle tanımlanabilir.



2. ANALİZLERDE KULLANILAN PROGRAMLAR VE YÖNTEMLER

Sismik olaylar sismogramlarda kaydedildikten sonra detaylı analizleri zaman ve frekans (time-frequency domain) ortamında yapılabilir. Olayın zamanı, konumu, büyüklüğü, sınıflandırılması, kaynak türünün tespiti, ardışık olayların tespiti ve patlayıcı verim hesabı gibi farklı parametreler bu sayede elde edilebilir. Örneğin bir patlamanın hemen sonrasında çok sayıda ardışık patlama gerçekleşebilir. Bunlar birbirlerini maskeleyebileceği için zaman ortamında tespit etmek oldukça güçtür. Frekans ortamında yararlı bir analiz imkanı sunabilmesi açısından daha sağlıklı bilgiler edilebilir (Kristekova ve ark. 2008).

Bu çalışmada farklı türde sismik olaylar zaman ve frekans ortamında incelenmiştir. Verilerin analizlerinde ve görüntülenmesinde zSacWin EQ Processing bilgisayar yazılımı kullanılmıştır (Yılmaz 2012). Sismik olaylara ilişkin dalga şekillerinin zaman ve frekans ortamında analizi için Seismic Analysis Code (SAC) analiz paketi tercih edilmiştir (Goldstein ve ark. 2003; Goldstein ve Snoke 2005). SAC sismik verilerin (uzak veya bölgesel) genel analizinin yapılması ve bunların işlenmesi için oldukça sıklıkla kullanılan ücretsiz bir program paketidir. SAC ile sismik olaylar zaman ortamında görüntülenebilir, fourier genlik spektrumları ve spektrogramları elde edilebilir.

Ayrıca bir sismik olay sonrası adli soruşturmalara ışık tutmak amacıyla patlayıcı madde miktarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda çok sayıda yöntem bulunmaktadır. İleriki bölümlerde bunlardan sıklıkla kullanılanlar detaylandırılacaktır.

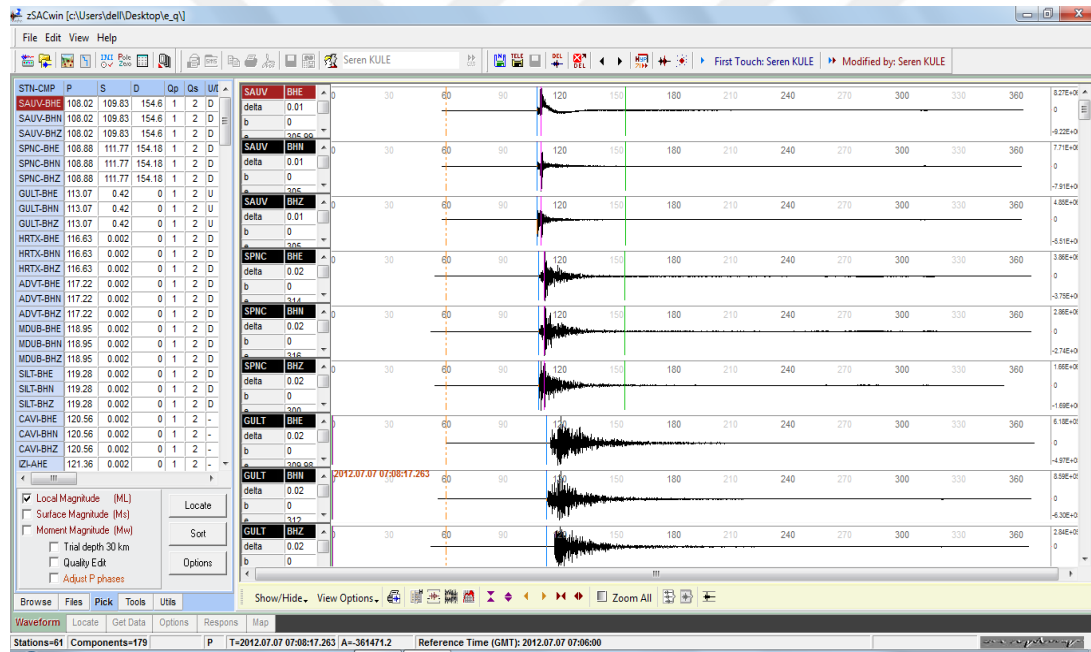
2.1. zSacWin EQ Processing Bilgisayar Yazılımı

zSacWin yazılımı, depremin çözümünden sonuçların dağıtılması aşamasına kadar, otomatik olarak ya da kullanıcı denetiminde çalışabilecek özellikte bir yazılımdır (Şekil 2.1.) (Yılmaz 2012). zSacWin'in yaptığı işlemler zinciri sonucunda depremle ilgili olarak aşağıdaki bilgilere ulaşılır (Yılmaz 2012).

- Depremin coğrafik koordinatları

- Odak derinliği
- Deprem merkezine en yakın yerleşim birimi.
- Deprem büyüklüğü. Bu kapsamda yazılım Süreye Bağlı Büyüklük (M_d), Lokal Büyüklük (M_L), Yüzey Dalgası Büyüklüğü (M_s) ve Moment Büyüklüğü (M_w) olmak üzere dört ayrı yöntemle depremin büyüklüğünü hesaplar.
- Faylanma bileşenleri. Kırılma doğrultusu, eğim ve kayma açısı
- Açığa çıkan enerji

Bu çalışmada zSacWin yazılımı verilerin görüntülenmesi, zamansal olarak birleştirme işlemi (merge) yapılması ve veri dönüşümü işlemleri aşamasında kullanılmıştır. Aynı zamanda birden fazla istasyonda incelenen sismik olayın bir izinin olup olmadığı analizleri yapılmıştır.



Şekil 2.1. zSacWin yazılımında bir depremin farklı istasyonlarındaki sismogram kaydının görünümü

2.2. Seismic Analysis Code (SAC)

SAC, ardışık sinyallerin, özellikle zaman serisi verilerinin incelenmesi için tasarlanmış genel amaçlı etkileşimli bir programdır. Sismik olayların ayrıntılı incelenmesinde sismologlar tarafından sıklıkla kullanılan bir analiz aracıdır. Analiz yetenekleri genel aritmetik işlemleri, Fourier dönüşümlerini, üç spektral tahmin tekniğini, IIR ve FIR filtrelemeyi, sinyal yığmayı, enterpolasyon, korelasyon ve sismik faz toplamayı içerir.

SAC ayrıca kapsamlı bir grafik yeteneğine sahiptir. Intel Mac ve Linux için sürümler mevcuttur ancak SAC, diğer bilgisayar işletim sistemlerinin kaynak kodundan oluşturulabilir. Kaynak kodu C dilinde yazılmıştır.

SAC, Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı'nda geliştirilmiştir ve telif hakkı California Üniversitesi'ne aittir. Şu anda IRIS ile iş birliği içinde çalışan küçük bir geliştirici grubu tarafından geliştirilmeye ve sürdürülmeye başlanmıştır (<https://seiscode.iris.washington.edu/projects/sac>).

SAC mantıksal olarak işlevsel modüllere bölünmüştür. Her fonksiyonel modül ilgili bir dizi görevi yerine getirir. Veri Dosyası Modülü (Data File Module), veri dosyalarını okumak, yazmak ve bunlara erişmek için kullanılır. Bu modül içinde kullanışlı bazı komutlar vardır. READ, veri dosyalarını diskten belleğe okur ve WRITE, bellekte bulunan verileri diske yazar. CUT, bir veri dosyasının ne kadarının okunacağını tanımlar. CUTIM, bellekteki her dosyadaki birden fazla bölüme CUT uygular. READERR, dosyalar okunurken oluşan hataları kontrol eder ve CUTERR, hatalı kesim parametrelerinden kaynaklanan hataları kontrol eder. Her veri dosyasında, dosyanın içeriğini açıklayan bir başlık bulunur. READHDR ve WRITEHDR kullanarak bu başlıkları veri olmadan okuyabilir ve yazabilirsiniz. Ayrıca içerikleri listeleyebilir (LISTHDR), değerleri değiştirebilir (CHNHDR) ve başlık değerlerini bir dosyadan bellekteki diğerlerine kopyalayabilirsiniz (COPYHDR). SYNCHRONIZE komutu bellekteki başlıkları değiştirerek hepsinin aynı referans zamanına sahip olmasını sağlar. Referans zamanları farklı olan dosyalar üzerinde CUT komutunu kullanmadan önce bu komutu kullanmanız gerekir.

Spektral Analiz Modülü ise verilerin frekans ortamında analiz edilmesine olanak sağlar. Bu modül sayesinde Ayrık Fourier dönüşümü (FFT) ve ters dönüşüm (IFFT) yapılabilmektedir. Ayrıca bir sinyalin genliğini ve fazını da hesaplayabilirsiniz. (UNWRAP). Verilere uygulanabilecek çok sayıda filtre komutu bulunmaktadır.

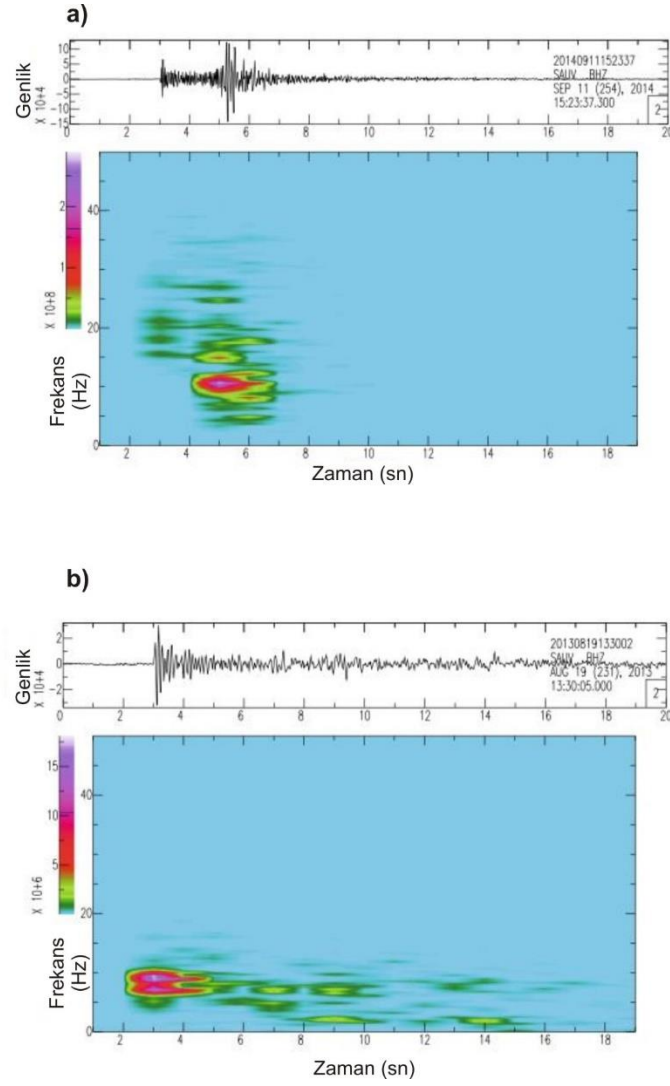
(BANDPASS, BANDREJ, LOWPASS ve HIGHPASS, WIENER). Ayrıca iki özel filtre (BENIOFF ve KHRONHITE) bulunmaktadır. CORRELATE komutu, otomatik ve çapraz korelasyon işlevlerini hesaplar. CONVOLVE, otomatik ve çapraz evrişim işlevlerini hesaplar. FFT ve UNWRAP komutları bellekte spektral veriler üretir. Bu spektral verileri çizebilir (PLOTSP), diske "normal" veriler olarak yazabilir (WRITESP) ve tekrar tekrar okuyabilirsiniz (READSP). Ayrıca doğrudan frekans

alanında entegrasyon (DIVOMEGA) ve farklılaşma (MULOMEGA) gerçekleştirebilirsiniz. HANNING, her veri dosyasına bir "hanning" penceresi uygular. HILBERT, Hilbert dönüşümünü uygular. ENVELOPE, Hilbert dönüşümünü kullanarak zarf fonksiyonunu hesaplar. KEEPAM, spektral dosyaların genlik bileşenini (AMPH veya RLIM formatında) SAC belleğinde tutar.

2.3. Spektrogram

Spektrogram, belirli bir dalga biçiminde mevcut çeşitli frekanslarda bir sinyalin zaman içindeki sinyal gücünü veya "yüksekliğini" temsil etmenin görsel bir yoludur (Şekil 2.2.). Örneğin 1 Hz'e karşı 15 Hz'de enerjinin daha fazla mı yoksa daha az mı olduğunu görmekle kalmaz, aynı zamanda enerji seviyelerinin zaman içinde nasıl değiştiğini de görebiliriz. Diğer bilimlerde spektrogramlar, insanlar, makineler, hayvanlar, balinalar, jetler vb. tarafından üretilen ses dalgalarının mikrofonlar tarafından kaydedilen frekanslarını görüntülemek için yaygın olarak kullanılır. Spektrogramlar, farklı türdeki sismik olayları ayırt etmeye ve karakterize etmeye yardımcı olmak amacıyla, tek veya sismik ağlar tarafından kaydedilen sürekli sinyallerin frekans içeriğine bakmak için giderek daha fazla kullanılmaktadır (<https://pnsn.org/spectrograms/>).

Spektrogramlar temel olarak iki boyutlu grafiklerdir ve üçüncü boyutu renklerle temsil edilir. Zaman yatay eksen boyunca soldan sağa doğru ilerler. Düşey eksen, en düşük frekanslar altta ve en yüksek frekanslar üstte olacak şekilde perde veya ton olarak da düşünülebilecek frekansı temsil eder. Belirli bir zamanda belirli bir frekansın genliği (veya enerjisi veya "yüksekliği") üçüncü boyut olan renkle temsil edilir; açık maviler düşük genliklere karşılık gelir ve daha parlak renkler, giderek daha güçlü (veya daha yüksek) genliklere karşılık gelen kırmızıya ve daha sonra mora kadar uzanır (Şekil 2.2). Spektrogramın üstünde, spektrogramla aynı yatay zaman eksenini kullanarak çizilmiş ham sismogram bulunur ve dikey eksen dalga genliğini temsil eder. Spektrogram-sismogram kombinasyonu toplu olarak çok güçlü bir görselleştirme aracıdır, çünkü sismik olayların ham dalga şekillerini ve ayrıca çeşitli frekanslardaki kuvveti veya değişikliği görmemize olanak tanır.

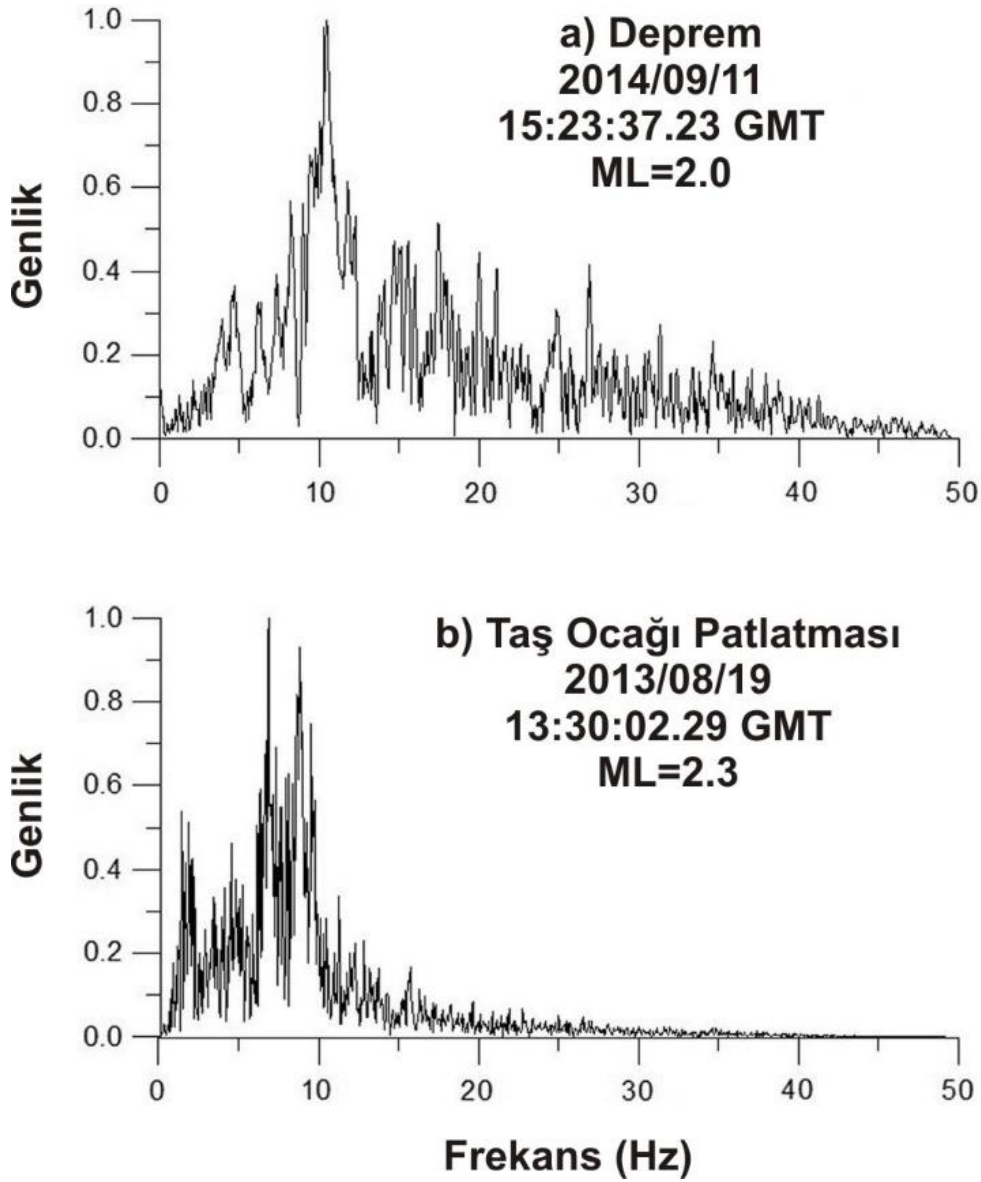


Şekil 2.2. Deprem (a) ve taş ocağı patlatmasına (b) ilişkin spektrogram örneği (Budakoğlu ve Horasan, 2018)

2.4. Fourier Genlik Spektrumu

Periyodik bir fonksiyonun Fourier katsayıları arasında çizilen grafik $x(t)$ ve frekans (ω), periyodik bir sinyalin Fourier spektrumu olarak bilinir. Periyodik bir fonksiyonun Fourier spektrumu iki bölümden oluşur. Genlik Spektrumu, periyodik sinyalin genlik spektrumu, Fourier katsayılarının genliğine karşı frekans grafiği olarak tanımlanır. Faz Spektrumu ise Fourier katsayılarının fazının frekansa göre grafiğine sinyalin faz spektrumu denir. Genlik spektrumu ve faz spektrumu birlikte periyodik sinyalin $x(t)$ Fourier frekans spektrumu olarak bilinir. Fourier frekans spektrumu yalnızca ayrık frekanslarda mevcuttur (yani $n = 0, 1, 2, 3, \dots$). Bu nedenle Fourier frekans spektrumları ayrık spektrumlar veya çizgi spektrumları olarak da bilinir. Fourier

frekans spektrumunun zarfı yalnızca pulsun şekline bağlıdır, tekrarlama periyoduna bağlı değildir.



Şekil 2.3. Sakarya’da bulunan SAUV istasyonunda kaydedilen deprem (a) ve taş ocağı patlaması (b) için normalleştirilmiş genlik spektrumları

Şekil 2.3.’de bir deprem ve taş ocağı patlatmasına ilişkin fourier genlik spektrumu örneği verilmiştir. Sismik olayların genlik spektrumları çizdirilerek farklılıkları üzerinden sınırlandırma veya ayırma konusunda yorumlar yapılabilir.

2.5. Sismik Olayın Büyüklüğü ile Patlayıcı Verim Miktarının Belirlenmesi

Patlayıcı madde miktarının tespit edilmesi için sismik olayın büyüklük parametresi sıklıkla tercih edilmiş ve bu doğrultuda deneysel bağıntılar elde edilmiştir (Bache 1982;

Nuttli 1988; Bowers ve ark. 2001; Brocher 2003; Ottemöller ve Evers 2008; Ford ve ark. 2014; Zhao ve ark. 2016). Farklı patlama türleri, büyüklük ölçümünü bir verim tahminine dönüştürmek için uygun bir deneysel bağıntılar gerektirir. Bu yöntemdeki zorluk patlamanın gerçekleştiği konumun önemli olmasıdır. Patlamanın karada, su altında ya da havada meydana gelmesi hesaplanacak verim miktarında önemli değişiklikleri beraberinde getirir.

Ayrıca, örneğin karada bir patlama meydana geldiyse bunun da yüzeyde mi, yüzeye yakın bir bina içinde mi, yüzeyin çok sık bir kesiminde oluşması patlayıcı madde miktarının belirlenmesinde önemlidir. Sismogramlarda kaydedilen sismik dalgalardan olayın büyüklüğünün hesaplandığı düşünülürse yüzey patlamalarında yere daha az enerji aktarımı ve atmosfere daha geniş bir enerji salınımı söz konusu olduğu için belirlenen patlayıcı miktarının bir alt sınırı temsil edeceği gerçeği göz önünde bulundurulmalıdır. Bowers ve ark. (2001) tarafından cisim-dalga büyüklüğü arasında bir ilişki geliştirmiştir.

$$m_b = (0.73 + 0.64 M_L) / 0.77 \quad (2.1)$$

$$m_b = 4.25 + \beta \log_{10} W \quad (2.2)$$

Burada W patlama verimi (kt), $W < 1$ kt ise $\beta = 1$; $W \geq 1$ kt ise $\beta = 0,75$ 'tir (Zhao ve ark. 2016).

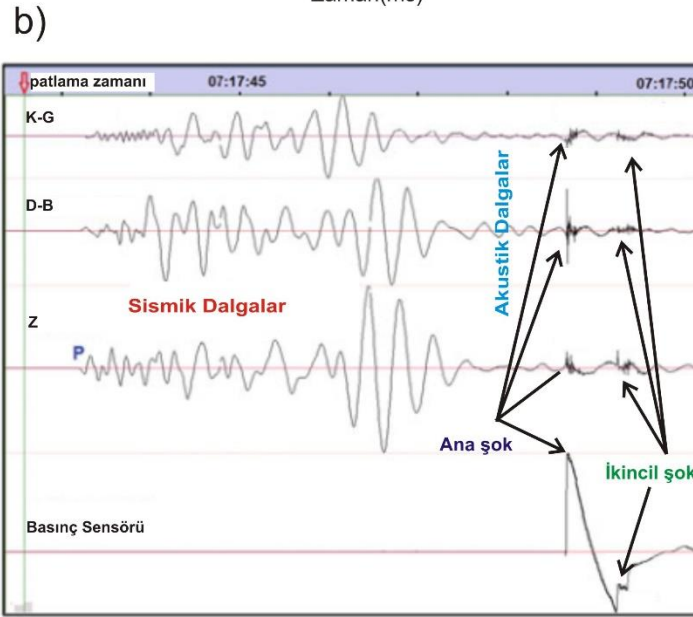
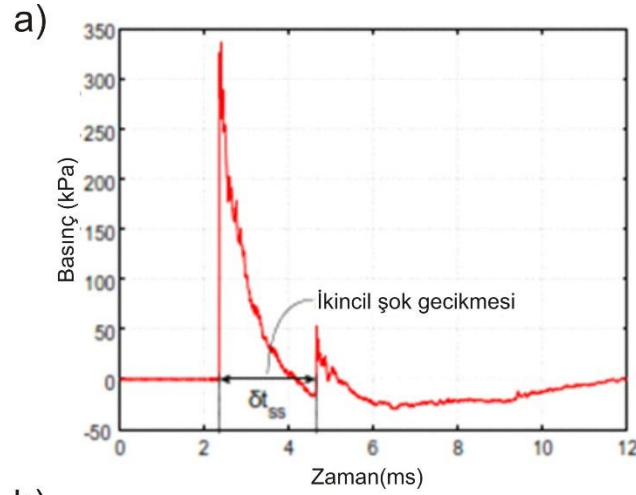
2.6. İkinci Şok Dalgası ile Patlayıcı Verim Miktarının Belirlenmesi

Bir patlayıcı maddenin patlaması üzerine, patlayıcı maddenin ekzotermik patlamasıyla desteklenen bir yüksek basınç dalgası, patlayıcı madde boyunca karakteristik bir patlama hızı (Vod) ile ilerler. Bu dalga patlayıcının kenarına ulaştığında, reaksiyona giren yüksek patlayıcı ürünler genişlemeye başlar ve havayı yerçekimi ivmesinden yaklaşık 10-11 mertebe daha büyük bir hızla hızlandırır (Needham 2010). Bu, patlama noktasından uzağa yayılan birincil bir şok dalgasının oluşmasına neden olur. Patlama ürünlerinin ardışık olarak yayılması, iç kısmın seyrekleşmesine ve patlama noktasına yaklaşan ve yansıyan geriye doğru hareket eden bir şok dalgasının oluşmasına neden olur. Dışa doğru hareket eden bu şok dalgası birincil şokun ardından çevredeki havaya yayılır ve 'ikincil şok' olarak bilinir (Şekil 2.4.). Bu ikincil şok reaksiyon gazları ile hava arasındaki ara yüze ulaştığında, ardışık bir seyrelme dalgası patlayıcıdan geri yayılır ve üçüncül bir şok oluşturur. Bu süreç, patlama ürünü gaz bulutundaki enerji

dağılına kadar tekrarlanır (Brode 1955). Üçüncül ve sonraki şoklar çok az öneme sahipken ve genellikle deneysel olarak ölçülmesi zorken, ikincil şok, patlama basıncı-zaman geçmişlerinin deneysel ölçümlerinde yaygın bir özelliktir ve tipik olarak negatif fazın başlangıcından sonra gelir. Açıkça var olmasına rağmen, ikincil şok genellikle göz ardı edilir ve ikincil şokun ve etkisinin analizine adanmış çok az çalışma vardır (Rigby ve Gitterman, 2016).

Gitterman (2014) yaptıkları çalışmalarda geniş ölçekli mesafe aralığında bir dizi patlayıcı için ikincil şok parametrelerini derlemiştir; burada ölçekli mesafe patlayıcı merkezinden algılayıcıya olan mesafenin şarj kütlesinin küp köküne bölünmesiyle verilir, $Z=R/W^{1/3}$.

Bu yöntemde, ikincil şok gecikme parametresi δt_{ss} (ana ve ikincil şoklar arasındaki süre) belirlenmiş ve ölçeklendirilmiş gecikme ($\delta t_{ss}/W^{1/3}$) ile mesafe arasında açık bir ilişki bulunmuştur. Sonuçlar, ikincil şokun oluşum süresinin (yani gecikmenin) patlayıcı tipine (ANFO, PE4, PETN, TNT) güçlü bir şekilde bağlı olduğunu, ancak makul bir şekilde herhangi bir patlayıcı için tutarlı olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 2.4. İkincil şok özelliklerini gösteren basıncı kaydı örneği (a) ,Bir hız sismometresi ve basınç ölçerde sismik dalgalar ve akustik dalgaların gelişi ve anaşok-ikincil şokların gösterilmesi. δt_{ss} : İkincil şok gecikmesi (b) (Gitterman 2013)

Rigby ve Gitterman (2016) ikincil şok gecikmesinin patlayıcı kimyasıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Yüzey patlama testleri sonucunda bileşik yoğunluğu (ρ) ve patlama hızının (V_{od}) dikkate alındığı bir denklem sunmuşlardır.

$$\tau_{ss} = \delta t_{ss} * V_{od} / (\rho W)^{1/3} \quad (2.3)$$

$$\tau_{ss} = 2.45 * \log_{10}(Z) + 1.36 \quad (2.4)$$

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2.5)$$

Burada τ_{ss} , ikincil şok dalgası parametresi; δt_{ss} , ikincil şok dalgası gecikme süresi (s); W patlayıcı maddenin ağırlığıdır (kg); R , mesafe ($m/kg^{1/3}$); Vod , patlama hızı (m/sn) ve ρ patlayıcının yoğunluğudur (kg/m^3). Bu denklem sayesinde patlayıcının kütlesi, belirli bir mesafede kaydedilen ikincil şok dalgası gecikmesi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Burada en önemli gereklilik patlayıcının cinsinin bilinmesidir.

Bu yöntem sayesinde her ne nedenle olursa olsun bir patlama meydana geldiğinde belirli bir mesafede kaydedilirse eğer patlayıcının türü biliniyorsa patlayıcının ağırlığı belirlenebilir. Patlayıcı türü bilinmiyorsa, yaygın olarak kullanılan birçok patlayıcı için bir dizi farklı olası patlama senaryoları kolaylıkla oluşturulabilir. Bu, terör saldırılarının neden olduğu bina hasarlarını araştırırken potansiyel olarak değerli bir teşhis aracı olabilir. Aynı zamanda bu yöntemler patlayıcı maddenin hızı tespit edilebilir. Yöntemin bir kolaylığı geleneksel basınç sensörlerinin yanında sismik ya da akustik sensörlerden de ikincil şok dalgasının belirlenip uygulanmasıdır. Yüksek hızlı video kameralarda bu amaca hizmet edebilir (Rigby ve Gitterman, 2016).

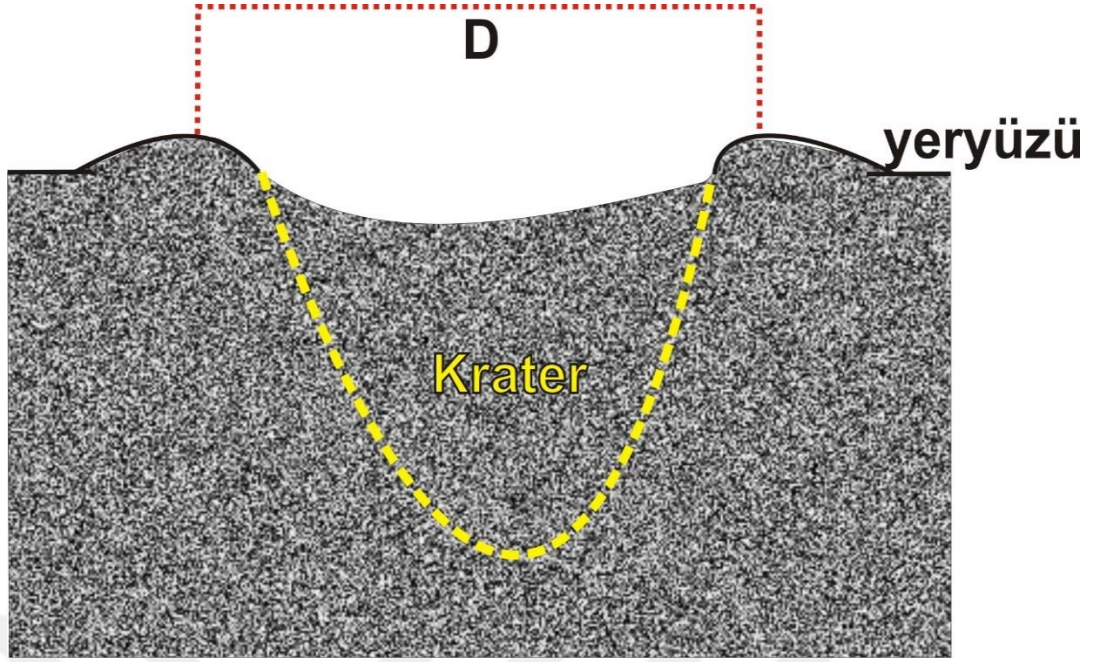
2.7. Krater Boyutları ile Patlayıcı Verim Miktarının Belirlenmesi

Verim tahmininde tercih edilen yöntemlerden biri de patlama sırasında oluşan kraterin geometrisine ve boyutlarına (derinlik ve çap) göre yapılan hesaplamadır (Ambrosini ve Luccioni 2007; Gitterman ve Hofstetter 2014). Yöntemin zorluğu, oluşan kraterin patlayıcının türü, patlamanın odağı, zeminin yapısı, kuru veya doymuş yeraltı gibi birçok parametreye bağlı olmasından kaynaklanan hesaplama hataları barındırmasıdır. Kinney ve Graham (1985) 200 adet yüzey atışından elde edilen verileri kullanarak bir eşitlik sunmuştur.

$$D(m) = 8 * W^{1/3} \quad (2.6)$$

Burada W ton cinsinden TNT eşdeğeridir; D patlama sırasında oluşan kraterin çapıdır. (Şekil 2.5.). Bu eşitlik yüzey ve yüzey üstündeki patlamalar için kullanılabilir. Patlamanın yeryüzünün hemen üstünde gerçekleşmesi ile kullanılacak krater çapı ve patlayıcı arasındaki ilişki ise aşağıdaki gibidir.

$$D(m) = 4.2 * W^{1/3} \quad (2.7)$$



Şekil 2.5. Patlama sonucu oluşan krater boyutu şematik gösterimi.



3. UYGULAMA

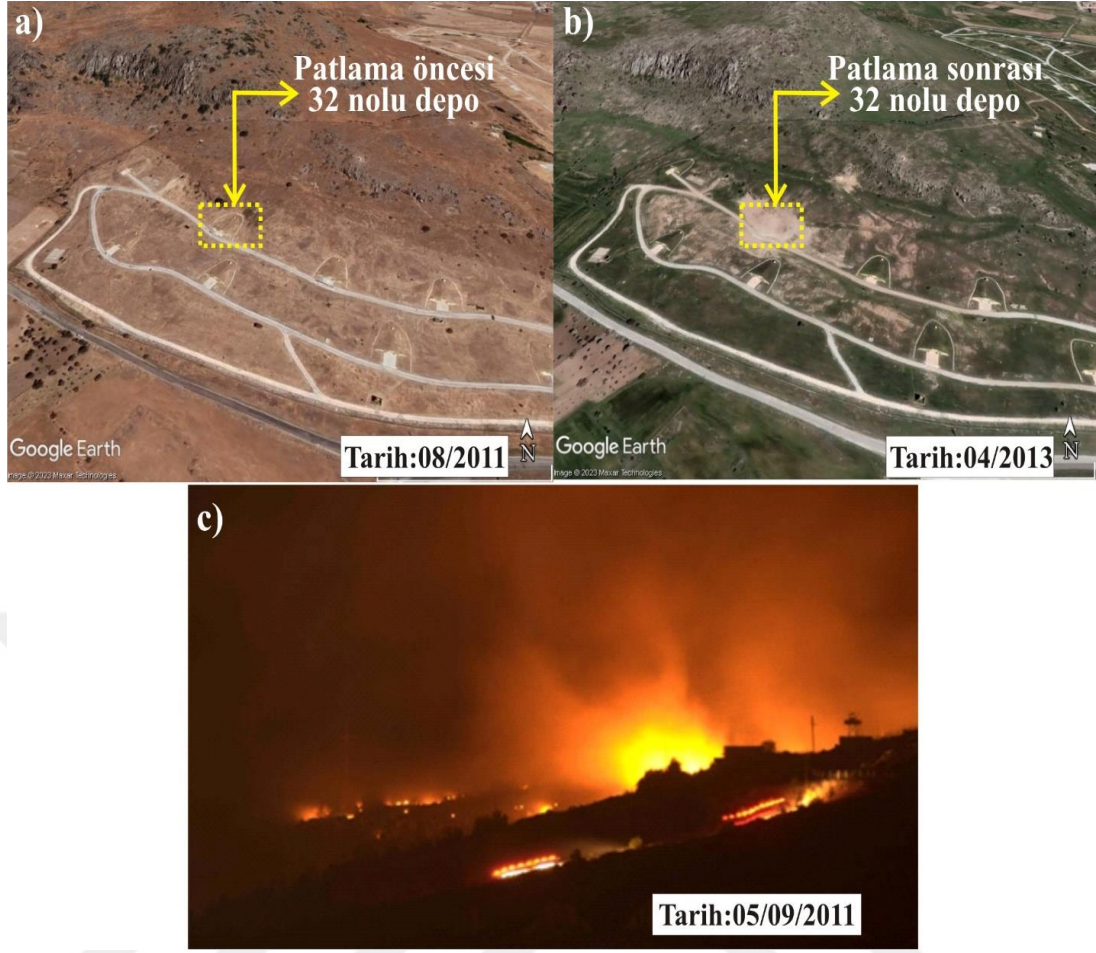
3.1. 5 Eylül 2012 Afyonkarahisar Mühimmat Deposu Patlaması

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 bir patlama meydana geldi (Şekil 3.1.). Patlamada askeriye mensubu rütbeli ve erlerden oluşan 25 askerimiz şehit oldu. Ayrıca 4 kişisi asker olma 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 (<https://www.habername.com/haber-iste-rakamlarla-afyon-patlamasi-80256.htm>).



Şekil 3.1. Afyonkarahisar patlama lokasyon haritası. Kırmızı yıldız patlama noktasını göstermektedir.

Şekil 3.2a.'da patlamadan yaklaşık 13 ay öncesine ait uydu görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.2b.'de ise patlamanın 8 ay sonrasına ait uydu görüntüsü gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere diğer depolar sağlam bir şekilde dururken patlama sonrası 32 nolu mühimmat deposu adeta yok olmuştur. Şekil 3.2c.'de ise patlamanın meydana gelişinden kısa bir süre sonra çekilen fotoğraf gösterilmiştir. Çok yoğun bir enerji salınımının gözlemlenmiş ve oldukça yüksek sıcaklıkla gerçekleşen bir patlama olduğu anlaşılmaktadır.



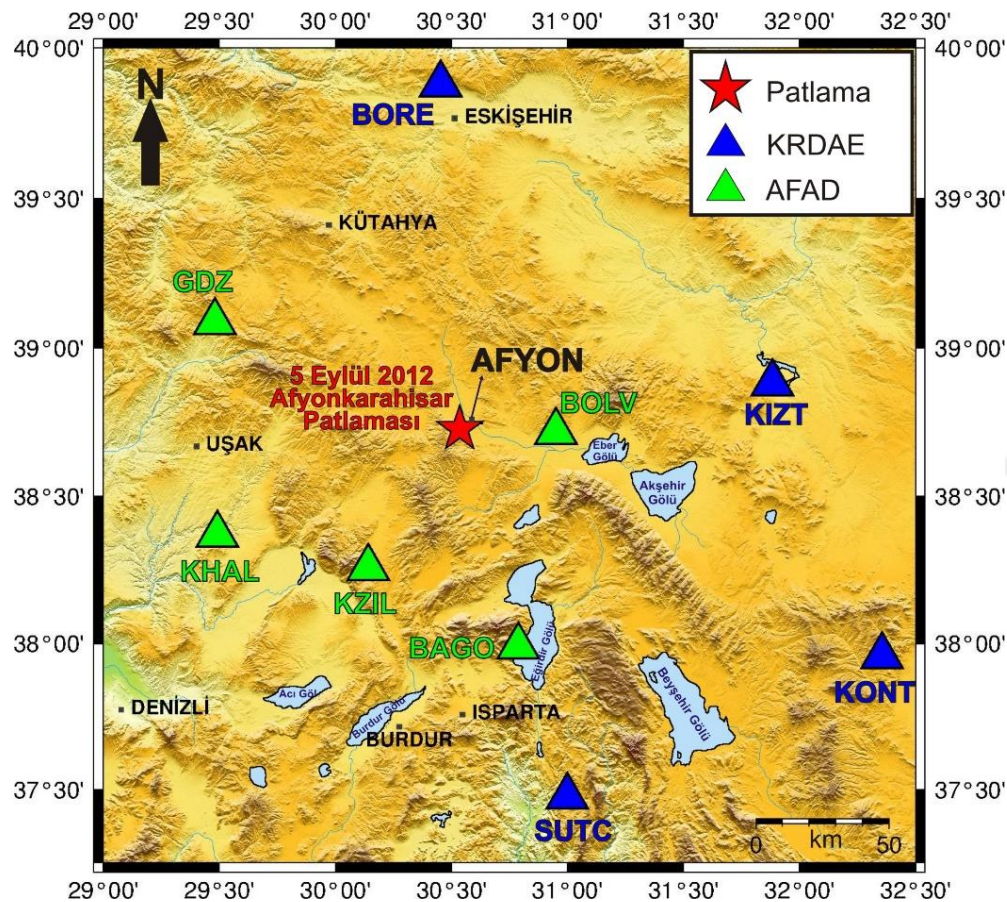
Şekil 3.2. Afyonkarahisar 500. İstihkam Ana Depo Komutanlığı Şehit Uzman Çavuş Mete Saraç Kışlası mühimmat deposu (a) Patlama öncesi (<https://earth.google.com/>) (b) Patlama sonrası (<https://earth.google.com/>) ve (c) Patlama anı hemen sonrası görüntüleri ([https:// earth.google.com/](https://earth.google.com/))

3.2. Bölgede Sismik Ağlar, Sismik İstasyonlar ve Kayıtlar

Patlamanın meydana geldiği bölgede iki farklı sismolojik gözlem evinin sismik istasyonları bulunmaktadır. İncelemelerde Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü-Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Merkezi (KRDAE-BDTİM) ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı'na (AFAD-DDB) ait sismik istasyonlar kullanılmıştır. Sismik istasyonlara ilişkin detaylı bilgiler Tablo 3.1'de verilmiştir. Tablo 3.1'de verilen tüm istasyonların konumlarını gösteren harita Şekil 3.3.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Patlama bölgesine yakın konumda bulunan KRDAE ve AFAD istasyonları

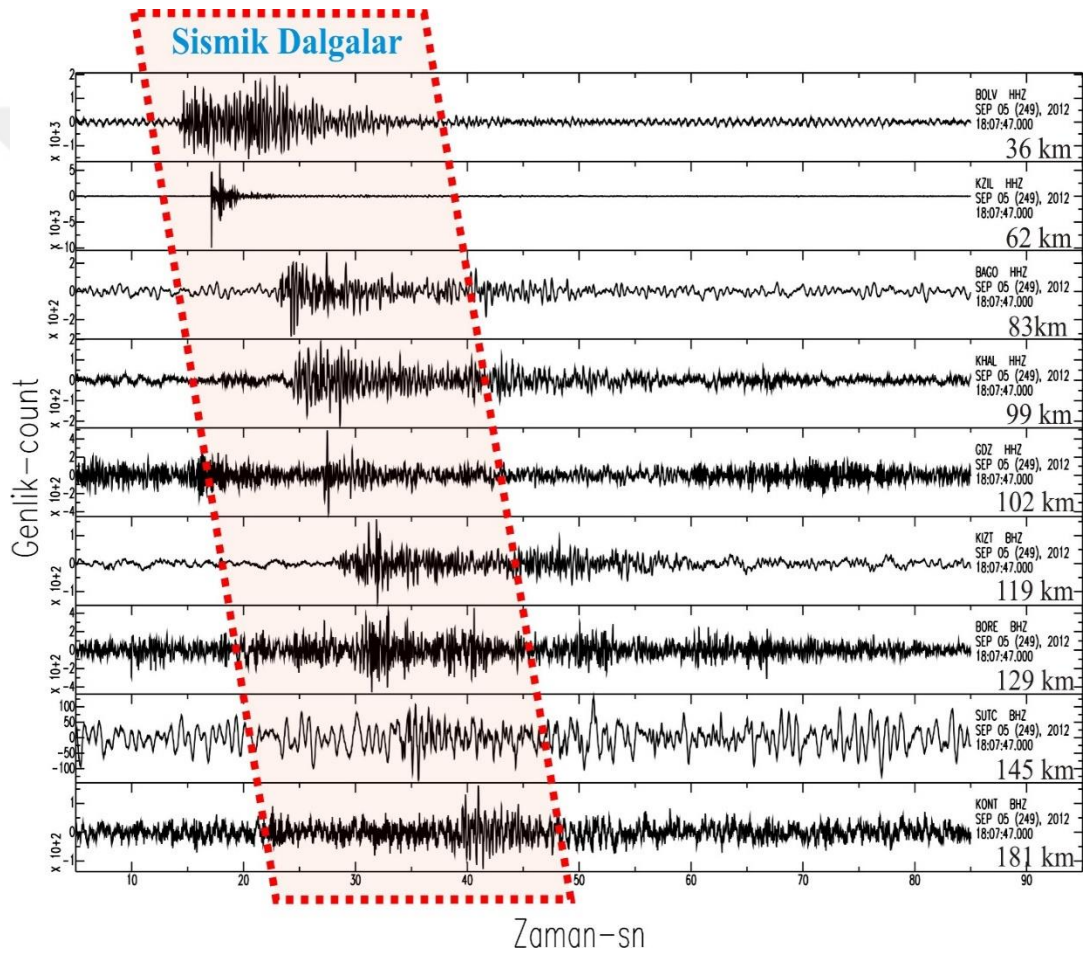
İstasyon Adı	Yer	Enlem°	Boylam°	Yükseklik (m)	Sismik Ağ	Türü
BORE	Tepebaşı/Eskişehir	39.8802	30.4535	800	KRDAE	Hızölçer
KIZT	Kızılçal/Konya	38.8817	31.8833	1202	KRDAE	Hızölçer
KONT	Tatköy-Konya	37.9570	32.3563	1100	KRDAE	Hızölçer
SUTC	Sütçüler-Isparta	37.4765	30.9997	10	KRDAE	Hızölçer
BAGO	Eğirdir-Isparta	37.9905	30.7886	958	AFAD	Hızölçer
BOLV	Bolvadin-Afyon	38.7183	30.9502	1303	AFAD	Hızölçer
KHAL	Karahallı-Uşak	38.3704	29.4914	1130	AFAD	Hızölçer
KZIL	Kızılören-Afyon	38.2575	30.1412	1202	AFAD	Hızölçer
GDZ	Kütahya-Gediz	39.0874	29.4815	1324	AFAD	Hızölçer



Şekil 3.3. KRDAE ve AFAD’a ait istasyonların patlama bölgesine ilişkin konumları. Kırmızı yıldız patlama konumunu işaret etmektedir.

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 sismik istasyon (zayıf hareket) tarafından kaydedildiği tespit edilmiştir. (Şekil 3.4.). Patlamaya en yakın istasyon olan BOLV (merkez üssü uzaklığı ≈ 36 km) patlamanın hemen hemen doğusunda yer almaktadır. Tüm istasyonların örnekleme hızı saniyede

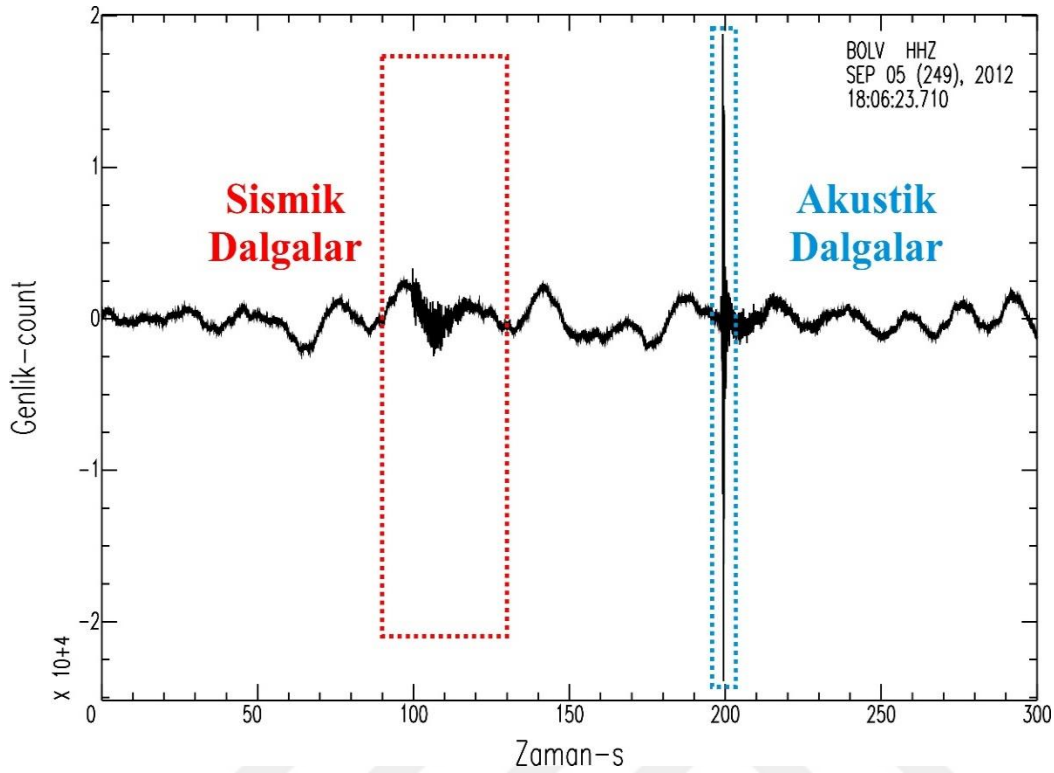
100 örnektir. Patlamalarda depremlere kıyasla S dalgasından daha yüksek P dalgası enerjisi üretir. Bu nedenle çalışmada hız sismogramlarının düşey (Z) bileşenine odaklanması daha uygun görülmüştür. Tüm istasyonlardan elde edilen veriler Seismic Analysis Code (SAC) ortamında görüntülenmiş ve gözlemsel olarak değerlendirilmiştir. Mevcut istasyonların tümünde çevresel etkenlerden kaynaklanan gürültüler bulunmaktadır. Bu nedenle sismik fazların seçilebilmesi için 1 Hz ve 10 Hz aralığında bant geçişli Butterworth filtre uygulanmıştır (Şekil 3.4). Özellikle 100 kilometreye kadar uzaklıkta olan istasyonlarda patlamaya ilişkin sismik dalga gelişleri açıkça gözlemlenmektedir.



Şekil 3.4. KRDAE ve AFAD' a ait toplam 9 istasyonda kaydedilen düşey hız sismogramları. Sismik dalgalar kırmızı kesikli alanla işaretlenmiştir. Sismogramlar patlamaya ilişkin dış merkez uzaklıklarına göre çizilmiştir. Sıfır zamanı 21:07:47.0'dir.

Güçlü patlamalarda sismogramlarda gözlemlenen bir diğer dalga türü de akustik dalgalardır. 9 istasyona ilişkin yapılan incelemelerde bir tek en yakın BOLV istasyonu

sismogramında akustik dalga varlığına rastlanmıştır. BOLV istasyonu sismogramında gözlemlenen sismik ve akustik dalgalar Şekil 3.5.'de gösterilmiştir.



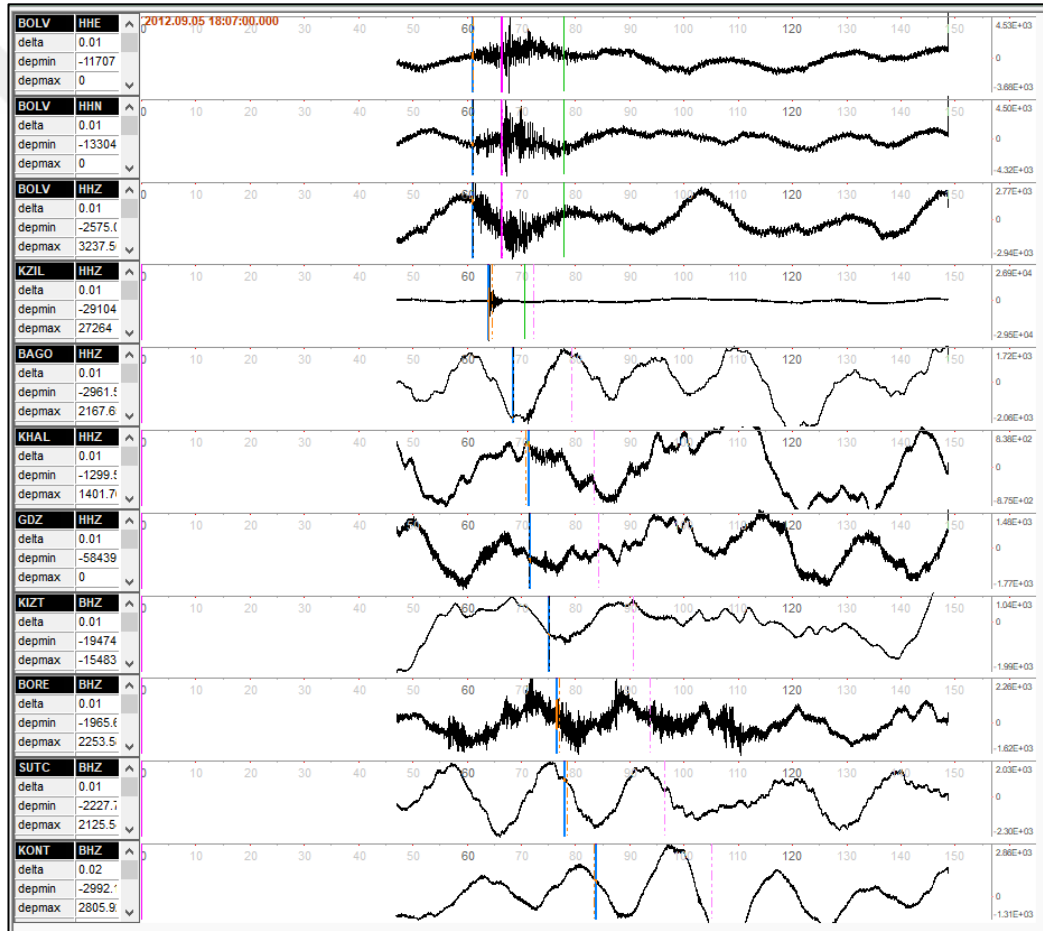
Şekil 3.5. 5.Patlamanın BOLV istasyonu sismogramı. Sismik dalgalar kırmızı dikdörtgen içinde gösterilmiştir ve Akustik dalgalar mavi dikdörtgen içinde gösterilmiştir.

3.3. Patlamanın Konumu, Başlangıç Zamanı ve Büyüklüğünün Belirlenmesi

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

Sinyal/Gürültü oranı (S/N) mükemmel ortamlarda 1 civarındır. Fakat teorikteki bu değere istasyonların konumu nedeniyle ortaya çıkan gürültü ve benzeri gibi etkiler sebebiyle ulaşmak neredeyse imkânsızdır. Bu nedenle sismogramlardaki gürültüler 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 oluşmadığını söyleyebiliriz. Sadece faz değişikliğine uğrayan dalgalar nedeniyle S dalgaları üretilebilir. Tüm bunların doğrultusunda 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 (Şekil 3.6.). Konum belirlemede kullanılan istasyonların faz okumalarının varış zamanları içeren detaylı bilgiler Tablo 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.6. 5 Eylül 2012 Afyonkarahisar mühimmat depo patlaması konum tespitinde kullanılan istasyonlar ve okunan dalga varışları. P dalgaları için mavi, S dalgaları için pembe ve olayın süresi için yeşil çubuk kullanılmıştır. Kesikli çubukların tümü yazılım önerdi

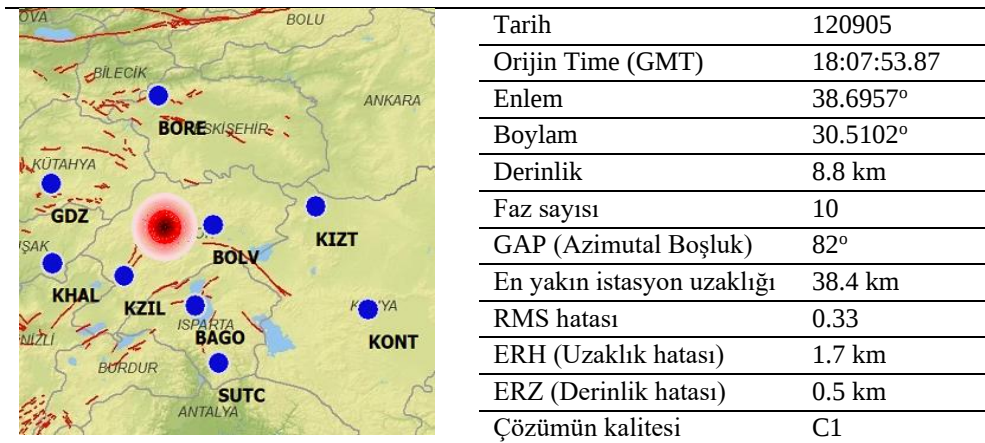
Tablo 3.2. Sismogramlardan okunan P ve S dalgalarına ait varış zamanları

İstasyon	P- okunan	P- hesaplanan	P- fark	S- okunan	S- hesaplanan	S- fark	Uzaklık (km)
BOLV	1.22	1.17	0.05	6.52	6.5	0.02	38.37
KZIL	4.06	4.54	-0.48	-	12.32	-	58.31
BAGO	8.56	8.53	0.03	-	19.24	-	81.97
KHAL	11.46	10.9	0.56	-	23.33	-	95.93
GDZ	11.67	11.46	0.21	-	24.3	-	99.27
KIZT	15.21	15.15	0.06	-	30.69	-	121.07
BORE	16.52	16.93	-0.41	-	33.77	-	131.59
SUTC	18.04	18.47	-0.43	-	36.42	-	141.97
KONT	23.9	23.48	0.42	-	45.1	-	181.1

Şu ana kadar yapılan tüm işlemler sismik olayın konumu ve büyüklüğünün belirlenmesi için yapılan hazırlıkları kapsamaktadır. Bu aşamada zSacWin EQ Processing bilgisayar yazılımında “Locate” sekmesine basılarak patlamaya ilişkin konum ve diğer parametreler belirlenebilir (Tablo 3.3.).

Yapılan işlemler sonucu çözümün kalitesi belirleyen RMS (Root Mean Square) 0.33 olarak bulunmuştur. Bu değer 0’a ne kadar yakın ise çözüm o kadar kalitelidir. Bu çözümün kalite harflendirilmesi 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 çıkması beklenir. Fakat bu tarz çözümlerde derinlik bölgede meydana gelen depremlerin ortalama derinliği referans alınarak hesaplandığından hatalı çıkması beklenen bir durumdur.

Tablo 3.3. Patlamaya ilişkin konum bilgisi ve diğer parametreler



Elde edilen bir diğ er önemli bilgi ise patlamanın olu  zamanıdır. Tüm geçmiş ar ivlerde patlamanın yerel saat ile 21:15 civarında meydana geldiği belirtilmektedir. Oysaki sismolojik ara tırmalarımız 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 olu  zamanının belirlenmesinde çevrede bulunan kameraların güvenilir olmayan bilgiler vermesidir. Kameralarda yaşanan zaman problemleri olu  zamanının güvenilir olarak belirlenmesinin önüne geçmektedir. Çalışmamızda bu güçlüğün de üstesinden gelerek güvenilir bir olu  zamanı sunuyoruz. Bu yapılacak adli soru tırmalar için büyük bir önem arz etmektedir.

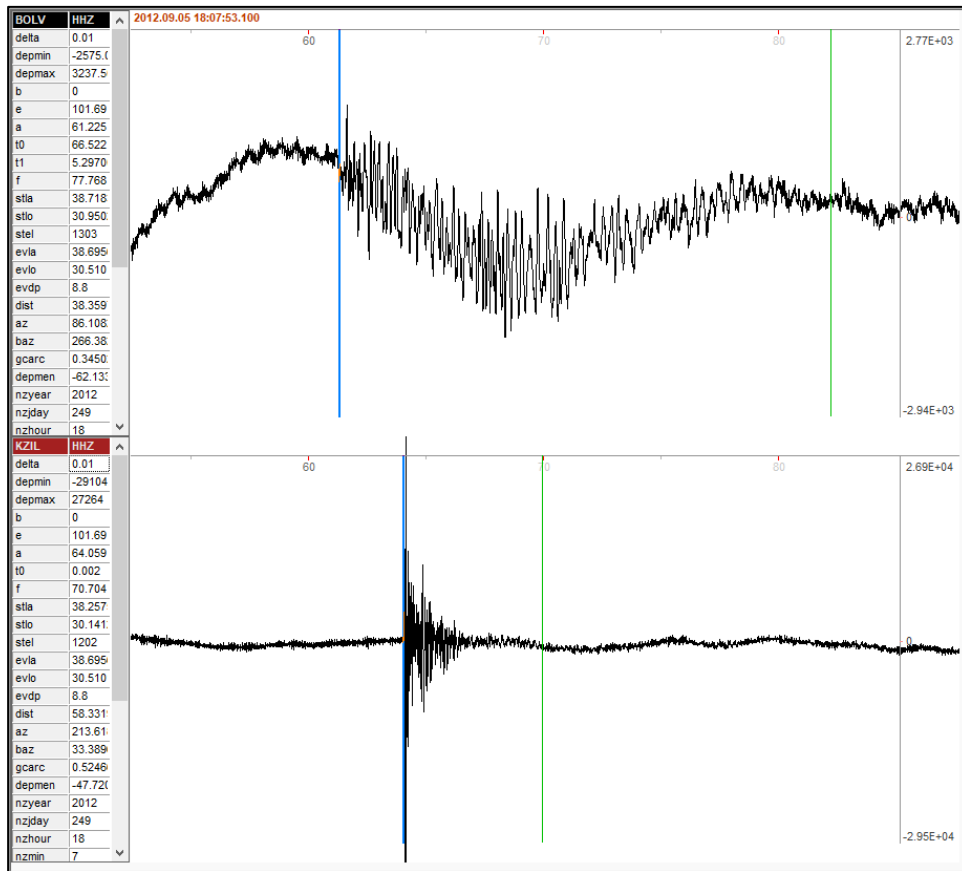
Patlamanın büyüklüğü için zSacWin EQ Processing bilgisayar yazılımı içinde hem süreye bağlı (M_d) hem de yerel büyüklük (M_L) hesaplanabilmektedir. Yerel büyüklük küçük depremelerin büyüklüğünün hesaplanmasına ilişkin daha doğru tahminler sağlamaktadır (Görgün 2003).

Süreyle ilgili büyüklüğün hesaplanmasında HYPO71 yazılımı kullanılmıştır. Bu amaçla aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır.

$$\text{Md} = C_1 + C_2 \log_{10}(D) + C_3 \Delta + \gamma \quad (3.1)$$

Burada D , depremin sismogram üzerindeki süresi; Δ , km cinsinden istasyonun depreme uzaklığı; C_1 , C_2 , C_3 , γ ise sabit katsayılardır. Süreye bağlı büyüklük hesaplarırken en önemli kıstas her istasyona ait sismogram üzerinde olayın süresinin iyi tespit edilmesi ve istasyona ilişkin sabit katsayıların doğru belirlenmiş olmasıdır. 2012 Afyon mühimmat patlamasına ilişkin M_d hesaplamasındaki asıl sorun eğer var ise kısa süre içinde gerçekleşen ardışık patlamaların sismogramlarda iç içe geçerek olay

süresinin tespitini zorlaştırması veya yanlış belirlenmesine yol açmasıdır. Bu tarz patlama olaylarında sıklıkla gözlemlenen ardışık patlamaların varlığı Md hesaplamalarının güvenilirliğinin tartışılmasına yol açmaktadır. İstasyonların olaya uzaklıkları arttıkça dalga varış sürelerindeki fark da artacağından en yakın istasyon olan BOLV ve KZIL istasyonlarından süreye bağlı büyüklüğün hesaplanmasına karar verilmiştir (Şekil 3.7.). Tablo 3.4’de her iki istasyondan hesaplanan Md değerleri verilmiştir. zSacWin EQ Processing bilgisayar yazılımı tarafından patlamaya ilişkin verilen Md değeri 1.4’tür.



Şekil 3.7. BOLV ve KZIL istasyonu için olay süresi okumaları. Mavi çubuk P dalası varışını, yeşil çubuk ise olayın bitiş zamanına işaret etmektedir.

Tablo 3.4. 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasına ilişkin süreye bağlı büyüklük değerleri

İstasyon	Olay Süresi (s)	Md
BOLV	20	1.8
KZIL	7	1.0

Daha güvenilir bir büyüklük tahmini yapabilmek için yerel büyüklük tahmini yapılmıştır. Bu amaçla Görgün (2003) tarafından Türkiye için türetilen eşitlik kullanılmıştır.

$$M_L = \log_{10} A + 0.0334\Delta - 1.9236E-4 \Delta^2 + 4.0224 \Delta^3 + 1.265 \quad (\Delta \leq 200) \quad (3.2)$$

$$M_L = \log_{10} A + 0.0082\Delta - 5.9628E-6 \Delta^2 + 2.1173, \quad (\Delta > 200) \quad (3.3)$$

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 3.5'de verilmiştir. Sonuç olarak patlamanın yerel büyüklüğü 1.4 ± 0.1 olarak elde edilmiştir.

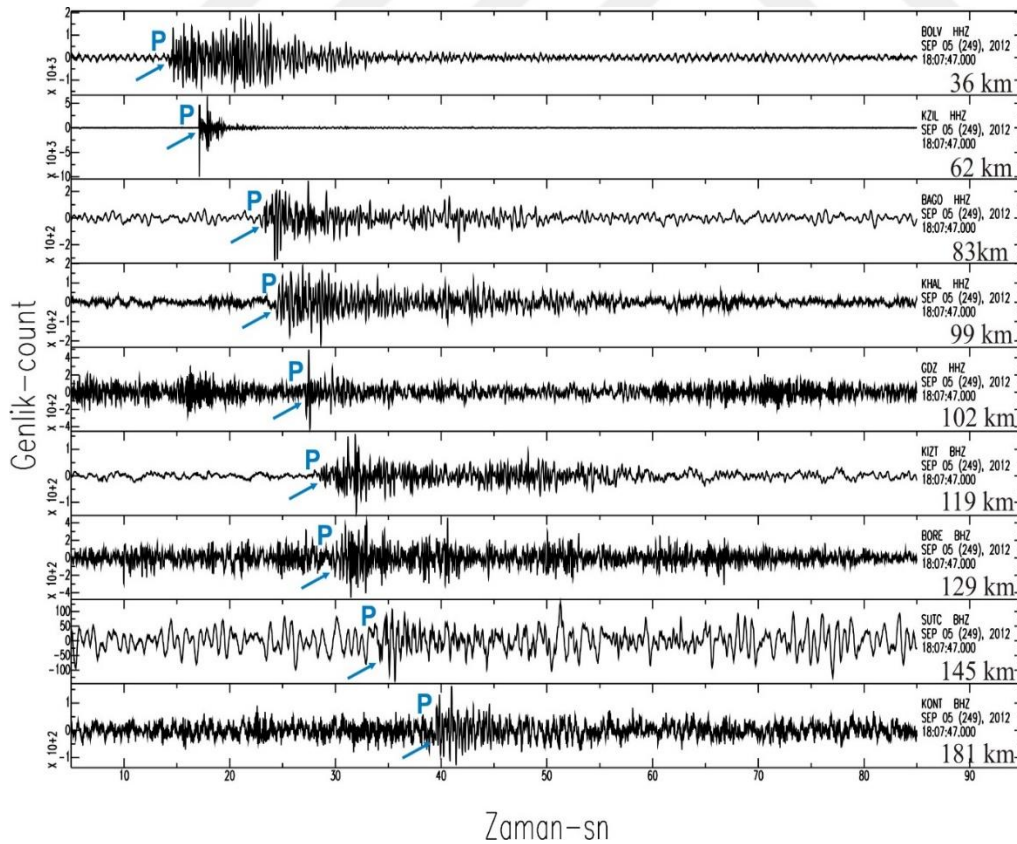
Tablo 3.5. 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasına ilişkin yerel büyüklük değerleri

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 doğru ve güvenilir olarak hesaplanması patlamanın boyutunun belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Patlamanın büyüklük ölçeklemesinde tüm istasyonların hesaba katılması, dalga şekillerinin değerlendirilmesi ve küçük büyüklükteki sismik olaylar için güvenilir bir değer sunması sebebiyle M_L değerinin daha gerçekçi bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir. İleriki bölümlerde patlamanın büyüklüğü ve boyutu arasındaki ilişkiye detaylı bir şekilde değinilecektir.

3.4. Sismik Faz Tanımlama ve Akustik Dalgalar

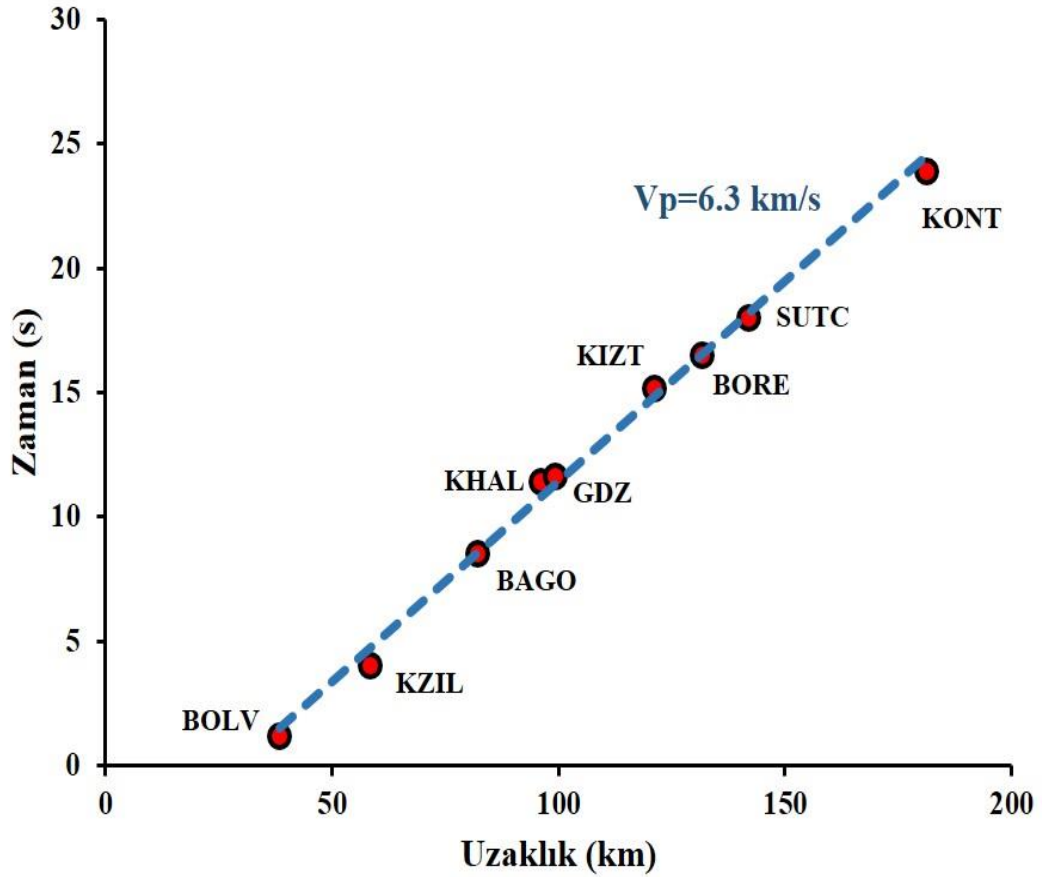
5 Eylül 2012 Afyonkarahisar askeri mühimmat deposu patlaması yerin üstünde kurulmuş bir depo içinde gerçekleşmiştir. Bu nedenle de enerji salınımı daha çok atmosferdedir. Depremlere ya da yerin altında gerçekleşen patlamalara göre kıyasla sismik dalga genlikleri düşüktür. Ayrıca patlamanın hemen ardından çok kısa süre içinde başka patlamaların gerçekleşmesi muhtemel olduğundan sismogramlardaki kayıtlar oldukça karmaşıktır. Çoğu örnekte yaşandığı gibi ardışık patlamaların ilk patlamanın dalgalarını maskeleyeceği ve bu nedenle de dalga fazlarının tanımlanmasının güçlüğü aşikârdır. Bu patlama için kullanılan 9 istasyonda da P dalgası gelişleri net bir şekilde seçilebilmektedir (Şekil 3.8.). Fakat S dalgasını tanımlamak oldukça güçtür. Her ne kadar zSacWin yazılımı kabuk hızı modeline dayalı olarak S dalgasını hesaplayıp işaretlese de bunun çok güvenilir olmadığı sismogramları detaylı bir şekilde inceleyerek gözlemler. Bu nedenle burada sadece P dalga fazlarına odaklanacağız. 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.



Şekil 3.8. KRDAE ve AFAD' a 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. Verilere 1 Hz ve 10 Hz aralığında bant geçişli Butterworth filtre uygulanmıştır. Sıfır zamanı 21:07:47.0'dir.

P dalgalarının varış sürelerini kullanılarak P dalgasına ait hız belirlenmiştir. Bu amaçla her istasyon için P dalga varış süreleri elde edilerek doğrusal regresyon ile dalga hızı tespit edilmiştir. V_p dalga hızı 6.3 km/s olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.9.).

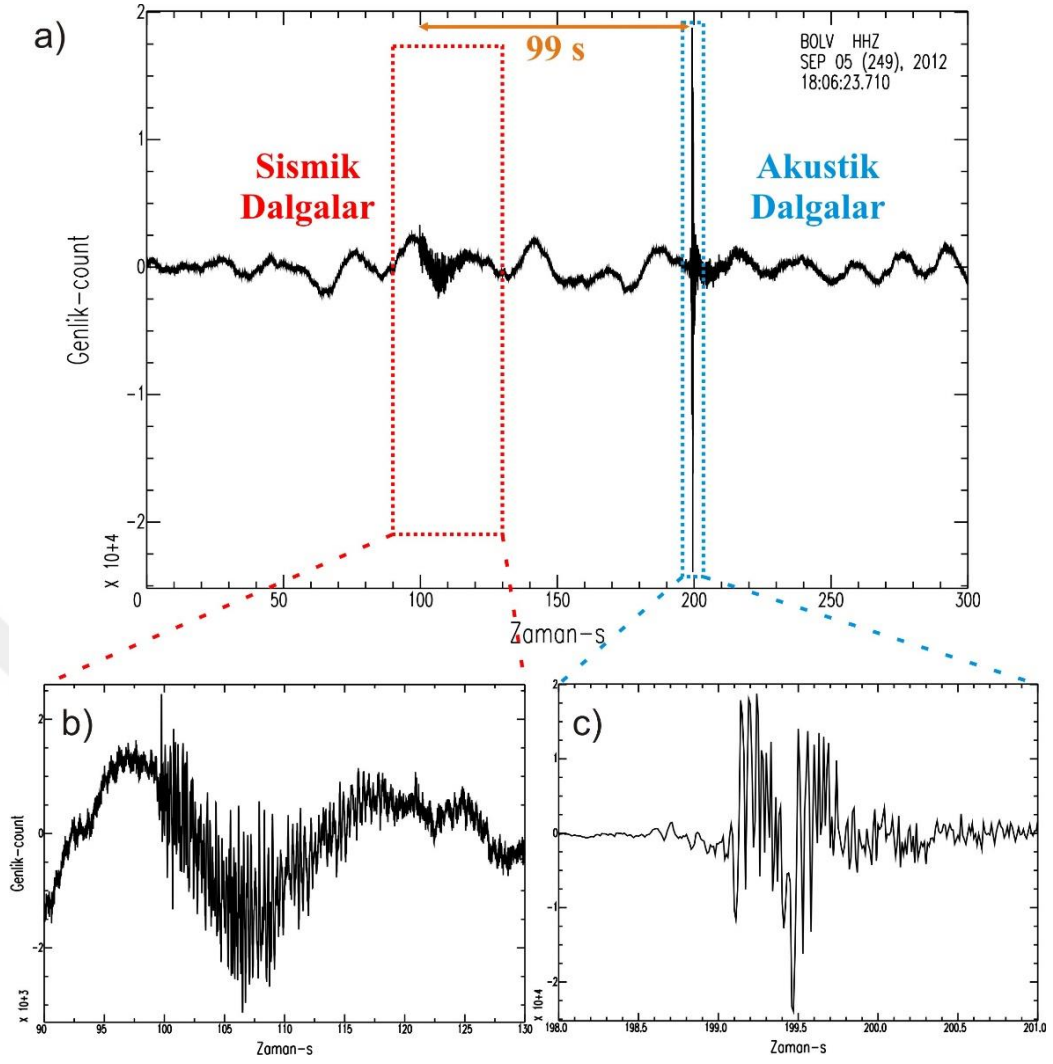


Şekil 3.9. 2012 Afyonkarahisar patlaması için P dalgalarına ait varış süreleri ile merkez üssü mesafeleri. Kırmızı yuvarlaklar her istasyon için varış süresi okumalarını ve mavi kesikli çizgi P dalgaları için doğrusal regresyonların sonuçlarını temsil eder.

Yüzeyde gerçekleşen patlamalar sismik dalgaların yanı sıra şok dalgaları da üretirler. Şok dalgaları elastik davranış gösteren bir ortamda patlamalar gibi basınçta ciddi değişimle 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 olacak şekilde 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 ark. 2002). Akustik dalgaların genliği kaynağın gücüne, atenuasyona ve ortamdaki saçılmaya bağlı iken hızları ise atmosferdeki rüzgâr ve sıcaklık ile ilişkilidir (Settles 2006; Evers ve ark. 2007; Budakoğlu 2022). 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasında yüksek basınçlı, dik ve ani bir şok dalga cephesi oluşmuştur. Daha sonra bu şok dalgası kaynaktan uzaklaştıkça 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 3.10.'da gösterilmiştir. 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması oluşan şok dalgası kaynak civarında aşırı yüksek basınç ve ısı nedeniyle büyük tahribat yaratmıştır. Şok dalga cephesi kaynaktan uzaklaştıkça basıncı azalarak akustik dalga formunda BOLV istasyonunda kaydedilmiştir.



Şekil 3.10. Patlamanın BOLV istasyonu sismogramı (a), Patlamaya ilişkin sismik dalgalar (b) ve Akustik dalgalar (c).

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 etkide kaynak ile alıcı arasında dalganın maruz kaldığı kırılma ve bazen de yansımalarıdır. Ayrıca dalganın yayıldığı atmosferin anizotropik

olduğu gerçeği de etki eden faktörlerden biridir. Bu nedenle elde edilen akustik dalga hızının ortalama bir değeri olduğu unutulmamalıdır.

3.5. Patlamaya İlişkin Verim (yield) Tahmini

Bir patlama meydana geldiğinde özellikle adli soruşturmalar açısından infilak eden madde miktarının ne kadar olduğu sorusunun cevabı oldukça önemlidir. Bu aşamada patlamaya sebep olan patlayıcının içeriği (ANFO, PE4, PETN, TNT vb.) gereklidir. Patlayıcı madde bilirse infilak eden madde miktarı deneysel bağıntılarla elde edilebilir. Ayrıca farklı türde parametreleri kullanarak 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 dalgalarla 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 denklem kullanılmıştır (patlama yer yüzeyinin hemen üstünde gerçekleştiği için).

$$D(m) = 4.2 * W^{1/3} \quad (3.4)$$

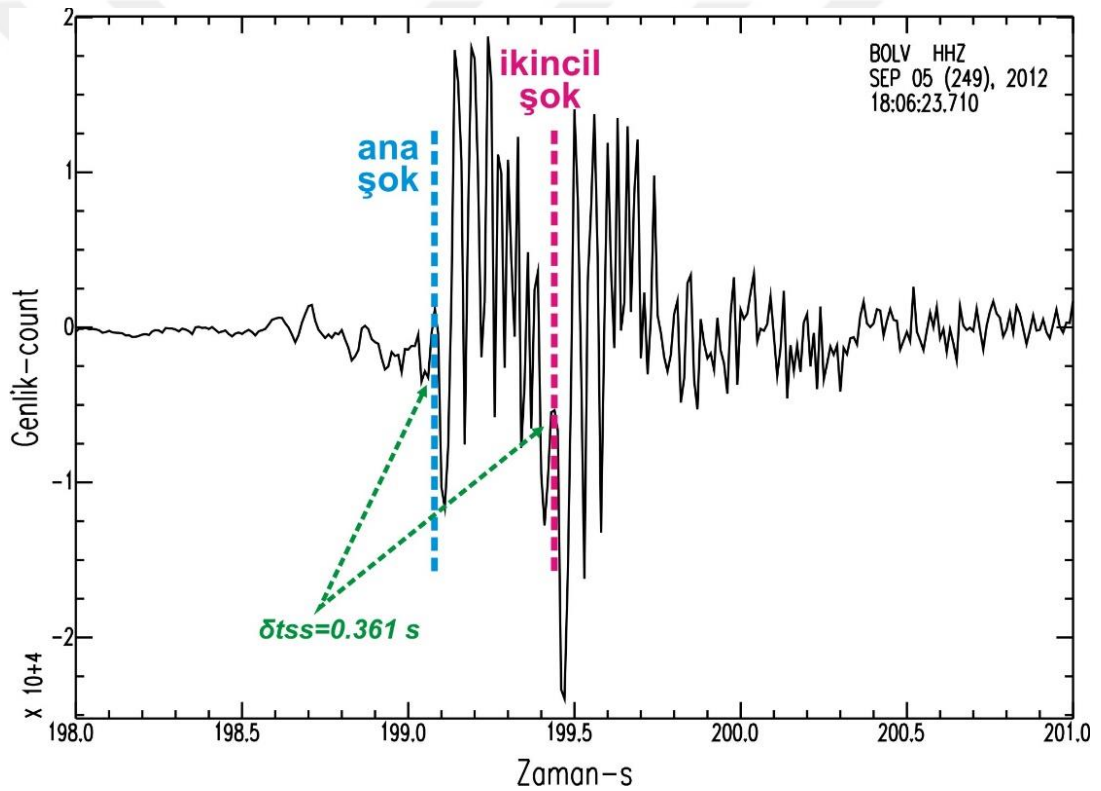
Burada W ton cinsinden TNT eşdeğeridir; D patlama sırasında oluşan kraterin çapıdır. 2012 Afyon mühimmat deposu bilirkişi raporlarına göre depo için herhangi bir krater oluşmamıştır. Sadece cephaneliği sağ ön giriş kesiminde 3 metre çaplı bir krater bulunmaktadır. Bu kraterinde küçük bir başka patlamadan 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 yansmasıyla 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 eşitlikler kullanılarak 2012 Afyon patlamasının ikincil şok dalgası ile patlayıcının kütlesi tespit edilebilir.

$$W=(\delta t_{ss} * Vod/(\rho^{1/3} *(2.45* \log_{10}(\frac{R}{W^{1/3}})+1.36)))^3 \quad (3.5)$$

2012 Afyon patlaması patlayan maddenin kütle hesabı için ilk olarak denklemlerde bilinmeyenlerin elde edilmesi gerekir. δt_{ss} , ikincil şok dalgası gecikme süresi (s) için BOLV istasyonu sismogram kaydı kullanılacaktır. Çünkü ana ve ikincil şok dalgası sadece BOLV istasyonuna kaydedilmiştir. Şekil 3.11’de BOLV istasyonu sismogram kaydı verilmiştir. İstasyona ait düşey bileşen sismogramından δt_{ss} değeri 0.361 s olarak okunmuştur.



Şekil 3.11. 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.

R, mesafe (m); istasyonun kaynak bölgesine olan uzaklığıdır ve bu patlama için 36 000 m’dir. *Vod* Değeri patlama hızını (m/s) temsil eder. Bilirkişi raporlarında “PETN” yani plastik patlayıcı kimyasalı tespit edilmiştir. (<https://www5.tbmm.gov.tr/tutanak/donem24/yil4/ham/b00801h.htm>). Bu patlayıcı maddenin *Vod* 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. Denklem (3.5)'de 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 (Bache 1982; Nuttli 1988; Bowers ve ark. 2001; Brocher 2003; Zhao ve ark. 2016; Budakoğlu, 2022). Bu yöntemde Bowers ve ark. (2001) tarafından bu olaya benzer koşulda türetilmiş cisim dalgası büyüklüğü (m_b) ile patlayıcı madde miktarı arasındaki ilişkiyi veren deneysel bağıntı kullanılmıştır (6). Önceki bölümlerde 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması olayına ait büyük $M_L=1.4$ olarak bulunmuştur. Bu nedenle M_L 'in m_b 'ye dönüştürülmesi için eşitlik (3.7) tercih edilmiştir (Ambraseys 1990) ve olayın büyüklüğü $m_b = 2.1$ olarak bulunmuştur.

$$m_b = 4.25 + \beta \log_{10} W \quad (3.6)$$

$$m_b = (0.73 + 0.64 M_L) / 0.77 \quad (3.7)$$

$\beta=1$ olarak kabul edildiğinde (Zhao ve ark. 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.

Tablo 3.6. Farklı yöntemler kullanılarak 2012 Afyon mühimmat deposu patlaması infilak eden madde miktarları

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

2012 Afyon mühimmat deposu patlamasında infilak eden madde miktarları üç farklı yöntem ile tespit edilmiştir (Tablo 3.6). Tüm yöntemler patlama ile ilgili farklı kriterleri 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 patlaması 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). Yukarda 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 koşullar durağan kabul edilebilmesi yöntemin avantajıdır. Ayrıca diğer iki yönteme 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.

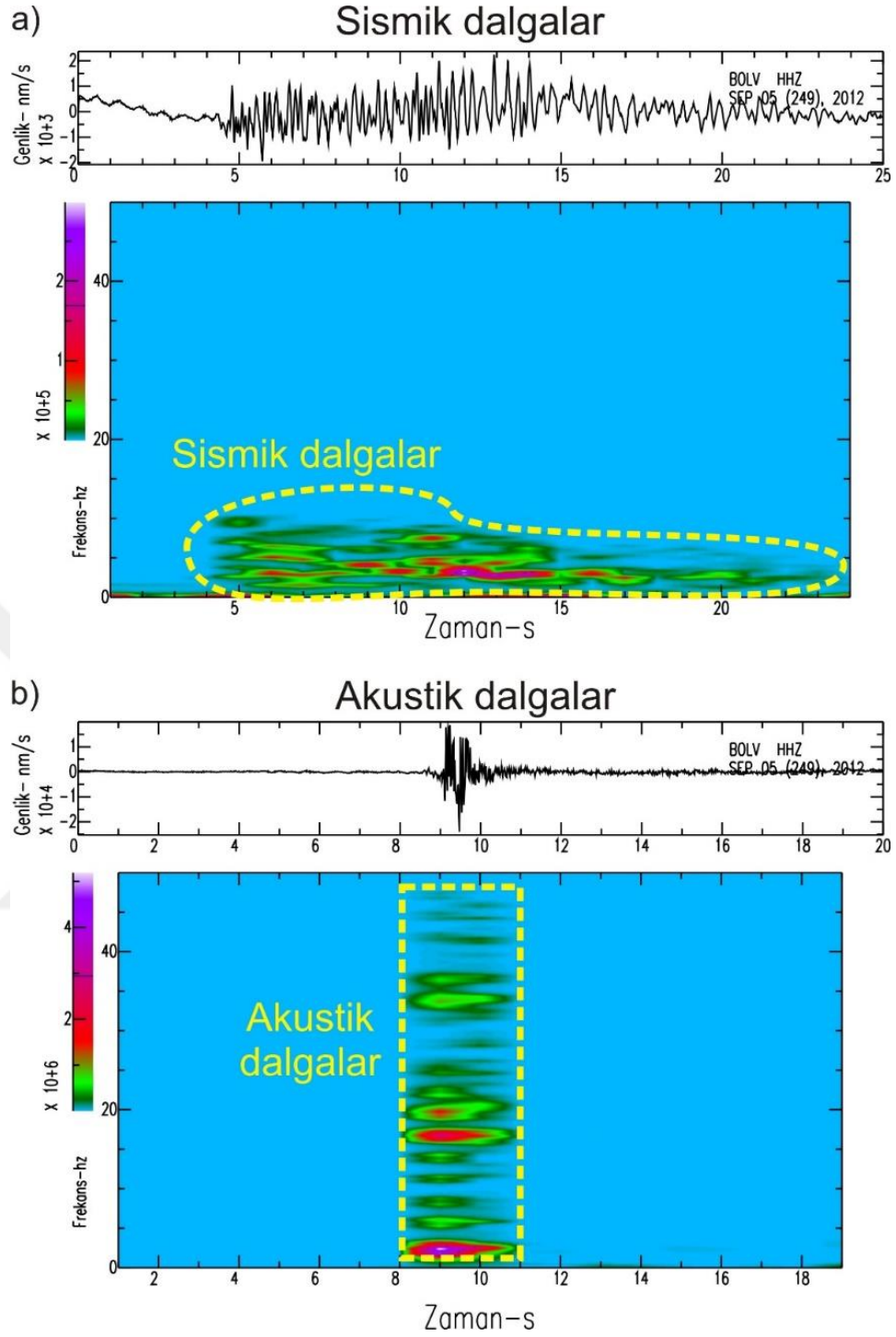
3.6. Frekans Ortam Analizleri

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 içinde frekans özelliklerinden faydalanılmaktadır (Pomeroy ve ark. 1982; Wüster 1993; Kristekova ve ark. 2008; Horasan ve ark. 2009; Ataeva ve ark. 2017; Budakoğlu ve Horasan 2018; Yavuz ve ark. 2019; Budakoğlu 2022). Sismik dalgalar, yerin doğası gereği zayıflama ve saçılma özelliklerinden dolayı düşük frekanslarda daha iyi yayılırlar. Akustik sinyaller ise daha durağandır 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

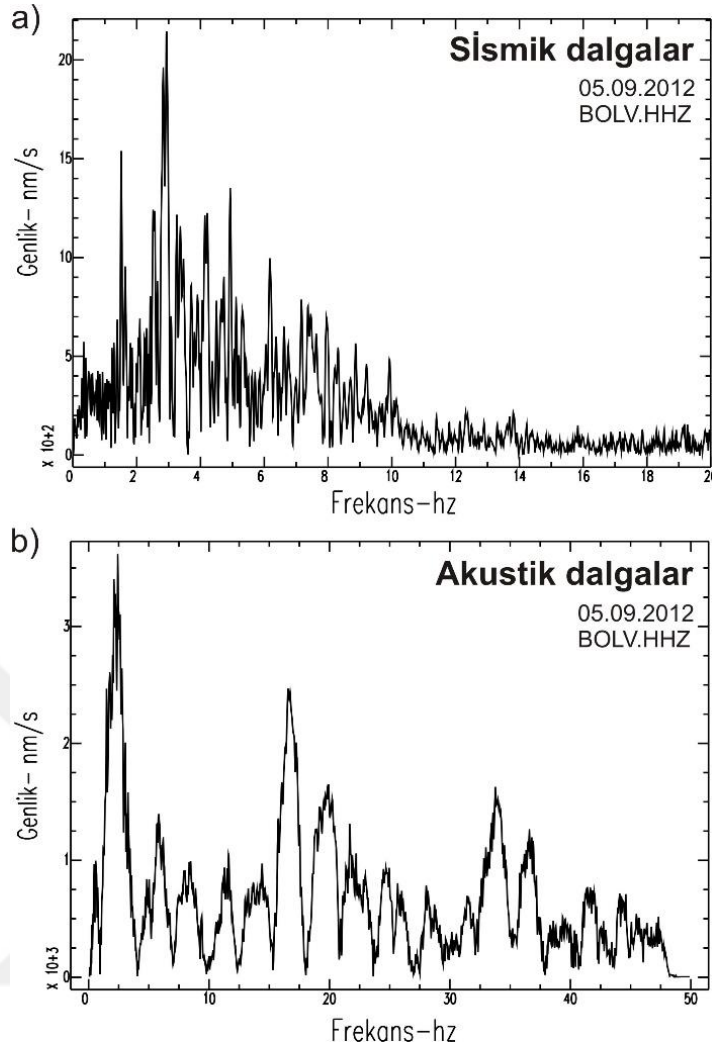
taraklanma (spectral scalloping - deniz kabuğuna benzer) gibi bir görünüm sergileyebilirler. Ayrıca bu görünüm sismik dalgalarda milisaniye mertebesinde gerçekleşen ardışık (gecikmeli) patlamalarda da gözlemlenmektedir. (Leach ve Dowla 1995).

Bu tez çalışmasında 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 ark, 1989). Sismik ve akustik dalgaların birlikte gözlemlendiği BOLV istasyonuna ait spektrogramlar Şekil 3.12’de ve genlik spektrumu Şekil 3.13’de verilmiştir.

Patlama bölgesine en yakın olan BOLV istasyonu sismik dalgalarına ait spektrogram incelendiğinde (Şekil 3.13a.) yaklaşık 5 ile 10 Hz arasında uzanan bir P dalgası geliş gözlemlenmektedir. P dalgası gelişinden yaklaşık 7-8 s sonra (10 ile 15 s arasında) 5 Hz civarında kuvvetli enerji geliş 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 3.13b). 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 3.13.’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 yansıtabileceğini akla getirmektedir.



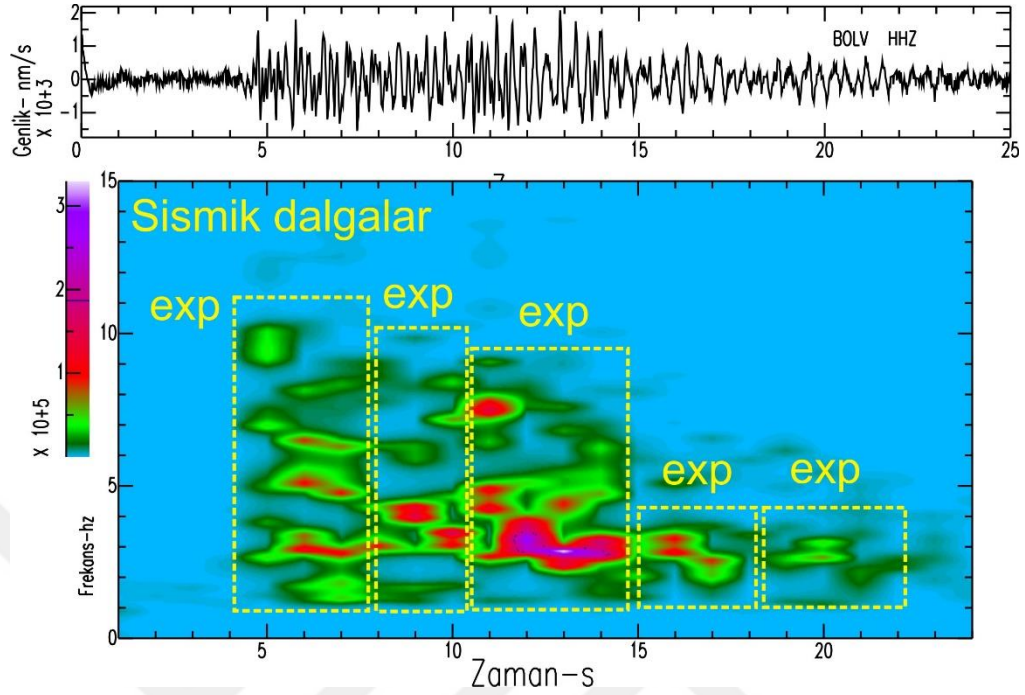
Şekil 3.12. 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasının sismik ve akustik dalga sismogramları ve bunlara karşılık gelen spektrogramları. Spektrogramlar, dalga formlarının düşey bileşeni kullanılarak hesaplanmıştır. Yüksek enerjili içerik mor, kırmızı ve yeşil renklerle



Şekil 3.13. Sismik ve akustik dalgaların genlik spektrumları. Çizimlerde patlama bölgesine en yakın istasyon olan BOLV kullanılmıştır.

Kristekova ve ark. (2008) çalışmalarında akustik ve sismik dalgaların enerji maksimumlarının patlayıcı kaynağı ve süreci hakkında bilgi verebileceğini belirtmişlerdir. Şekil 3.14’de 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 dalgaının kaynağı olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Sismik dalga spektrogramı patlamanın ilk olarak daha küçük bir patlama başladığını 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)’nın önerdiği spektral taraklama (scallop) ve sismik dalga genlik spektrumları da sergiledikleri modülasyon ile bunu desteklemektedir. Şekil 3.14’de

BOLV istasyonu sismik dalgalarına ait spektrogram frekans eksenini detaylı çizilerek olası diğer patlamalar işaretlemiştir.



Şekil 3.14. 2012 Afyon mühimmat deposu patlamasının sismik ve akustik dalga sismogramları ve bunlara karşılık gelen spektrogramları. Spektrogramlar, dalga formlarının düşey bileşeni kullanılarak hesaplanmıştır. Yüksek enerjili içerik mor, kırmızı ve yeşil renklerle



4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında 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. KRDAE-BDTİM ve AFAD-DDB sismik ağlarından elde edilen toplam 9 istasyona ait sismogramlar analiz edilmiştir. Patlamanın başlangıç zamanı 18:07:53.87 (UTC) olarak belirlendi. Konumu kabul edilebilir bir hata oranı ile 38.6957°K-30.5102°D konumunda tespit edildi. Patlamanın süreye bağlı büyüklük için ve yerel büyüklüğünü belirlemek amacıyla üç bileşenli dalga formu istasyonları kullanılmıştır. Bu doğrultuda $M_d=1.4$ ve $M_L=1.4$ 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 kriterlere dayalı tahmin yapabilen üç farklı method tercih edilmiştir. Krater çapına dayalı tahmin yönteminde patlama esnasında oluşan kraterle dair 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 güvenilirlerdir. Bu doğrultuda 2012 Afyon patlamasında infilak eden mühimmat miktarı 21 ton olarak tahmin edilmiştir.

Aynı zamanda frekans ortamında yapılan incelemelerde sismik dalgaları 3 Hz civarında baskın ve akustik dalgalar ise 20 Hz civarında baskındır. Spektrogramlar 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 açısında oldukça aktif bir bölge olması nedeniyle farklı gözlem evlerine ait çok sayıda istasyon ile izlenmektedir. Bu sayede patlama gibi adli araştırmalara tabii 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, acil durum planlaması ve idari soruşturmalara fayda sağlanabilir.



KAYNAKLAR

- Ambraseys NN (1990) Uniform magnitude re-evaluation of European earthquakes associated with strong-motion records. *Earthq Eng Struct Dyn* 19:1–20. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290190103>
- Ambrosini, RD, Luccioni, BM, Danesi, RF, Riera, JD ve Rocha, MM (2002). Yer yüzeyinde veya üstünde patlayıcı yüklerin oluşturduğu kraterlerin boyutu. *Şok Dalgaları* , 12 , 69-78.
- 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. *J Seismol* 21:209–220. <https://doi.org/10.1007/s10950-016-9598-0>
- Bache TC (1982) Estimating the yield of underground nuclear explosions. *Bull Seismol Soc Am* 72:131–168. <https://doi.org/10.1785/BSSA07206B0131>
- Bowers D, Marshall PD, 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. *Geophys J Int* 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.
- Brocher TM (2003) Detonation charge size versus coda magnitude relations in California and Nevada. *Bull Seismol Soc Am* 93:2089–2105. <https://doi.org/10.1785/0120020185>
- Budakoğlu E, Horasan G (2018) Classification of seismic events using linear discriminant function (LDF) in the Sakarya region, Turkey. *Acta Geophys* 66:895–906. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0179-1>
- Budakoğlu, E., & Horasan, G. (2018). Classification of seismic events using linear discriminant function (LDF) in the Sakarya region, Turkey. *Acta Geophysica*, 66, 895-906.
- Budakoğlu, E. (2022). Seismological investigations of fireworks factory explosions in Hendek-Sakarya (Turkey). *Journal of Seismology*, 26(2), 283-299.
- Bull JW, Woodford CH (1998) Kamuflajlar ve bunların pist desteği üzerindeki etkileri. *Hesaplama Yapısı* 69(6):695–706. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00135-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00135-7)
- Brode, H. L. (1955). Numerical solutions of spherical blast waves. *Journal of Applied physics*, 26(6), 766-775.

- Evers, LG, Ceranna, L., Haak, HW, Le Pichon, A. ve Whitaker, RW (2007). Belçika'daki Ghislenghien yakınlarındaki gaz boru hattı patlamasının sismoakustik analizi. *Amerika Sismoloji Derneği Bülteni* , 97 (2), 417-425.
- Evers LG, Ceranna L, Haak HW, Le Pichon A, Whitaker RW (2007) A seismoacoustic analysis of the gas-pipeline explosion near Ghislenghien in Belgium. *Bull Seismol Soc Am* 97:417–425. <https://doi.org/10.1785/0120060061>
- Ford SR, Rodgers AJ, Xu H, Templeton DC, Harben P, Foxall W, Reinke RE (2014) Partitioning of seismoacoustic energy and estimation of yield and height of burst depth of burial for near surface explosions. *Bull Seismol Soc Am* 104:608–623. <https://doi.org/10.1785/0120130130>
- Ghalib, H. A., Kraft, G., Alchalbi, A., & Wagner, R. (2022). Seismic location of the 4 August 2020
- 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 Appl Geophys* 171:599–619. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0575-4>
- Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo, Lee Minner (2003) “SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to “The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology”, Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.
- Goldstein, P., A. Snoke, (2005), “SAC Availability for the IRIS Community”, Incorporated Institutions for Seismology Data Management Center Electronic Newsletter.
- Görgün E (2003) Calibration of various magnitude scales in Turkey using broadband data. Dissertation, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Boğaziçi University
- Hedlin MA, Minster JB, Orcutt JA (1989) The time-frequency characteristics of quarry blasts and calibration explosions recorded in Kazakhstan, USSR. *Geophys J Int* 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.
- Hohensinn, R. (2019). Detection of hazardous ground movements with instantaneous velocity estimates by GNSS (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Holzer, T. L., Fletcher, J. B., Fuis, G. S., Ryberg, T., Brocher, T. M., & Dietel, C. M. (1996). Seismogram offers insight into Oklahoma City bombing. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 77(41), 393-399.
- Horasan G, Güney AB, Küsmezer A, Bekler F, Ögütçü Z, Musaoğlu N (2009) Contamination of seismicity catalogs by quarry blasts: an example from Istanbul and its vicinity, northwestern Turkey. *J Asian Earth Sci* 34:90–99. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.03.012>
- <https://seiscode.iris.washington.edu/projects/sac>, erişim tarihi: 26.09.2023

<https://pnsn.org/spectrograms/>

<https://www.habername.com/haber-iste-rakamlarla-afyon-patlamasi-80256.htm>,
Erişim Tarihi 10 Eylöl 2023

<https://www5.tbmm.gov.tr/tutanak/donem24/yil4/ham/b00801h.htm>, Erişim Tarihi: 15
Kasım 2023.

Kalafat D, Gürbüz C, Üçer B (1987) Batı Türkiye’de Kabuk ve Üst Manto Yapısının
Araştırılması. Deprem Araştırma Bülteni 59:43–64 (in Turkish)

Kim, W. Y., Sykes, L. R., Armitage, J. H., Xie, J. K., Jacob, K. H., Richards, P. G., ...
& 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

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

Kinney GF, Graham KJ (1985) Internal blast. In: Kinney GF, Graham KJ (eds)
Explosive Shocks in Air. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 137–160

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. *Bull. Seismol.Soc.*

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.

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(2), 527-542.

Koper KD, Wallace TC, Reinke RE, Leverette JA (2002) Empirical scaling laws for
truck bomb explosions based on seismic and acoustic data. *Bull Seismol Soc
Am* 92:527–542. <https://doi.org/10.1785/0120000242>

Koper, K. D., Wallace, T. C., & Aster, R. C. (2003). Seismic recordings of the Carlsbad,
New Mexico, pipeline explosion of 19 August 2000. *Bulletin of the
Seismological Society of America*, 93(4), 1427-1432.

Kuran, F. & Polat, S. (2012). Afyonkarahisar mühimmat deposu patlamasının sismik-
akustik kayıtlar kullanılarak irdelenmesi. An Investigation of 5 th September
2012 Afyonkarahisar Ammunition Depot Explosion by Using Seismic-Acoustic
Records.

KURAN, F., & POLAT, S. (2021). 3 Temmuz 2020 Tarihinde Sakarya İli Hendek
İlçesinde Meydana Gelen Havai Fişek Fabrikası Patlamasının Sismik-Akustik
Kayıtlar Kullanılarak İncelenmesi. *OHS ACADEMY*, 4(1), 15-26.

Lacoss RT (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 (No.
UCRL-ID-122623). Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore,
CA (United States).

- Lee WHK, Lahr JC (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.
- Needham, C.E. (2010). Some Basic Air Blast Definitions. In: Blast Waves. Shock Wave and High Pressure Phenomena. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05288-0_2
- Nuttli OW (1988) Lg magnitudes and yield estimates for underground Novaya Zemlya nuclear explosions. Bull Seismol Soc Am 78:873–884. <https://doi.org/10.1785/BSSA0780020873>
- Ottmöller, L., & Evers, L. G. (2008). Seismo-acoustic analysis of the Buncefield oil depot explosion in the UK, 2005 December 11. *Geophysical Journal International*, 172(3), 1123–1134.
- Kuran, F., & Polat, S. 5 Eylül 2012 Afyonkarahisar Mühimmat Deposu Patlamasının Sismik-Akustik Kayıtlar Kullanılarak İrdelenmesi An Investigation of 5 th September 2012 Afyonkarahisar Ammunition Depot Explosion by Using Seismic-Acoustic Records.
- Ottmöller L, Evers LG (2008) Seismo-acoustic analysis of the Buncefield oil depot explosion in the UK, 2005 December 11. *Geophys J Int* 172:1123–1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03701.x>
- Pomeroy PW, Best JW, McEvilly TV (1982) Test ban treaty verification with regional data a review. Bull Seismol Soc Am 72:89–129. <https://doi.org/10.1785/BSSA07206B0089>
- Pilger, C., Gaebler, P., Hupe, P., Kalia, A. C., Schneider, F. M., Steinberg, A., ... & Ceranna, L. (2021). Yield estimation of the 2020 Beirut explosion using open access waveform and remote sensing data. *Scientific reports*, 11(1), 14144.
- Rigby SE, 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, 19–23 September, 13 p.
- Ringdal, F., Marshall, P. D., & Alewine, R. W. (1992). Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site. *Geophysical Journal International*, 109(1), 65–77.
- Rogers, J. D., & Koper, K. D. (2012). Some practical applications of forensic seismology. Missouri University of Science and Technology, (April 27, 2012).
- Schneider FM, 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 Planet Sci Lett* 502:104–114 <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.08.034>
- Settles GS (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. *Am Sci* 94 (1):22–31
- Shearer, P. M. (2009). Introduction to seismology. Cambridge University Press.

- Wüster J (1993) Discrimination of chemical explosions and earthquakes in central Europe a case study. *Bull Seismol Soc Am* 83:184–1212. <https://doi.org/10.1785/BSSA0830041184>
- Yılmaz 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 Project Number 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. *Seismol Res Lett* 87:826–836. <https://doi.org/10.1785/0220150229>
- Zhao, L. F., Xie, X. B., Wang, W. M., Hao, J. L., & Yao, Z. X. (2016). Seismological investigation of the 2016 January 6 North Korean underground nuclear test. *Geophysical Journal International*, 206(3), 1487-1491.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İrem ÖZKAVAF

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakülte, Jeofizik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2021,Yıldız Teknik Üniversite, İşletme Anabilim Dalı, İşletme Yönetimi Tezsiz Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013-2014 yılları arasında özel bir yapı denetim firmasında çalıştı.
- 2016 ve halen özel bir bireysel emeklilik ve hayat sigortası şirketinde yönetici pozisyonunda çalışmaktadır.