

5 EYLÜL 2012 AFYONKARAHİSAR SAR MÜHİM MAT DEPOSU PATLAMASININ SİSMİK KAYITLAR KULLANILARAK İNCELENMESİ

Fikret KURAN¹ ve Süleyman POLAT²

¹ *Yüksek Mühendisi, Vakıflar Genel Müdürlüğü, Ankara*
² *Kimya Mühendisi, Mühimmat ve Patlayıcı Uzmanı, Adli Bilirkiçi, Ankara*
Email: f.kuran@vgm.gov.tr
suleymanpolat2009@gmail.com

ÖZET:

Afyonkarahisar’da çoğunluklu olarak el bombalarının bulunduğu askeri mühimmat deposunda, 5 Eylül 2012 tarihinde, resmi açıklamalara göre yerel saat ile 21:15 sıralarında patlama meydana gelmiştir. Patlamada 25 asker şehit olmuştur. Gelişen teknoloji ve sanayiye bağlı olarak dünyada sıklıkla kontrollü olarak yapılan maden ocakları patlatmalarının yanı sıra, petrol-doğalgaz borularında, kimyasal ve patlayıcı madde üreten fabrikalarda, askeri mühimmat depolarında kontrolsüz büyük patlamalar meydana gelmektedir. Yine, Amerika Birleşik Devletleri’nde New Mexico’da ilk nükleer denemenin yapıldığı 1945 yılından günümüze çok sayıda askeri amaçlı nükleer bomba denemeleri yapılmıştır. Kimyasal ve nükleer kaynaklı büyük patlamalar sonucunda yer kabuğunda titreşimler olmakta ve yapay depremler meydana gelmektedir. Dünyada çeşitli araştırmacılar tarafından insan kaynaklı meydana gelen büyük patlamalar, uçak kazaları ve büyük bombalı terör saldırıları sismik kayıtlar kullanılarak incelenmiştir. Afyonkarahisar’da ve ülkemizde meydana gelen bu tür patlamalarda bilimsel olarak konunun incelenmesi ve sismik kayıtlarla değerlendirilmesi yapılmamaktadır. Bu çalışmada, Afyonkarahisar’da meydana gelen mühimmat deposu patlamasına ait sismograf kayıtlarından elde edilen yer hareketi ve akustik titreşimler kullanılarak; patlamanın tam olarak zamanı, koordinatları, kaç kez patlama olduğu, infilak eden mühimmatın TNT e dengeli miktarı hesaplanmaktadır. Sismik kayıtlardan elde edilen bu bilgiler, acil durum yönetiminde ve kriz planlamasında son derece yararlı olabilmektedir. Yine sismik kayıtlardan elde edilecek bu bilgilerin adli ve idari soruşturmalarda da çok faydalı olacaktır.

ANAHTAR KELİMELER : Mühimmat Deposu, Patlama, Sismik Kayıt

1.GİRİŞ

İnsan kaynaklı oluşan patlamalar, depremlere benzer titreşimlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu yer sarsıntıları yapay deprem olarak adlandırılmaktadır. Özellikle soğuk savaş döneminde nükleer denemeler sismograf kayıtları ile takip edilmiş, deney yerleri ve nükleer testin büyüklüğü diğer ülkeler tarafından belirlenmiştir. Sismik kayıtlar nükleer testlerin izlenmesi yanı sıra, bombalı terörist saldırıları, maden kazaları, uçak kazaları, yakıt boru hattı patlamaları, yakıt deposu patlamaları gibi, günümüze kadar birçok sıradan ve toplumsal etkisi büyük olan olaylarda kullanılmıştır. 1995 yılında ABD’nin Oklahoma Federal Hükümet Binası’na düzenlenen bombalı saldırı, 1998’de El Kaide terör örgütü tarafından A.B.D’nin Kenya-Nairobi Büyükelçiliği Binası’na düzenlenen bombalı saldırı, 2000 yılında Rus Nükleer Denizaltısı Kursk gemisinin Barents Denizi’nde patlaması ve batması, ABD’de New Mexico-Carlsbad doğalgaz boru hattı patlaması, 2004 yılında İngiltere Buncfield kentindeki yakıt deposu patlaması, 1988 yılında Pan Am Havayollarının 103 Sefer Nolu Uçuşuna scoçya Lockerbie üzerinde bombalı saldırı, 2010 yılında Güney Kore’ye ait korvetin patlaması ve batması, 2007 yılında Slovakya Novaky mühimmat fabrikası patlaması, 11 Eylül 2001’de El Kaide terör örgütünün New York Dünya Ticaret Merkezi’ne yolcu uçaklarıyla saldırısı sismograf kayıtlarının kullanıldığı

önemli olaylardan bazılarıdır. Bu olaylarda bazen saldırı veya kazanın zamanı çok önemli olurken bazı olaylarda ise coğrafik konumu daha önemli olabilmektedir. Örneğin Lockerbie olayında sismograf kayıtlarından uçanın düştüğü yer 300 metre hassasiyetle hesaplanabilmektedir (Reynolds, 2011). Sismik kayıtlar ile patlamanın ne zaman, nerede, ne kadar büyüklükte ve kaç kez patlama olduğu belirlenebilmektedir.

2. 5 EYLÜL 2012 AFYONKARAHİSAR SARIMMATE DEPOSU PATLAMASI VE PATLAMAYA AKAUSTİK KAYITLAR

Afyonkarahisar'da 05.09.2012 tarihinde askeri mühimmat deposunda patlama meydana gelmiş ve 25 asker şehit olmuştur. Yine aynı gün içerisinde ülkemizde meydana gelen depremlerin izlendiği Bakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi web sitesinde, saat 21:07:55,53'de Afyonkarahisar merkezli lokal magnitüt büyüklüğü $M_L:2.1$ olan bir depremin olduğu yayınlanmıştır. Deprem çözümünde 4 sismograf istasyonu dikkate alınmıştır. Bu sismograf istasyonları; Afyon-Bolvadin (BLV), Afyon Kızılören (KZIL), Isparta-Eğirdir (BAGO), Uşak-Karahanlı (KHAL) istasyonlarıdır (ekil 1).

Tablo-1. Afyonkarahisar Merkez Deprem Bilgileri (www.deprem.gov.tr adresinden alınmıştır)

Zaman	Saat (TS)	Enlem	Boylam	Yer	Derinlik	Büyüklük (M_L)
05.09.2012	21:07:55.53	38.7585	30.4962	Merkez-Afyon	7.00 (km)	2.1

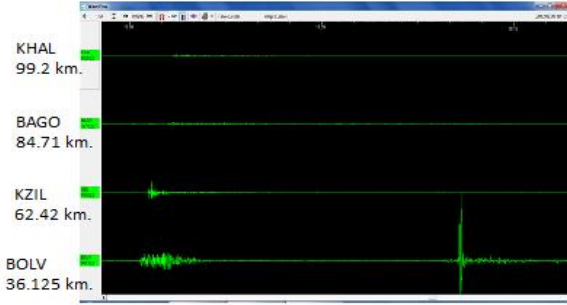


ekil 1. Patlama Yeri ve Sismik istasyonların Coğrafik Konumları

Deprem merkezi ile patlama yeri arasında 5.2 km. kadar bir fark bulunmaktadır. Lokal magnitüt büyüklüğü $M_L:2.1$ olan bir depremin patlama yerine ne kadar yakın olursa olsun, yapıda veya insanlarda bir etkisi olması mümkün değildir. Bu büyüklükteki depremi insanların hissetmesi dahi çok zordur. Dolayısıyla deprem sonucunda ortaya bir kıvılcım çıkması, insanların dengesini bozması, yapıda veya yapı tesisatında bir hasara neden olması da söz konusu değildir. Kayıtların incelenmesi sonucunda anılan saatte meydana gelen depremin, mühimmat deposundaki patlama sonucu oluşan yapay deprem olduğu görülmektedir. Yapay depremin magnitüt büyüklüğü sismik kayıtların yeniden değerlendirilmesi sonucu $M_L=2.23$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda ekil 1'de verilen sismik istasyonlara ilave olarak Burdur-BRDR (121.7 km.) ve Kadınhanı-KDHN (139.6 km) istasyonları da dikkate alınmıştır. Yapay depremin oluştuğu zamanı, patlama yeri ile sismograf istasyonları arasındaki gerçek mesafeler dikkate alınarak yerel saat ile 21:07:55.95±1.0 olarak hesaplanmıştır. Resmi açıklamalarda ise patlamanın tam oluştuğu zamanı bilinmemekte ve 21:15 sıralarında olduğu ifade edilmektedir.

Afyonkarahisar'daki patlamada olduğu gibi, yüzeyde meydana gelen büyük patlamalarda, sismograf cihazları sismik dalgaların yanı sıra akustik (ses) dalgalarını da kaydedebilmektedir (Koper vd., 1999; 2002; Gitterman ve Hofstetter, 2012; Gitterman, 2013; Kristekova vd., 2008; Evers vd., 2007). Kayıtlardan görüleceği üzere, yalnızca patlama merkezine 36.125 km uzaklıktaki BOLV istasyonunun her üç bileşeninde akustik dalgaların kaydedildiği görülmektedir (ekil 2-a). Diğer istasyonların görece olarak daha uzak olmasının yanı sıra, patlamanın olduğu bölgenin ve istasyonun bulunduğu yerin coğrafik koşulları ve sıcaklık-rüzgar durumuna göre

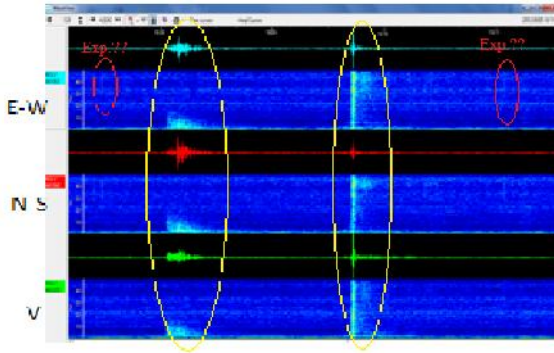
aynı mesafede fakat farklı yönlerdeki istasyonlarda akustik dalgalar oluşmayabilmektedir (Gitterman ve Hofstetter, 2012). Akustik dalgaların süresi patlamaya göre çok kısa olmasına karşılık, yüzey patlamalarında genli sismik dalgalara göre daha büyük olmaktadır. Afyonkarahisar'daki mühimmat deposunda da gözlenen bu durum, patlama ile oluşan enerjinin büyük bir kısmının atmosfere yayıldığını, sismik enerjinin daha düşük olduğunu göstermektedir (ekil 2-b).



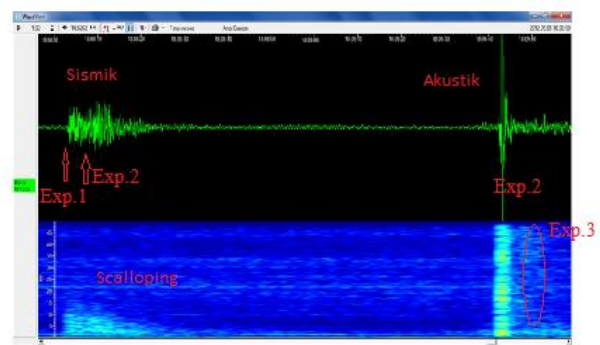
(a)



(b)



(c)



(d)

ekil 2. Patlamanın Kaydedildiği Sismograf stasyonlarının Düşey Bileşenleri (a) Bolvadin-BOLDV stasyonu Kaydının Üç Bileşeni (b) BOLDV stasyonu Kaydının Spektrogram Grafikleri-Sarı renkli elips içindekiler kesin olarak belirlenen patlamalar, kırmızı elips içindekiler muhtemel patlamalar (c) BOLDV stasyonu Düşey Bileşeni Spektrogram Grafiği (d)

BOLDV istasyonuna ilk P dalgası 21:08:03.16'da gelmiştir. Akustik dalgalar ise bu istasyona ilk P dalgasının ulaşmasından 99.63 sn sonra 21:09:42.79'da gelmiştir. Akustik dalgaların havadaki hızı ok dalgası ile birlikte artmakta, daha sonra elastik davranış ile birlikte hava sıcaklığına bağlı olarak hızına kadar azalmaktadır (Koper vd., 2002). Patlamanın olduğu saat diliminde Afyonkarahisar'daki sıcaklık 22.5°C , rüzgar güney yönünde ve hızı 0.9 m/sn kadardır. Ses dalgalarının atmosferdeki hızı, ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişmekte ve söz konusu sıcaklıkta hava yoğunluğu (airblast) etkisinin olmadığı durumda 344.8 m/sn olmaktadır. Rüzgar hızı çok düşüktüğündan akustik dalgaların hızında etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. Sismik istasyona olan mesafe ve hava yoğunluğunun olmadığı durumdaki akustik dalga hızı dikkate alındığında akustik dalganın BOLDV sismografına 104.77 sn kadar sonra ulaşması gerekmektedir. Hava yoğunluğu etkisi ile bu süre daha da kısalmaktadır. Bu durumda akustik dalganın ortaya çıkma zamanı diğer bir ifade ile patlama zamanı $21:07:58.02 \pm 1.0$ 'e karşılık gelmektedir. Sismik dalgaların analizinden ise patlama zamanı 2.07 saniye daha erken $21:07:55.95 \pm 1.0$ olarak hesaplanmıştır. Zamandaki bu fark en az 2.07 saniye aralıklı iki ayrı patlama meydana geldiğini göstermektedir. Exp.1 olarak kodlanan ve $21:07:55.95 \pm 1.0$ 'de meydana gelen ilk patlama, patlama yerine en yakın 4 sismik istasyonda yalnızca sismik dalgalar üretmişken, bu patlamadan en az 2.07 saniye sonra $21:07:58.02 \pm 1.0$ 'de olan ikinci patlama (Exp.2) ise tüm istasyonlarda sismik dalgaların yanı sıra patlama yerine en yakın istasyon olan BOLDV

sismik istasyonunda akustik dalgalar da üretmiştir. Bu nedenle ilk patlamanın ikinciye oranla daha küçük ve ağırlıklı yönlü bir patlama olduğu düşünülmektedir. Exp.2 olarak kodlanan ikinci patlama ise ilk patlamaya göre daha büyüktür ve patlama yönü yukarıya doğrudur. Diğer bir soru ise her iki ayrı patlamada mühimmatlar eş zamanlı olarak mı infilak etmiştir yoksa milisaniye mertebesinde gecikmeli olarak mı infilak etmiştir? Milisaniye mertebesinde gecikmeli patlamalarda, birden çok patlama olup olmadığı sismik dalgaların zaman ortamında analizi ile bulunması çoğu durumda mümkün olmamaktadır. Bu nedenle patlama kaydının zaman ve frekans ortamında analizi yapılarak spektrogram grafikleri çıkarılmıştır. Frekans-zaman ortamında analiz ile Slovyakya'da Novaky Mühimmat Fabrikası'nda meydana gelen patlama sayısı Kristekova vd. (2008) tarafından belirlenebilir. Sismik dalgaların spektrogram grafiğinde deniz kabuğunda ekilde girinti-çıkıntılar (scalloping) görülmektedir. Benzer durum akustik kayıtların zaman-frekans analizinde daha belirgindir. Bu davranış biçimi milisaniye mertebesinde gecikmeli patlamalarda gözlenen bir durumdur (Leach ve Dowla, 1995). Bu çalışmada gecikmeli patlama adedi belirlenememiştir. Bu nedenle Exp.1 ve Exp.2 olarak adlandırılan her iki patlamanın milisaniye mertebesinde gecikmeli patlama olduğu düşünülmektedir (ekil 2-d).

Tablo 2. Sismik ve Akustik Dalgardan Kesin Olarak Belirlenen Patlamalar

Patlama No:	Kesin Olarak Belirlenen Patlamalar
Exp.1	21:07:55.95±1.0 (Küçük Büyük Patlama-ağırlıklı yönlü)
Exp.2	21:07:58.02±1.0 (En Büyük Patlama-yukarı yönlü)
Exp.3	21:08:03.03±1.0 (En Büyük Patlama Sonrası Göreli Olarak Küçük-Yukarı Yönlü)

Frekans-zaman ortamındaki spektrogram grafiklerinin sismik kayıt öncesi ve sonrasına bakıldığında 21:07:27.53-21:09:47.80 - 21:11:03.72 - 21:14:14.99 - 21:15:29.52 - 21:17:59.10 ve 21:20:27.90 zamanlarında yüksek frekanslı ve çok kısa süreli genlik artışıları görülmektedir (ekil 2-c,d). Sürenin kısa ve yüksek frekanslı olması bunların akustik titreşimlere bağlı olduğu düşünülmektedir. Frekans-zaman ortamındaki bu genlik artışlarının, enerjisinin büyük kısmının atmosfere yayıldığı, patlama yönü yukarı doğru olan ve Exp. 1 ve Exp.2 kodlu patlamaya göre çok küçük patlamalar kaynaklı olması muhtemeldir. Akustik dalgaların seyahat süresi baz alındığında patlama zamanları sırası ile 21:05:42.76 - 21:08:03.03 - 21:09:18.95 - 21:12:30.22 - 21:13:44.75 - 21:16:14.33 ve 21:18:43.13 olmaktadır. Bu durumda ilk küçük patlama yerel saat ile 21:05:42.76'da, diğer bir ifade ile Exp. 1 olarak kodlanan patlamadan 135,05 saniye önce meydana gelmiş olması muhtemeldir. Ancak kayıtlardaki sinyal/gürültü oranının çok düşük olması nedeniyle 21:08:03.03 haricindeki bu anomalilerin kesin olarak patlamaya ait olduğu söylenememektedir.

3. SİSMİK VE AKUSTİK KAYITLAR KULLANILARAK PATLAYICI MİKTARININ BELİRLENMESİ

Özellikle son yıllarda büyük endüstriyel kazaların ve büyük ölçekli terör saldırılarının artması nedeniyle yüzey patlamalarında patlamanın büyüklüğü ve infilak eden patlayıcı miktarını belirlemeye yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Bu konu hakkında son 10 yıldır özellikle Amerika Birleşik Devletleri ve Fransa tarafından deneysel çalışmalar da içeren kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda patlayıcı miktarını belirlemeye yönelik kullanılan bazı parametreler hakkında aşağıda kısa bilgiler verilmektedir. Bu parametrelere göre Afyonkarahisar Mühimmat Deposu'nda infilak eden mühimmatın büyüklüğü hesaplanmıştır.

3.1. Yapay Depremın Magnitüt Büyüklüğü Parametresi

Patlama sonrası ölçülen magnitüt değeri ile patlayıcı miktarı arasındaki ilişki, patlamanın su altında, karada, yada havada olmasına göre büyük değişkenlik göstermektedir. Denizlerde meydana gelen patlamalarda karadakilere göre daha az patlayıcı miktarı ile daha büyük sismik dalga genliği olmaktadır. Diğer bir ifade ile daha büyük yer sarsıntısı meydana getirmektedir (Rogers ve Koper; Gitterman vd., 2007). Karadaki

patlamalarda, patlamanın yerin altında mı yoksa yüzeyde mi gerçekleştiği de son derece önemlidir. Patlamanın yüzeyde ve derinde olması, ortaya çıkan sismik enerji ile patlayan miktar arasındaki ilişkiyi de göstermektedir (Gitterman ve Hofstetter, 2012). Afyonkarahisar'daki patlama yüzeyde meydana gelmiştir. Yüzey patlamalarında enerjinin büyük bir kısmı, etrafındaki cisimlere ve şok dalgası (airblast) olarak atmosfere yayılmakta, zemine aktarılan sismik enerji azalmaktadır. Patlama, çevredeki yapılarda deformasyon, patladığı yerde ise krater oluşumuna neden olmaktadır (Gitterman ve Hofstetter, 2012). ABD'de Kaliforniya ve Nevada'da yüzeyde ve derinde yapılan 322 kontrollü patlatma sonucu, coda magnitüt (M_c) ile patlayıcı miktarı W (kg) arasında Denk.1'de verilen ilişki geliştirilmiştir. Kullanılan patlayıcı miktarı 25 kg ile 1 000 000 kg arasında değişmektedir. Ölçülen magnitüt büyüklükleri ise 0.5 ile 3.9 arasındadır (Brocher, 2003).

$$M_c = 0.31 + 0.50 \log(W) \quad (1)$$

Kuran (2014-a) tarafından yapay deprem magnitüt büyüklüğü parametresi kullanılarak Afyonkarahisar'daki patlama, Kırıkkale Hasandede Barut Fabrikası'nda 20.08.2013 tarihindeki patlama ve 04.05.2013 tarihinde Suriye tarafından Suriye'deki Ham Cemraya Askeri Araştırma Merkezi ve Mühimmat Deposu'na düzenlenen hava saldırısı sonucu oluşan patlamalar analiz edilmiş ve patlamaların zamanları ve büyüklükleri tespit edilmiştir. Yine Kuran (2014-b) tarafından Suriye'deki iç savaşta tünel kazılarak büyük miktarda bombalı saldırılar yapay deprem magnitüt parametresi kullanılarak analiz edilmiş, saldırıların zamanı ve saldırılarda kullanılan mühimmatın büyüklüğü belirlenmiştir.

3.2. İkincil Şok Dalgası Parametresi

Gitterman (2013), Gitterman ve Hofstetter (2012) tarafından, Suriye'de Negev Çölü, Sayarim Vadisi'nde deneysel olarak yapılan büyük ölçekli yüzey patlamalarından elde edilen veriler ışığında, patlayıcı miktarını belirlemek için ikincil şok dalgası parametresi önerilmektedir. Bu kavram önceden bilinmesine karşılık, detaylı olarak inceleyen çok az çalışma bulunmaktadır. İlk kez bu çalışmalar ile kapsamlı olarak irdelenmiş ve patlayıcı miktarının hesaplanması amaçlı bir parametre olarak kullanılmıştır. İkincil şok dalgası, ana şokun ardından şok dalgalarının yeryüzü arasındaki etkileşimiyle oluşan ve bazen ikiden fazla olmak üzere gecikmeli olarak ve genliği azalarak atmosfere yayılan şok dalgaları olarak tanımlanmaktadır. İkincil şok dalgası gecikme zamanı, ikincil şok dalgası ile ana şok dalgasının kayıtçıya varış zaman farkı olarak tanımlanmaktadır ($t = t_{SS} - t_{MS}$). ANFO türü patlayıcı kullanılarak yapılan kontrollü patlatmalar sonucunda TNT e de eşdeğer patlayıcı miktarı ile ikincil şok dalgası arasındaki ilişki;

$$Dt \left(s/m / kg^{1/3} \right) = 0.0057565 \log(R) + 0.0033 \quad 2 < R < 1000m / kg^{1/3} \quad (2)$$

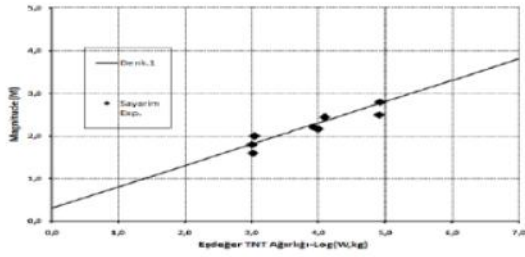
IMI (Israel Military Industries Ltd) türü yüksek patlama hızına sahip patlayıcı kullanılarak elde edilen ilişki ise

$$Dt \left(s / kg^{1/3} \right) = 0.0039144 \log(R) + 0.00174 \quad 4 < R < 14m / kg^{1/3} \quad (3)$$

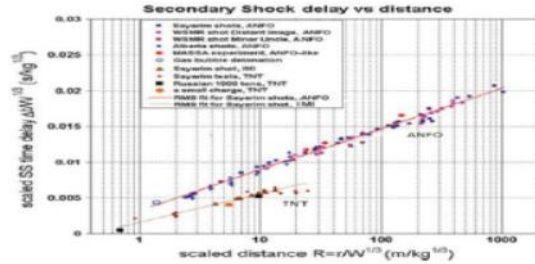
olarak verilmektedir. Aynı miktarda ancak yüksek patlama hızına sahip patlayıcılarda ana şok ile ikincil şok dalgası arasındaki zaman farkı azalmaktadır. Aynı tür patlayıcının kullanılması durumunda ise patlayıcı miktarının artmasına bağlı olarak ikincil şok dalgası gecikme zamanı artmaktadır. Bu denklemlerde Dt , ölçeklendirilmiş ikincil şok dalgası gecikme zamanı (s), R ölçeklendirilmiş mesafe (m) olup;

$$Dt = \Delta t / W^{1/3} \left(s / kg^{1/3} \right); R = r / W^{1/3} \left(m / kg^{1/3} \right) \quad (4)$$

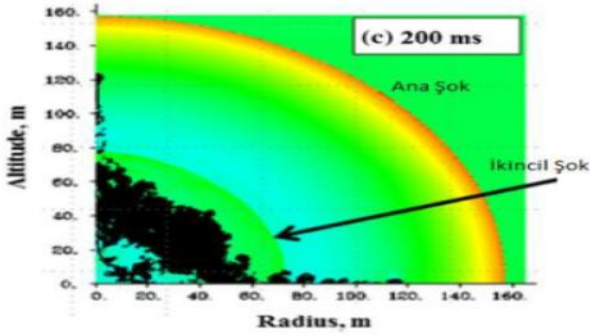
olarak ifade edilmektedir. Denklem 4’de t ölçülen ikincil ok dalgası-ana ok dalgası varı zamanları farkı (saniye), r kayıtçı ile patlama yeri arasındaki mesafe (m), W ise patlayıcının kg biriminde TNT e de eri miktarıdır. Patlama zamanının bilinmesine ihtiyaç olmaması, ikincil ok dalgalarının sismik ve akustik kayıtçılar ile kaydedilebilmesi, sıcaklık, rüzgar hızı ve yönünden etkilenmemesi ikincil ok dalgası parametresinin kullanım avantajlarıdır. Ayrıca nükleer patlamalarda ikincil ok dalgası olu madı ndan nükleer patlama ayrımı için de bir parametre olarak kullanılabilir. (Denk 5)



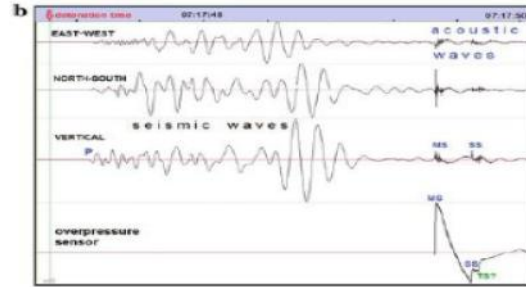
(a)



(b)



(c)



(d)

ekil-3.Sayarım Vadisi’nde Yapılan Yüze Patlatmaları ve Denk.1(a) Ölçklendirilmi kincil ok Dalgası ve Ölçklendirilmi Mesafe li kisi (b) kincil ok Kavramı (c) Sayarım Vadisi’nde Yapılan 102 ton ANFO Patlatma Deneyine Ait Sismik ve Akustik Dalga Kaydı (d)

3.3. Dü ey Pik Genli i Parametresi

Gitterman vd. (2005;2007) tarafından, ABD ve srail’in ortak olarak Negev Çölü Sayarım Vadisi’nde askeri mühimmat kullanılarak yapılan 19 adet yüze patlatmaları sonucunda dü ey pik genli i ile patlayıcı miktarı (TNT e de eri) arasında ili ki geli tirilmi tir. Kullanılan mühimmatlar ANFO, TNT, Henamit ve Composition B’den olu maktadır. Deneylerde sismometre ve infrasound cihazları kullanılarak sismik ve dü ük frekanslı ses dalgaları kaydedilmi tir. Deneylerden elde edilen Dü ey Pik Hız Genli i (VPA) ili kisi, P dalgası fazı kullanılarak, sismik kayıtçının 35 km mesafede olmasına ve VPA ile mesafe azalım ili kisi $VPA=r^{-1.7}$ baz alınarak çıkarılmi tir (Denk 5). Bu denklemde VPA; Dü ey Pik Genli i ($\mu\text{m/s}$), W (kg) TNT e de eri patlayıcı a ırlı ıdır.

$$VPA(\sim m / sn) = 0.0002258W^{0.918} \quad (5)$$

3.4 Akustik ok Dalgası Varı Zamanı Parametresi

ABD’nin Oklahoma Federal Hükümet Binasına yapılan bombalı saldırı ve El Kaide terör örgütünün Kenya Nairobi Büyükelçili i’ne düzenlede i bombalı saldırı sonrası Koper vd. (2002) tarafından patlayıcı miktarını sismik ve akustik kayıtlar kullanılarak tespit edebilmek için New Mexico’daki White Sand Missile Range alanında büyük miktarda patlayıcılar kullanılarak deneysel çalı ma yapılmı tir. Bu çalı mada e de er TNT

miktarını belirlemek için kullanılan parametrelerden birisi de akustik dalgaların kayıt istasyonuna varı zamanıdır (travel time-tt parametresi). Daha önce de belirtildi i üzere, büyük miktarda yüzey patlamalarında ok dalgası atmosfere da ılmakta ve bu ok dalgaları sismik kayıtçılar tarafından kaydedilebilmektedir. ok dalgası hızı patlayıcı miktarına ba lı olarak artmakta, daha sonra enerji kaybederek elastik dalga hızına dü mektedir. ok dalgasının kayıt istasyonu arasındaki ortalama hızı $v = r/tt$ denkleminde hesaplanmaktadır. ortalama ok dalgası hızı (m/s), r patlamanın istasyona olan mesafesi (m), tt ok dalgasının istasyona varı süresidir (s). Deneysel çalı ma sonucu Denk.6 ile ifade edilen ili ki bulunmu tur. Bu denklemde 15°C ve 101.325 kPa atmosfer basıncına dönü türülmü (referans de erler) ortalama ok dalgası hızı (m/sn), R ölçeklendirilmi mesafedir ($\text{m/kg}^{1/3}$). f_d ve f_t referans atmosferik ko ullara dönü türme parametreleri, p_{obs} rakıma ba lı olarak atmosfer basıncı, t_{obs} gözlenen sıcaklık (Kelvin), p_{ref} ve t_{ref} ise referans atmosfer basıncı ve sıcaklıktır (Kelvin).

$$\Sigma = 1100R^{-1} + 340; 50 < R < 400$$

$$R = \left(\frac{f_d}{W^{1/3}} \right) r; \Sigma = \dagger_{obs} \frac{f_d}{f_t} \quad (6)$$

$$f_d = \left(\frac{p_{obs}}{p_{ref}} \right)^{1/3} \left(\frac{t_{obs}}{T_{ref}} \right)^{-1/3}; f_t = \left(\frac{p_{obs}}{p_{ref}} \right)^{1/3} \left(\frac{t_{obs}}{T_{ref}} \right)^{1/6}$$

ok dalgası varı zamanı parametresi atmosferik artlara (sıcaklık, rüzgar hızı ve yönü) ve bunlardaki belirsizliklere ba lı oldu undan görelî hata payı daha yüksek olmaktadır.

3.5. Krater Boyutları Parametresi

Patlayıcı miktarının belirlenmesinde di er bir yöntem ise patlama sonucunda olu an kraterin geni lik ve derinli ine göre belirlenmesidir. Krater boyutlarının belirlenmesi ancak kriz ortamının, patlamaların, buna ba lı olarak olu an yangınların bitmesi ve uzmanların olay mahallinde inceleme yapabilecek sürenin geçmesinden sonra mümkün olabilmektedir. Krater boyutunu etkileyen en önemli faktörlerden birisi patlamanın yüzeyden derinli i, yüzeyde veya yüzeye yakın belirli bir yükseklikte olup olmamasıdır. Di er bir etken patlamanın oldu u yerin zemin yapısı ve zeminin kuru veya suya doygun olu udur. Kumlu zeminlerde krater çapı kohezyonlu zeminlere göre daha fazla olmakta, krater derinli i ise daha az olmaktadır. Kinney ve Graham tarafından yapılan çalı mada 200 adet yüzeyde ve yüzey üstündeki patlamalardan Denk. 7 ile verilen ili ki bulunmu tur (Gitterman ve Hofstetter, 2012; Ambrosini vd., 2004).

$$D = 8W^{1/3} \quad (7)$$

Ambrosini vd. (2003) tarafından yapılan çalı mada patlayıcının zeminin hemen üstünde bulunması durumunda krater çapı ve patlayıcı arasındaki ili ki,

$$D = 4,2W^{1/3} \quad (8)$$

olarak verilmektedir. Deklem 7 ve Denklem 8'de; D: krater çapı (m) W: ton olarak patlayıcının e de er TNT a ırlı ıdır. Patlamanın yüzeyden belirli bir yükseklikte olması durumunda ise Denk. 9 ile verilen ili ki bulunmu tur (Ambrosini vd.,2002). Bu denklem kullanılarak araçla yapılan terör saldırılarında patlayıcı miktarı belirlenebilmektedir. Denklemde, W kg olarak e de er TNT a ırlı ı, D krater çapı (m), d patlamanın yerden yüksekli ini (m) ifade etmektedir.

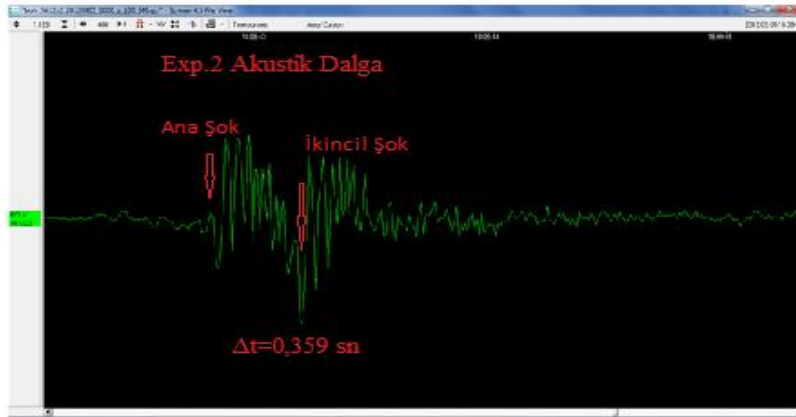
$$\log \frac{D/2}{|d|} = 1.241x \log \left(\frac{W^{1/3}}{|d|} \right) - 0.818 \quad (9)$$

4. PATLAMADA MÜHİMMAT MİKTARI

Afyonkarahisar Mühimmat Deposu Patlaması'na ait sismik kayıtlardan yapay deprem magnitudü ve düzey pik genliği parametreleri, akustik kayıtlardan ise ikincil ok dalgası gecikme zamanı parametresi kullanılarak bu patlamada infilak eden mühimmat miktarı ayrı ayrı hesaplanmıştır. Son olarak patlama sonrası oluşan krater boyutuna bağlı olarak buna sebep olacak mühimmatın TNT e de eri a ırlı ı hesaplanmıştır ve bulunan değerler yorumlanmıştır.

Gitterman tarafından srail'deki Negev Çölü Sayarim Vadisi'nde yapılan kontrollü yüzey patlatmalarındaki patlayıcı miktarı ile magnitüt ilişkisi, Denk.1 ile büyük uyumluluk göstermektedir. Bu deneylerdeki patlayıcı miktarları ve oluşan yapay deprem büyüklükleri ekil 3-a'da noktasal olarak verilmektedir. Yapay deprem magnitüt parametresi kullanılarak yapılan hesaplamada da bu denklem kullanılmıştır. Afyonkarahisar Mühimmat Deposu'nda meydana gelen en büyük patlamada (Exp.2) infilak eden mühimmatın TNT e de eri a ırlı ı, bu denkleme göre 7000 kg olmaktadır. BOLV sismik istasyonu ile patlama yeri arasındaki mesafe 36125 metredir. BOLV istasyonunda sismik kayıtlardan en büyük P dalgası hız genliği Exp.2 patlamasında $0.773 \mu\text{m/s}$ olarak ölçülmüştür. Exp. 1 kodlu ilk patlamadan en az 2.07 saniye sonra Exp.2 kodlu en büyük patlama meydana geldiğinden sismik dalgaların birbirine girmesi muhtemeldir. Sismik kaydın en büyük düzey hız genliği kullanılarak e de er TNT miktarı 7500 kg. olarak hesaplanmıştır. İkinci patlama meydana gelmeden hemen önce, Exp.1 için sismik kayıtlardan en büyük düzey hız genliği $0.430 \mu\text{m/s}$ kullanılarak hesaplanan e de er TNT miktarı ise 4000 kg olmaktadır. PVA parametresi ile hesaplanan iki patlamaya ait e de er TNT miktarları sismik ve akustik kayıtların değerlendirilmesinden bulunan ikinci patlamanın daha büyük bir patlama olduğunu doğrulamaktadır.

Exp.1 olarak tanımlanan ilk patlamaya ait akustik dalga istasyonlar tarafından kaydedilemediği için bu patlamaya ait ikincil ok dalgası gecikme zamanı parametresi kullanılarak hesaplanamamıştır. En büyük patlama olan Exp.2'ye ait ikincil ok gecikme zamanı ise akustik dalgalardan $t=0.359$ sn (359 milisaniye) olarak ölçülmüştür (ekil 5). ANFO türü patlayıcılar kullanılarak elde edilen ve Denk.2 ile verilen ilişkinin kullanılması durumunda Exp.2 kodlu patlamada TNT e de eri a ırlı ı 4000 kg olmaktadır. IMI türü patlayıcı kullanılarak elde edilen ilişki olan Denk. 3'ün kullanılması durumunda, Exp.2 kodlu patlamada infilak eden mühimmatın TNT e de eri a ırlı ı 16500 kg olmaktadır. Mühimmat deposunda bulunan el bombalarının çoğunlukla TNT ve Composition B türü patlayıcı içermesinden dolayı, IMI türü patlama hızına sahip (TNT'den % 10 daha fazla) patlayıcı kullanılarak elde edilen denklemin kullanılması ile hesaplanan e de er patlayıcı miktarının gerçeğe daha yakın olduğu düşünülmektedir.



ekil 5. Afyonkarahisar Patlamasının BOLV istasyonunda Kaydedilen Ana ve İkincil Ok Dalgası

Tablo 3. Sismik ve Akustik Parametrelere Göre Hesaplanan E de er TNT Miktarları

Analiz Türü	Kullanılan Parametre	Hesaplanan E de er TNT Miktarı (kg)
Sismik Dalga	Yapay Deprem Magnitüdü ($M_L=2.23$)	Denk.1 7000 kg (Exp.2)
	Dü ey Pik Genli i (VPA) Exp.1= 0.430 $\mu\text{m/s}$ Exp.2=0.773 $\mu\text{m/s}$	Denk.5 4000 (Exp.1) Denk.5 7500 (Exp.2)
	kincil ok Dalgası Gecikme Zamanı ($t=t_{SS}-t_{MS}=0.359$ sn)	Denk.3 16 500 Kg (Exp.2)

Exp. 1 olarak kodlanan ilk patlamaya ait akustik dalga, istasyonlar tarafından kaydedilemedi inden akustik ok dalgası varı zamanına göre patlayıcı hesabı yapılamamı tır. Exp. 2 kodlu en büyük patlama zamanı ise, ilk patlamadan en az 2.07 sn aralıkla gerçekte mi tır. Bu nedenle ikinci patlamaya ait ok dalgası varı zamanı tam olarak belirlenememi tır. Bu parameter (tt) ve Denk 3 ile hesaplanan TNT miktarı kullanılarak, ikinci patlamanın olu zamanı ilk patlamadan 2.20 saniye sonra 21:07:58:15 \pm 1.0 olarak hesaplanmı tır. Koper vd. (2002) tarafından da belirtildi i üzere bu parametrenin hassasiyeti daha dü üktür. Bu parametre patlama sayısının belirlenmesinde faydalı veriler sa lamaktadır.

Patlayıcı miktarının belirlenmesi için kullanılan parametrelerden birisi de krater boyutudur. Patlamalar sonucu cephaneye binası tamamen yok olmu , cephaneli in sa ön kısmında 3 metre çapında ve 2 metre derinli inde krater olu mu tur. Olu an kraterin, cephaneye binası içi veya dı na tekabül etti i hakkında bir bilgi bulunmamaktadır. Miktar olarak en fazla mühimmatın bulundu u cephanenin iç kesiminde kütleli patlamaya ra men herhangi bir krater olu mamı tır. 3 metre çapında krater olu umuna neden olabilecek TNT miktarı Denk.8 kullanılarak 364 kg olarak hesaplanmı tır. Cephaneye iç kısmında 16500 kg patlayıcının infilak etmesi halinde, aynı denklem kullanıldı nda, 10.5 metre çapında krater olu ması beklenmektedir. Ancak infilak eden mühimmatın el bombası olması, dolayısıyla bu tür mühimmatların yukarı yönlü olarak infilak etmesi, patlama merkezinin zeminden yukarıda olması ve buldukları zeminin kayalık olması nedenleri ile krater olu madı ı dü ünülmektedir. Cephaneye kısmının sa ön kısmında 3 metre çapında krater olu ması, buradaki patlayıcının zeminin hemen üzerinde oldu unu ve patlama yönünün a a ı do ru oldu unu dü ündürmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalı mada ço unlukla el bombası depolanan Afyonkarahisar ehit Mete Saraç Kı lası 32 nolu depoda meydana gelen patlamanın sismik ve akustik kayıtlar kullanılarak tam olarak zamanı, kaç kez patlama oldu u ve infilak eden mühimmatın e de er TNT a ırlı ı hesaplanmı tır. Resmi makamlarca patlama zamanı tam olarak tespit edilememi ve patlama zamanı olarak 21:15 sıraları tabiri kullanılmı tır. Sismik ve akustik kayıtlarda yapılan analizlerden Afyonkarahisar Mühimmat Deposu'nda 3 ayrı patlama kesin olarak belirlenmi tır. Sismik ve akustik kayıtlara göre Exp.1 olarak kodlanan ve görel olarak Exp. 2 olarak isimlendirilen ikinci patlamadan daha küçük olan patlamanın 21:07:55.95 \pm 1.0'da meydana geldi i tespit edilmi tır. En büyük patlama olan Exp.2 ise bundan en az 2.07 saniye sonra 21:07:58.02 \pm 1.0'da meydana gelmi tır. Denk. 3 kullanılarak elde edilen e de er TNT miktarına göre, Denk. 6'da verilen akustik dalga varı zamanı parametresi hesaplandı nda, ikinci patlama ilk patlamadan 2.20 saniye sonra, di er bir ifade ile yerel saat ile 21:07:58.15 \pm 1.0'da meydana geldi i tespit edilmi tır. Bu büyük patlama sonrası ise frekans-zaman ortamında yapılan analizden 21:08:03.03 \pm 1.0'de Exp.1'den daha küçük olan bir patlama (Exp. 3) meydana geldi i belirlenmi tır.

Exp.1 olarak isimlendirilen patlama, olay yerine en yakın 4 istasyonda yalnızca sismik dalgalar üretmi iken, Exp. 2 isimli patlama tüm sismik istasyonlarda sismik dalgaların yanısıra, patlama yerine en yakın istasyon olan

BOLV istasyonunda akustik dalgalar da üretmi tir. Bu nedenle Exp. 1 kodlu patlamanın a a ı yönlü ve Exp.2'den daha küçük bir patlama oldu u, en büyük patlama olan Exp. 2 ve bunu takip eden di er küçük patlamanın (Exp.3) ise yukarı yönlü oldu u dü ünülmektedir. Sismik kayıtlardan elde edilen PVA parametresinden de Exp.1'in, Exp.2'ye göre daha küçük bir patlama oldu u görülmektedir. Ayrıca frekans-zaman ortamında yapılan analizlerden ve spektogram grafiklerinden Exp.1 olarak kodlanan ilk patlamadan 135,05 saniye önce di er bir ifade ile 21:05:42.76'da bir iz daha tespit edilmi tir. Benzer izler 21:09:18.95 - 21:12:30.22 - 21:13:44.75 - 21:16:14.33 ve 21:18:43.13 olmak üzere 5 ayrı zamanda daha tespit edilmi tir. Ancak bu zamanlara ait kayıtlarda sinyal/gürültü oranının çok dü ük olması nedeni ile kesin olarak patlama olup olmadı ı ayrımı yapılamamı tir.

Sismik kayıtlardan elde edilen yapay deprem magnitudü ve dü ey pik genli i parametreleri kullanılarak infilak eden mühimmatın e de er TNT miktarı Exp. 1 için 4000 kg ve Exp.2 için 7000-7500 kg olarak, toplamda 11500 kg TNT e de eri mühimmatın infilak etti i hesaplanmı tir.

Akustik kayıttan elde edilen ikincil ok dalgası gecikme zamanı parametresi kullanılarak Exp.2 kodlu patlamada infilak eden mühimmatın e de er TNT a ırlı ı 16500 kg olarak hesaplanmı tir. Exp. 1'e ait akustik kayıt bulunmadı ından ikincil ok dalgası parametresi kullanılarak bu patlamaya ait hesaplama yapılamamı tir. Afyonkarahisar'daki mühimmat deposu patlamasındaki en büyük patlama olan Exp.2'nin yukarı yönlü olması, bu patlamanın sismik etkiyi azaltmak için maden ocaklarında yapılan kontrollü patlatmalarda oldu u gibi milisaniye mertebesinde gecikmeli patlamalar içermesi, enerjinin büyük kısmının sismik dalgalar yerine hava oku (airblast) olarak atmosfere yayılması nedenleriyle, sismik parametreler kullanılarak hesaplanan e de er patlayıcı miktarının daha dü ük olması beklenen bir durumdur. Akustik dalgalara ait ikincil dalga gecikme zamanı parametresi kullanılarak hesaplanan e de er TNT miktarının bu açıdan daha gerçekçi sonuç verdi i dü ünülmektedir. Bu nedenle en büyük patlama olan Exp. 2'de infilak eden mühimmatın e de er TNT a ırlı ı 16500 kg (16.5 ton) mertebesinde oldu u dü ünülmektedir. İlk patlatmada (Exp.1) VPA parametresi ile hesaplanan miktar bu miktara eklendi inde 20500 kg e de er mühimmatın infilak etti i söylenebilir. Mühimmat içeri i bu çalı mada verilmemekle birlikte, depoda bulunan toplam mühimmat miktarından patlamamı mühimmat çıkarılarak, infilak eden her cins mühimmatın e de er TNT içeriklerinin toplamı 16 000 kg olarak hesaplanmı tir. nfilak eden mühimmatın e de er TNT a ırlı ının, akustik katıylardan elde edilen e de er TNT miktarı ile uyumlu oldu u görülmektedir.

El bombalarının büyük bir ço unlu unun bulundu u bölümde kraterin olu maması, bunun yerine cephaneye yapısının sa giri kısmında 3 metre çapında krater olu ması, buradaki patlamanın hemen zeminin üstünde ve a a ı yönlü oldu unu dü ündürmektedir. Bu krater çapını olu turacak e de er TNT a ırlı ı ise 364 kg olarak hesaplanmı tir. Mühimmatın büyük bir kısmının bulundu u cephaneye iç kısmında krater olu mamasının nedeninin, el bombalarının patlama mekanizmalarından, patlama yönünün yukarı do ru olmasından, patlama merkezinin yerden belirli bir mesafede yukarıda olmasından kaynaklanabilece i dü ünülmektedir.

Bu çalı ma kapsamında açıklanan bu hesaplamalar, olayın gerçekle mesinden çok kısa bir sürede ve herhangi bir ilave yatırım yapılmasına gerek olmaksızın yapılabilecek hesaplamalardır. Patlamanın hemen ardından kriz ortamı devam ederken olayın tam olarak co rafi konumu, zamanı, kaç kez oldu u ve ne kadar büyüklükte bir patlamanın oldu u gibi bilgiler acil durum yönetimi için son derece yararlı olmaktadır. Bu bilgilerin elde edilmesi adli ve idari soru turmalar açısından da çok faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

Ambrosini D., Luccioni B., Danesi R. (2004) "Influence of the Soil Properties on Craters Produced by Explosions on The Soil Surface," *Mecanica Computacional*, Vol.XXIII, pp. 571-590

Ambrosini D., Luccioni B., Danesi R. (2003) “Craters Produced by Explosions on The Soil Surface” *Mechanica Computacional*, Vol.XXII, pp. 678-692

Ambrosini R.D., Luccioni B.M., Danesi R.F., Riera J.D., Rocha M.M. (2002), “Size of Craters Produced by Explosive Charges,” *Shock Waves*, Vol.12, pp . 69-78

Bonner J., Waxler R., Gitterman Y., Hofstetter R. (2013), “Seismo-Acoustic Energy Partitioning at Near Source and Local Distances from the 2011 Sayarim Explosions in The Negev Desert Israel”, *Bulletin of The Seismological Society of America*, Vol.103, No:2A, pp.741-758

Brocher T.M. (2003), “Detonation Charge Size Versus Coda Magnitude Relations in California and Nevada,” *Bulletin of The Seismological Society of America*, Vol.3, No:5, pp. 2089-2015

Cerenna L., Le Pichon A., Green D.N., Mialle P. (2009), “The Buncefield Explosion: a Benchmark for Infrasound Analysis across Central Europe”, *Geophys. J. Int.* No:177, pp. 491-508, 2009

Evers L.G., Cerenna L., Haak H.W., Le Pichon A., Whitaker R.W. (2007), “A Seismoacoustic Analysis of the Gas-Pipeline Explosion near Ghislenghien in Belgium” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol:97, No:2, pp:417-425

Gitterman Y. (2013) “Secondary Shock Features for Large Surface Explosions: Results from the Sayarim Military Range, Israel and other Experiments” *Shock Waves*, DOI 10.1007/s00193-013-0487-y

Gitterman Y., Hofstetter R. (2012) “GT0 Explosion Sources for IMS Infrasound Calibrations: Charge Design and Yield Estimation from Near-Source Observation,” *Pure and Applied Geophysics*, Published online, 06 September

Gitterman Y., Given J., Coyne J., Zerbo L., Hofstetter R. (2011), “Large-Scale Explosion Source at Sayarim-Israel for Infrasound Calibration of The International Monitoring System” S&T2011, Vienna, Austria, 8-10 June

Gitterman Y., Pinsky V., Hofstetter A. (2007), Seismic Energy Generation and Partitioning into Various front Different Seismic Sources in the Middle East Region”, *Israel Air Force Research Laboratory*, Final Report, September

Gitterman Y., Pinsky V., Hofstetter A. (2005), Using Ground Truth Explosion for Studying Seismic Energy Generation and Partitioning into Various Regional Phases,” *27th Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, Rancho Mirage, California-USA, 20-22 September

Gitterman Y. (2002), “Implications of the Dead Sea Experiment Results for Analysis of Seismic Recordings of The Submarine Kursk Explosions”, *Seismological Research Letters*, Vol.73, No:1, pp. 14-24

Kim W.Y., Syskes L.R., Armigate J.H., Xie J.K., Jacob K.H., Richards P., West M., Waldhauser F., Armbruster J., Seeber L., Du W.X., Lam A.L. (2001) ”Seismic Waves Generated by Aircraft Impacts and Buildings Collapses at World Trade Center New York City,” *American Geophysical Union*, Vol.82,No:47,pp. 565-571,November

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* Vol.93, No:4,pp.1427-1432

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*, Vol:92, No:2, pp:527-542

Koper K.D., Wallace T.C. (2001), “Forensic Seismology and the Sinking of the Kursk,” *American Geophysical Union*, Vol.82, No:4, pp.45-46

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” *Sesimological Research Letters*, Vol.70, No:5, pp.512-521

Kristekova M., Moczo P., Labak P., Cipciar A., Fojtikova L., Madaras J., Kristek J. (2008), “Time-Frequency Analysis of Explosions in the Ammunition Factory in Novaky Slovakia”, *Bulletin of The Seismological Society of America*, Vol.98, No:5, pp.2507-2516

Kuran F. (2014-a) “Three Massive Explosions and Seismology” 2nd *European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2nd ECEES)*, 25-29 August, Istanbul

Kuran F. (2014-b) “Suriye ç Sava mının stihkamcılık Açısından rdelenmesi” *MSI Savunma ve Havacılık Dergisi*, Sayı:113, 58-69

Leach R.R., Dowla U.F. (1995) “Towards Data Fusion in Sesimic Monitoring: Source Characterization of Mining Blasts with Acoustic and Seismic Records” Lawrence Livermore National Laboratory, Universty of California

Mihelic B. (2013) “Unplanned Explosions at Munitions Sites (UEMS),” The 6th Workshop of the South East Europe Regional Approach to Stockpile Reduction (RASR) of Conventional Weapons and Munition Initiative”, 3-5 March, Bled, Slovenia

Ottmölller L. and Evers L.G. (2008), “Seismo-Acoustic Analysis of the Buncefield Oil Depot Explosion in The UK, 2005 December 11,” *Geophysics Journal*, 172, pp. 1123-1134

Reynolds J.M. (2011), “An Introduction to Applied and Environmental Geophysics”, Second Edition, Wiley-Blackwell Press

Rogers J.D., Koper K.D., “Military Geology and Combat Engineering Lecture Notes” Department of Geological Sciences and Engineering, Missouri University of Science and Technology, USA

Weber P.W., Millage K.K., Crepeau J.E., Happ H.J., Gitterman Y., Needham C.E. (2014) “Numerical Simulation of a 100 ton ANFO Detonation”, *Shock Waves*, DOI 10.1007/s00193-014-0547-y