



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Deprem Kayıtlarından Elde Edilen Yatay/Düşey Spektral Oranların Ters Çözümüyle Kayma Dalga Hız Yapısının Belirlenmesi: Van Gölü Doğusu Örneği

Hamdi ALKAN, İsmail AKKAYA*

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye

Hamdi ALKAN, ORCID No: 0000-0003-3912-7503, İsmail AKKAYA, ORCID No: 0000-0002-7682-962X

*Sorumlu yazar e-posta iakkaya79@gmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 22.03.2022
Kabul: 10.05.2022
Online Ağustos 2022
DOI: 10.53433/yyufbed.1091678

Anahtar Kelimeler

Anakaya derinliği,
Deprem,
EHVSR,
Kayma dalga hızı

Öz: Van Gölü doğusu farklı özellikteki aktif fayların varlığı sebebiyle deprem üretme potansiyeli yüksek olan bir bölgedir. Depremlere bağlı oluşan hasarların değerlendirilmesinde yeraltının fiziksel özelliklerinin ve deprem sırasındaki davranışının iyi bilinmesi gerekmektedir. Kayma dalgası hız değişimi ve anakaya derinliğinin belirlenmesi bu açıdan son derece önemlidir. Bu çalışmada 2011-2021 yılları arasında Van Gölü doğusunda meydana gelen ve farklı tipteki faylarda oluşmuş dokuz deprem verisinden yararlanılmıştır. 6 istasyonda kaydedilen depremler yatay-düşey spektral oran yöntemi ve Monte-Carlo ters çözüm algoritması ile analiz edilerek, kayma dalgası hız yapısı ve anakaya derinlikleri belirlenmiştir. İstasyonlar altında alüvyon birimlerinin kalınlığına bağlı olarak nispeten düşük frekans değerleri elde edilmişken, farklı kaya birimlerin varlığı baskın frekans değerlerini yükseltmiştir. Spektral oran eğrilerindeki farklı frekanslardaki pikler, jeolojik yapının özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. İstasyon altı anakaya derinliği 10-350 m arasındadır. Artan anakaya derinlik seviyeleri yıkıcı depremlerin hasar oranını arttıran bir faktördür.

Determination of Shear Wave Velocity Structure by Using Inversion of Horizontal/Vertical Spectral Ratios Obtained from Earthquake Records: Example from the East of Lake Van

Article Info

Received: 22.03.2022
Accepted: 10.05.2022
Online August 2022
DOI: 10.53433/yyufbed.1091678

Keywords

Bedrock depth,
Earthquake,
EHVSR,
Shear wave velocity

Abstract: The eastern part of the Lake Van region has a high potential to produce destructive earthquakes due to the presence of active faults with different mechanisms. To evaluate the damages of earthquakes, it is well known the physical properties of the underground and its behavior during the earthquake. Determination of the depth-dependent shear wave velocity variation and bedrock depth is extremely important in this respect. In this study, nine earthquakes data that occurred on different types of fault between 2011-2021 in the east of the Lake Van region are used. 6 station earthquake data is analyzed using the H/V spectral ratio and the Monte-Carlo inversion, and the shear wave velocity structure and bedrock depths are calculated. The low-frequency values are relatively defined depending on the thickness of the alluvial units under the stations, whilst the presence of different rock units increases the frequency values. The peaks at different frequencies in the spectral ratio curves show variability depending on the characteristics of the geological structure. The bedrock depth under the station is between 10-350 m. Increasing bedrock depth levels are a factor that increases the damage rate of destructive earthquakes.

1. Giriş

Van Gölü havzası jeolojik süreçler ve oluşum mekanizması gereği aktif tektonizma ve depremsellik etkisi altındadır. Bölgenin depremselliği ve bu depremlere bağlı oluşan hasar ve kayıplar tarihsel dönemlerden günümüze kadar pek çok kez yerleşim alanlarında etkili olmuştur. Yüksek yapılaşma oranı, yapı kalitesindeki farklılıklar, deprem kaynak özellikleri ve yerel zemin özellikleri depremlerin hasar derecelerini arttıran temel etkenlerdir. Çalışma konusu olan Van Gölü doğusu büyük ve hasar verici deprem üretme potansiyeli olan çok sayıda aktif fayın yer aldığı önemli bir bölgedir. Bölgenin en büyük ve en yoğun nüfusa sahip yerleşim alanı Van ili ve ilçeleridir. Dolayısıyla deprem potansiyeli yüksek olan bu bölgedeki depremlere bağlı hasarlarının azaltılmasında zemin koşullarının hem statik hem de dinamik yükler altındaki davranışlarının iyi belirlenmesi gerekmektedir. 23 Ekim 2011 (Mw=7.1) Van depremi sonrası meydana gelen yüksek hasar ve can kayıpları bu durumu bir kez daha ortaya çıkmıştır.

Van ili ve çevresindeki yerleşim alanları genel itibariyle Kuvaterner yaşlı, güncel göl ve akarsu sedimanlarının düzlükleri üzerine kuruludur (Özvan, 2004; Özvan ve ark., 2005; Akkaya & Özvan, 2019). Yumuşak ve pekişmemiş alüvyal birimlerden oluşan jeolojik yapılarda kayma dalgası hızının (Vs) ve anakaya derinliğinin belirlenmesi, yıkıcı bir depremin neden olduğu yerel zemin etkisinin ölçülmesi için son derece önemlidir. Bunun yanı sıra kayma dalga hızı, zemin tepki analizi ve mühendislik uygulamaları için bir başlangıç parametresidir. Sismik risk analizi ve deprem etkilerinin değerlendirilmesi açısından belirlenmesi gereken sismik anakaya derinliği de Vs değerlerine göre tanımlanır. Kayma dalgası hızlarının belirlenmesinde araştırma derinliği ve saha koşulları gözeticilerle geleneksel sismik yöntemler, aktif ve pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte son yıllarda mikrotremor ve deprem verileri kullanılarak yatay bileşenlerin düşey bileşene spektral oran (HVSR) eğrisinin ters çözümüyle derinliğe bağlı Vs değişimleri elde edilebilmektedir (Herak, 2008; Bignardi ve ark., 2016). Temeli Nakamura (1989) tarafından geliştirilen tek istasyon mikrotremor yöntemine dayanan yöntemde yüzey altı jeolojisinden kaynaklanan yerel etki yatay ve düşey bileşenlerin spektral oranı ile bulunur. HVSR eğrisinin ters çözümü, nispeten ucuz araştırma maliyeti ve hızlı veri işlem süresi gibi avantajlarından dolayı son yıllarda sıkça tercih edilmektedir (Herak, 2008; Bignardi ve ark., 2016). Langston (1977), telesismik verilerden kabuk ve manto yapılarını belirlemek için HVSR yöntemini kullanmıştır. Langston (1977), düşey hareketlerin yerel zemin koşullarından etkilenmediğini ve yatay hareketlerin jeolojik katmanlardan etkilendiğini öne sürmüştür. Lermo & Chavez-Garcia (1993), deprem kayıtlarının en güçlü parçası olan kesme dalgalarına HVSR tekniğinin uygulanabileceğini göstermiştir. Bu çalışmadan sonra HVSR tekniğinin hem depremler hem de sismik gürültü verilerine uygulanmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır (Lachet & Bard, 1994; Parolai ve ark., 2005).

Bu çalışmada, Van Gölü doğusunda yer alan ve özellikle yerleşim alanları yakınında bulunan Türkiye Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ve Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (Irmak) deprem araştırma enstitüleri tarafından kurulan geniş bant (broadband) ve kuvvetli yer hareketi deprem istasyonları kullanılmıştır (Şekil 1). Deprem verilerinin HVSR analizi kullanılarak elde edilen kayma dalgası hızlarında istasyon altı hız yapısı ve ana kaya derinliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Van Gölü doğusunda meydana gelen büyüklüğü M=4.5'ten büyük ve bölgede çeşitli derecelerde hasarlara neden olmuş yerel depremler kullanılmıştır (Çizelge 1). Birbirinden farklı jeolojik birimler üzerinde yer alan 3 kuvvetli yer hareketi ve 3 geniş bant olmak üzere 6 deprem kayıt istasyonu tarafından kaydedilen dokuz deprem kaydı kullanılarak yatay bileşenlerin düşey bileşene spektral oranı (EHVSR) analiz edilmiştir (Çizelge 2). EHVSR yöntemi, referans istasyonu olmaksızın yıkıcı depremlerin neden olduğu hasarı belirlemek için pek çok araştırmada kullanılmıştır (Lermo & Chavez Garcia, 1993; Lachet & Bard, 1994; Bard, 1998; Nakamura, 2000 ve 2008; Fah ve ark., 2001; Akkaya & Özvan 2019; Pamuk, 2019; Pamuk & Özer 2020; Aydın ve ark., 2021; Gupta ve ark., 2021). EHVSR yöntemin en önemli avantajlarından birisi deprem verileri kullanılarak kaynak ve yoldan bağımsız olarak yerel zemin etkileri hakkında bilgi elde edilebilmesidir (Langston, 1977).

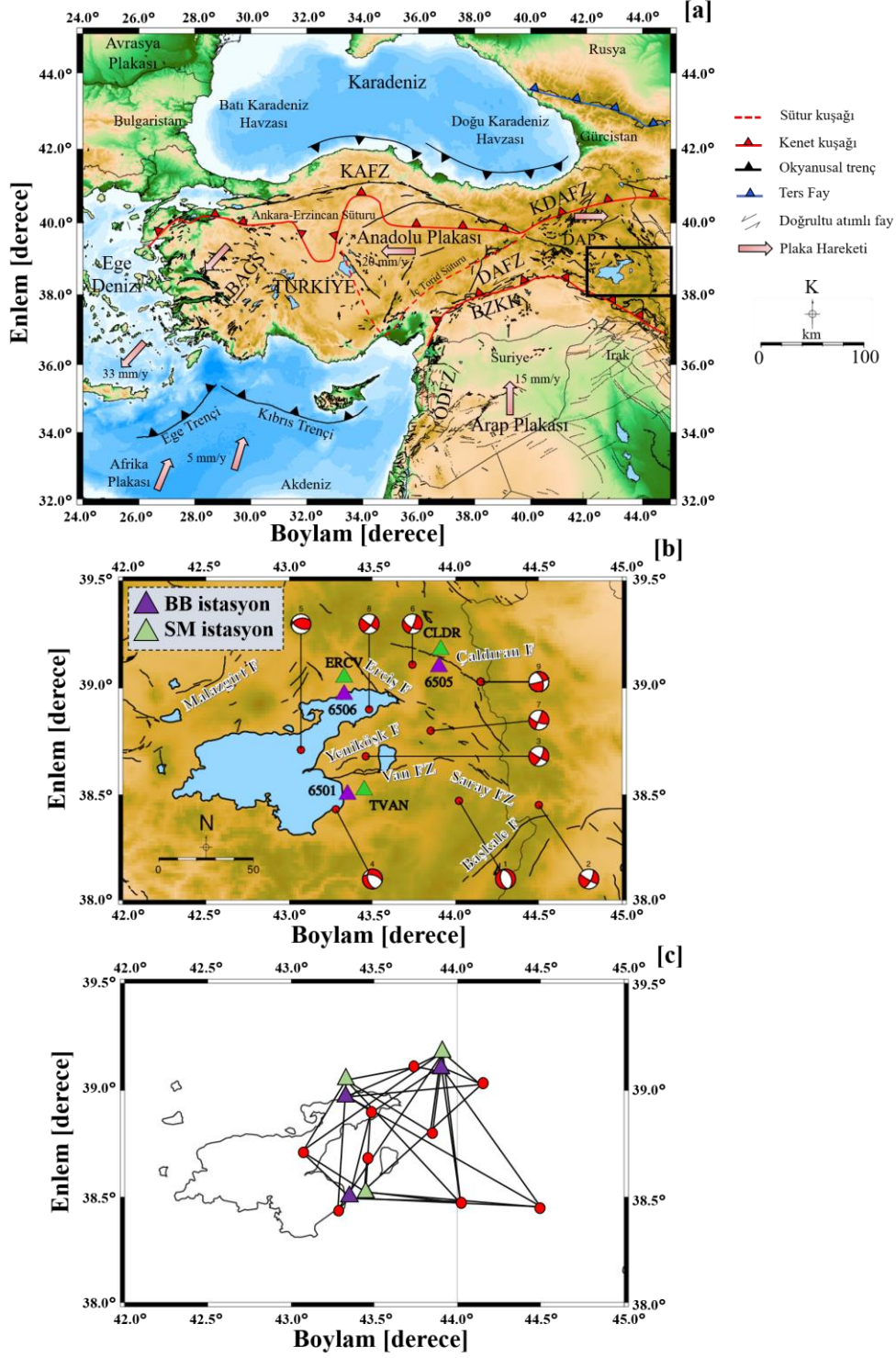
2. Materyal ve Yöntem

Depremlere bağlı oluşan hasarların değerlendirilmesinde yeraltının fiziksel özelliklerinin ve deprem sırasındaki davranış karakteristiğinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Derinliğe bağlı kayma dalgası hız değişimi ve anakaya derinliğinin belirlenmesi bu açıdan son derece önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada Van il merkezindeki (6501, TVAN), Erciş ilçesinde (6506, ERCV) ve Çaldıran ilçesinde (6505, CLDR) kurulu olana geniş bant (broadband) ve kuvvetli yer hareketi (strong-motion) deprem istasyonları kullanılmıştır (Şekil 1). Yerleşim yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerdeki istasyonlar tarafından kaydedilen deprem verilerinin EHVS analizi kullanılarak elde edilen kayma dalgası hızlarında istasyon altı hız yapısı ve ana kaya derinliklerinin araştırılmış ve değerlendirmelerde bulunulmuştur.

2.1. Çalışma alanının depremselliği

Türkiye'nin doğusunda bulunan Doğu Anadolu plakası Alpine-Himalayan orojenik kuşağı üzerindeki önemli tektonik yapılardan bir tanesidir. Doğu Anadolu plakası Arap plakasının kuzey yönlü (~15 mm/yıl) ve Avrasya plakasının güney yönlü (~5 mm/yıl) hareketi ile ilişkili olarak sıkışma tektoniği etkisi altındadır (Şekil 1). Bu sıkışma yaklaşık olarak 13 milyon yıl önce başlamış ve hala etkisi devam etmektedir. Arap plakasının kuzey yönlü göçü Bitlis-Zagros Kenet kuşağı (BZKK) boyunca kıtasal çarpışmaya neden olmaktadır. Mevcut sıkışma tektoniğinin tetiklemesiyle, Anadolu plakası saat yönünün tersine dönmekte ve batıya doğru yaklaşık 20 mm/yıl hız ile hareket etmektedir (Şengör & Yılmaz, 1981; Reilinger ve ark., 2006). Bölgedeki bu önemli plakaların sınırları boyunca önemli tektonik fay zonları meydana gelmiştir. Bunlar; sağ yönlü doğrultu atımlı mekanizmaya sahip Kuzey Anadolu Fay zonu (KAFZ) ve Kuzey Doğu Anadolu Fay zonu (KDAF), sol yönlü doğrultu atımlı mekanizmaya sahip Doğu Anadolu Fay zonu (DAFZ) ve Ölü Deniz Fay zonu (ÖDFZ)'dur (Şengör & Yılmaz, 1981; Koçyiğit ve ark., 2001; Reilinger ve ark., 2006). KAFZ ve DAFZ Karlıova üçlü keşişiminde birleşmesinden dolayı, bölgede birçok ters fay ve doğrultu atımlı fay türü meydana gelmiştir (Şengör ve ark., 2003; Koçyiğit, 2013; Selçuk, 2016; Öztürk, 2018; Sengul ve ark., 2019; Alkan ve ark., 2020).

Günümüz itibari ile hidrolojik olarak kapalı havza niteliğinde olan Van Gölü havzası, BZKK'nın kuzeyinde ve Karlıova üçlü keşişimin güney batısında bulunmaktadır. Doğu Anadolu'daki sıkışma tektoniği ile ilişkili olarak Van Gölü aktif ters fay mekanizmalarının etkisi ile bir rampa havza şeklinde meydana gelmiştir (Koçyiğit ve ark., 2001). Van Gölü havzası deniz seviyesinden ~1650 m yükseklikindedir ve 450 m maksimum su derinliğine sahiptir. Göl içerisinde 3 adet havza (Kuzey, Tatvan ve Deveboynu), Ahlat ve kuzey sırtı gibi birçok taban sırt yapısı mevcuttur (Cukur ve ark., 2017; Toker ve ark., 2017 ve 2021). Van Gölü havzası 16.000 km²'lik genişleme alanına sahiptir ve Muş havzasının doğusuna doğru genişlemektedir. Bölgede deniz seviyesine göre, en yüksek seviyedeki alan Bitlis masifidir ve metamorfik kayalar yerleşik haldedir. Bunun yanında, özellikle gölün kuzey ve batısında ise volkanik ve volkanoklastik kayalar bulunmaktadır. Diğer taraftan, Eosen yaşlı sedimanter birimler ve Kretase yaşlı karbonatlar gölün doğusunda ortaya çıkmıştır (Cukur ve ark., 2017). Diğer taraftan, Van Gölü havzası ve civarında aletsel ve tarihsel dönemde sığ deprem üreten önemli ve aktif fay zonları bulunmaktadır. Bunlar sağ yönlü doğrultu atımlı mekanizmaya sahip Erciş fayı, Saray fayı ve Çaldıran fay zonu, sol yönlü doğrultu atımlı mekanizmaya sahip Malazgirt fayı ve Başkale fayı ve ters fay mekanizmasına sahip Yeniköşk fayı, Alaköy fayı, Gürpınar fayı, Özalp fayı ve Van fay zonedir (Koçyiğit ve ark., 2001; Koçyiğit, 2013; Utkucu, 2013; Akkaya, 2015, 2020a ve 2020b; Akkaya ve ark., 2015 ve 2018; Emre ve ark., 2018; Sengul ve ark., 2019; Akkaya & Özvan, 2019; Alkan ve ark., 2020 ve 2021). Aletsel dönemde meydana gelen en büyük deprem 1976 Çaldıran depremidir ($M_s=7.3$). Bu depremin haricinde, Van şehir merkezi civarında 1988 ($M=5.4$) ve 2000 ($M=5.7$) yıllarında yıkıcı depremler meydana gelmiştir. Son olarak, 23 Ekim 2011 yılında KD-GB yönlü ters fay mekanizmasına sahip Van depremi ($M_w=7.1$) meydana gelmiştir ve 5000 adet ($M_w \geq 3.0$) artçı şok üretmiştir (Irmak ve ark., 2012; Toker ve ark., 2021). 23 Şubat 2020 yılında peş peşe iki büyük deprem olarak meydana gelen Hoy (İran) depremi ($M_w=5.9$) ve yine 2020 yılındaki Saray depremi ($M_w=5.4$) bölgenin deprem potansiyelinin ve etkinliğinin en yakın göstergeleridir.



Şekil 1. (a) Türkiye ve çevresinin tektonik haritası (Alkan ve ark., 2021'den değiştirilerek alınmıştır). Kısaltmalar: KAFZ; Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ; Doğu Anadolu Fay Zonu, KDAFZ; Kuzey Doğu Anadolu Fay Zonu, DAP; Doğu Anadolu Plakası, BZKK; Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı, ÖDFZ; Ölü Deniz Fay Zonu, BAGS; Batı Anaolu Graben Sistemi. (b) Van Gölü civarındaki seçilmiş geniş-band (yeşil üçgenler) ve kuvvetli yer hareketi (mor üçgenler) istasyonlarının lokasyonları gösterilmiştir. Bölgedeki aktif tektonik faylar Emre ve ark. (2018)'den alınmıştır. Çalışmada kullanılan 9 adet bölgesel depremin odak mekanizması çözümleri AFAD (2022)'den alınmıştır. (c) Mor ve yeşil üçgenler tüm istasyonların lokasyonlarını ve kırmızı daireler depremlerin lokasyonlarını göstermektedir. Siyah kalın çizgiler depremlerin kayıt edildiği istasyonların yörüngelerini göstermektedir.

2.2. Deprem verilerinin işlenmesi ve EHVSRS ters çözümü

Çalışmada 2011-2021 yılları arasında meydana gelen ve çeşitli derecelerde hasara neden olan Van Gölü doğusundaki çeşitli yönlerde ve farklı tipteki faylarda oluşmuş dokuz adet depremin verisinden yararlanılmıştır (Çizelge 1). Kullanılan depremlerin farklı yönlerde olmasına ve özellikle yerleşim merkezinde bulunan istasyonlarca kayıt edilmiş olmalarına bağlı olarak depremler seçilmiştir. Bunun için 3 geniş bant (TVAN, CLDR, ERCV) ve 3 kuvvetli yer hareketi (6501, 6505, 6506) olmak üzere 6 istasyondan elde edilen kayıtlar veri işleme tabi tutulmuştur (Çizelge 2).

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan depremlerin detaylı odak mekanizması parametreleri. Detaylı bilgi AFAD ve KOERI'den alınmıştır

NNo	Tarih (gg.aa.yyyy)	Saat (ss.dd.ss)	Boylam (E°)	Enlem (K°)	Tip	Büyükölük	Derinlik (km)
1	25.06.2020	10:03:30	44.028	38.472	M _w	5.4	7.48
2	23.02.2020	16:00:00	44.502	38.450	M _w	5.9	8.1
3	23.10.2011	10:41:00	43.465	38.689	M _w	7.1	19.02
4	09.11.2011	19:23:00	43.263	38.447	M _L	5.6	6.09
5	08.11.2011	22:05:00	43.108	38.706	M _L	5.4	6.9
6	29.10.2015	09:46:00	43.743	39.119	M _w	4.8	4.9
7	18.11.2011	17:39:00	43.852	38.802	M _L	5.2	8.0
8	05.12.2021	21:46:47	43.485	38.906	M _w	4.9	7.62
9	21.07.2018	06:15:13	44.156	39.037	M _w	4.5	6.38

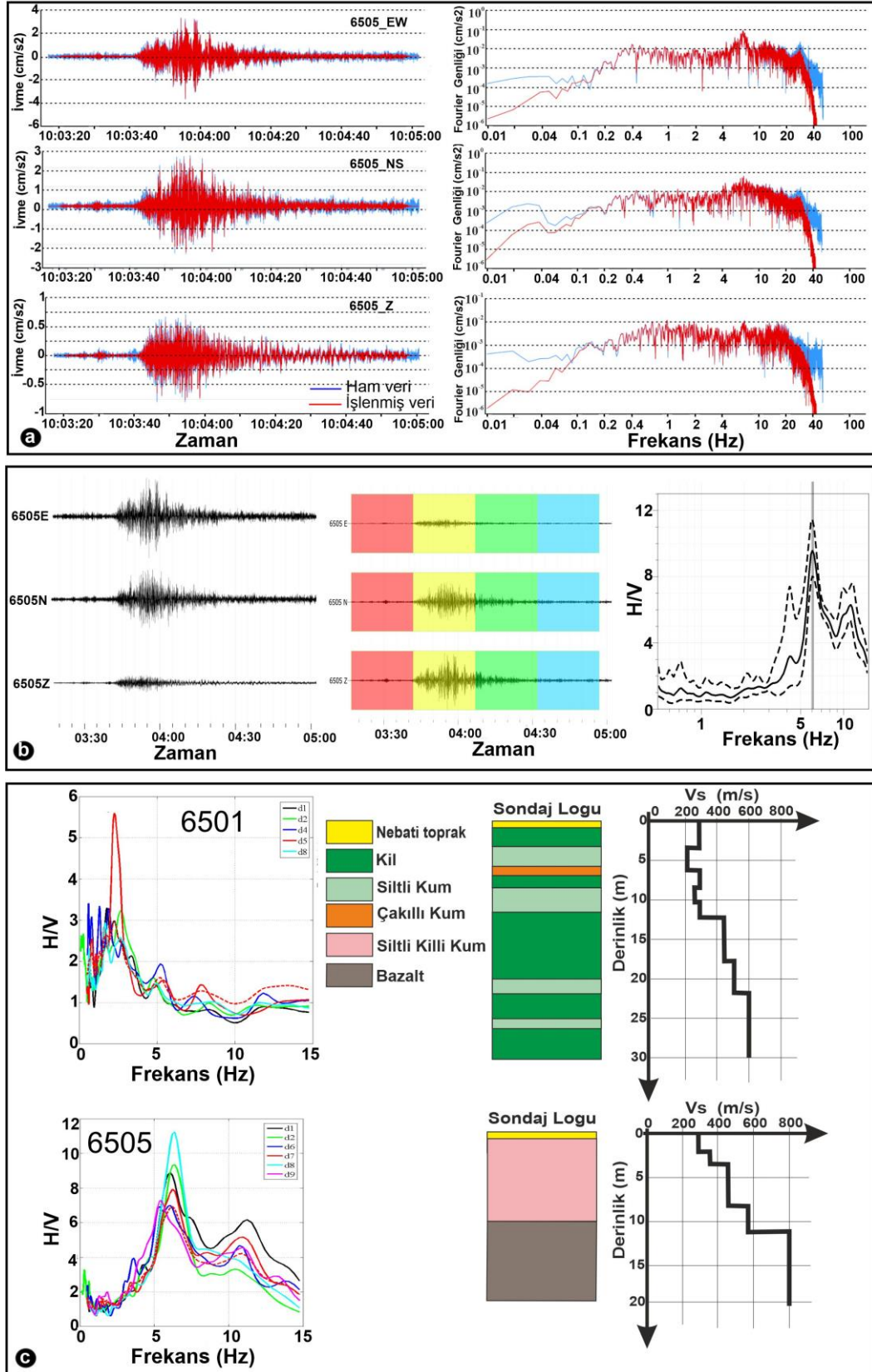
Çizelge 2. Çalışmada kullanılan geniş bantlı ve kuvvetli yer hareketi istasyon listesi. Detaylı bilgi AFAD ve KOERI'den alınmıştır. (<https://deprem.afad.gov.tr/istasyonlar>, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/sismik-ag/sismik-ag-haritalari/sismik-ag-haritalari/>)

İstasyon Kodu	Siamik Ağ	Lokasyon	Boylam (E°)	Enlem (K°)	Yükseklik (m)	Kaydedilen deprem sayısı	Sensör
6501	AFAD_SM	Van	43.401	38.503	1745	5	CMG-5TD
6505	AFAD_SM	Çaldıran	43.901	39.135	2043	6	CMG-5TD
6506	AFAD_SM	Erciş	43.337	39.019	1681	4	CMG-5TD
TVAN	AFAD_BB	Van	43.404	38.523	1970	5	CMG-3T
CLDR	KOERI_BB	Çaldıran	43.917	39.144	2094	6	CMG-3ESP
ERCV	KOERI_BB	Erciş	43.338	39.019	1679	6	CMG-5T

*xxxx_SM : Kuvvetli Yer Hareketi istasyonu

*xxxx_BB : Broadband istasyonu

Deprem verilerinin değerlendirilmesinde yatay bileşenlerin düsey bileşene spektral oranı (EHVSRS) yöntemi kullanılmıştır. EHVSRS spektrumları değerlendirilirken, her bir istasyonda kaydedilen deprem verisinin üç bileşeninin (NS, EW, Z) Fourier genlik spektrumunu (FAS) hesaplamak için tüm deprem kaydı veya her verinin S dalgası kısmı manuel olarak seçilerek veri-işlem yapılabilmektedir. Bu çalışmada tüm deprem kaydı kullanılmıştır (Şekil 2). Veri işlemin ilk aşamasında deprem verilerinin trend etkisi giderilmiştir. Kaydedilen üç bileşenli deprem verileri, sinyal stabilizasyonu için 0.01 s (100 Hz) örnekleme aralığı kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Bant geçişli Butterworth filtre (0,01-25 Hz) uygulanmasının ardından filtrelenmiş veriler pencerelelere bölünmüştür.



Şekil 2. (a) 25 Haziran 2020'de meydana gelen Van-Saray depreminin ($M_w=5.4$ ve $h=7.48$ km) 6505 kodlu istasyonundaki dalga biçimi (D-B, K-G ve düşey) ve genlik spektrumları. (b) Aynı depreme ilişkin veri-işlem sonucu elde edilen H/V spektrumu. (c) 6501 ve 6505 istasyonları yakını için derinliğe bağlı Vs hız kesitleri, sondaj logu ve EHVSr sonuçları (Akkaya ve ark. (2018) ve Akkaya & Özvan (2019)'dan değiştirilerek alınmıştır).

Her bir pencere için Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak her bir bileşene ait genlik spektrumları elde edilmiştir. Elde edilen spektrumlara Konno-Ohmachi yuvarlatması uygulanarak (band genişliği 40 seçilerek) EHVS spektral oranları elde edilmiştir (Şekil 2b). Çalışma bölgesinde Akkaya ve ark. (2018) ve Akkaya & Özvan (2019) tarafından yapılan çalışmalardan 6501 ve 6505 istasyonlarına yakın lokasyonlardan elde edilen derinliğe bağlı Vs hız kesitleri ve sondaj logları şekil 2c'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan her bir istasyonda kaydedilen deprem verileri için elde edilen EHVS eğrileri aşağıda verilmiştir.

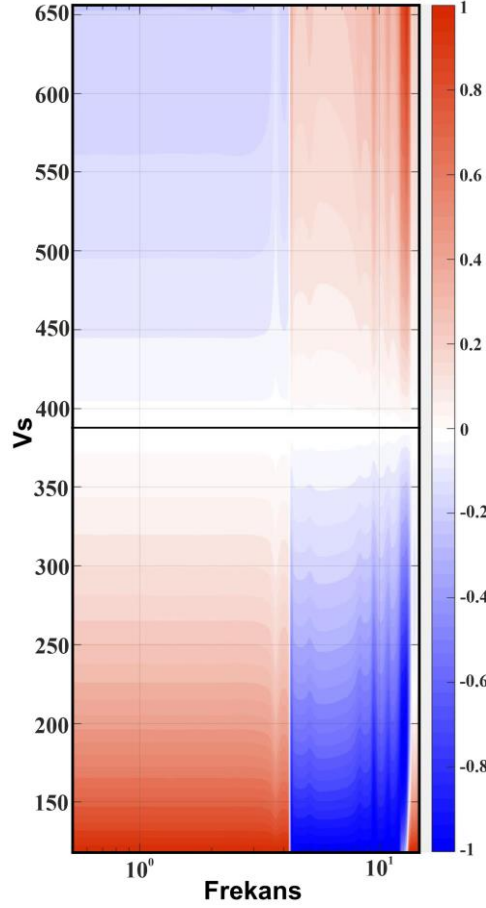
Ters çözüm, bir veriden bu veriyi elde etmemizi sağlayan matematiksel modelin parametrelerini hesaplamaktır. Diğer bir deyişle, herhangi bir alanda toplanan verilerden fiziksel özelliğin yüzey altı dağılımını ortaya çıkarmak için kullanılacak bir yöntemdir. EHVS yönteminde spektral oran eğrisinin modellenmesiyle Vs hız yapısı elde edilebilmektedir (Bignardi ve ark., 2016). Bignardi ve ark. (2016) ters çözüm yönteminde, amaç fonksiyonunu yani hesaplanan ve ölçülen veriler arasındaki farkı en aza indirerek Vs hız değerini belirlemek için ters çözüm yöntemi kullanılmaktadır. EHVS eğrilerinin ters çözümüyle Vs derinlik modellerini güvenilir bir şekilde belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır (Herak, 2008; Bignardi ve ark., 2016, 2018). Bu çalışmada, istasyon altı hız değişimlerini belirlemek amacıyla EHVS eğrisinin ters çözümünde 2-boyutlu ve/veya 3-boyutlu yeraltı modellerini hesaplamak için yaygın olarak kullanılan OpenHVS yazılımından yararlanılmıştır (Bignardi ve ark., 2018). Algoritma, sentetik ve ölçülen eğriler arasındaki uyumsuzluk fonksiyonuna dayalı olarak Vs hız modelinin bir başlangıç model arama uzayında güncellendiği, Monte-Carlotsers çözüm yöntemini kullanmaktadır (Herak, 2008; Bignardi ve ark., 2018). Hata fonksiyonu, ölçülen ve sentetik veri arasındaki uyumsuzluk fonksiyonu, eğitim terimi ve düzenleme terimi olmak üzere üç terimden oluşmaktadır (Bignardi ve ark., 2016).

Düz çözüm (forward modelling), her araştırma bölgesi için teorik transfer fonksiyon yaklaşımına göre hesaplanır (Herak, 2008). Modelleme algoritması yarı-sonsuz bir ortam için visko-elastik homojen parametreleri (V_p dalga hızı, makaslama dalgası hızı (V_s), yoğunluk (ρ), kalınlık (h) ve frekansa bağlı karşılık gelen sönüm parametreleri (Q_p ve Q_s)) temsil etmektedir. Diğer taraftan, kullanılan ters çözüm algoritması Monte Carlo yöntemi ile ilişkilidir. Monte Carlo yönteminde modeli temsil eden en iyi modele ulaşmak için rastgele iterasyonlar gerçekleştirilir ve gözlemsel EHVS eğrileri ile hesaplanan EHVS eğriler karşılaştırılır. Monte-Carlotsers çözümde, ilk modelden elde edilen teorik yanıt, gözlemlenen EHVS sonuçlarıyla karşılaştırılır. Her yinelemeden sonra, yeni bir minimum uyumsuzluk bulunur ve ardından ilgili yeraltı modeli referans olarak ayarlanır. Model parametrelerinin yeterli bir araştırmasından sonra, varsayılan dalga yayılımına göre gerçeğe en uygun model (daha düşük uyumsuzluk veya önceki iterasyona eşit) elde edilmeye çalışılır. Bunu başarmak için visko-elastik parametrelerin değişimi, uniform ya da normal istatistiksel dağılımı ve frekansa ve derinliğe bağlı ağırlıklandırma fonksiyonlarını organize etmek gereklidir. Bu işlem adımlarından sonra, 2-B ya da 3-B modeller için amaç fonksiyonu hesaplanır. Amaç fonksiyonu aşağıda gösterildiği gibidir;

$$E(m) = aM(m) + bS(m) + \sum_{j=1}^5 \alpha_j R_j(m_j) \quad (1)$$

Burada, ilk terim gözlenen ve hesaplanan arasındaki hata (misfit) (M), ikinci terim eğrilerin eğimindeki kuvvet kuşullarını (S) ve üçüncü terim (R_j) ise visko-elastik model parametrelerindeki ($m_j = V_p, V_s, \rho, h, Q_p, Q_s$) yanal değişimi temsil etmektedir. a ve b amaç fonksiyonu parametreleri ve α_j ise ağırlıklandırma parametresidir (Bignardi ve ark., 2016).

Ters çözüm sonucunda yanal yönlü iki farklı parametrenin (V_s ve H gibi) değişimi elde edilen modelin güvenilirlik sınırları ile kontrol edilir. Güvenilirlik sınırı F -dağılımına bağlıdır (Mayeda ve ark., 1992; Bianco ve ark., 2002; Herak, 2008). Ters çözümde parametre uzayı çok boyutlu bir uzay olduğu için iki farklı serbestlik derecesine bağlı olarak hata değerlerinin dağılımı incelenmelidir. Birince ve ikinci serbestlik derecesine göre parametreler elastik parametrelerden seçilir. Ters çözüm sonucunun güvenilirliğini kestirmek için ayrıca tek bir parametrenin (V_s gibi) EHVS eğrisini nasıl etkilediğinin de kontrol edilmesi gerekmektedir. Frekansa bağlı pozitif (kırmızı) ve negatif (mavi) değişimler hata değerinin artışı ve azalımı ile ilişkilidir (Şekil 3).



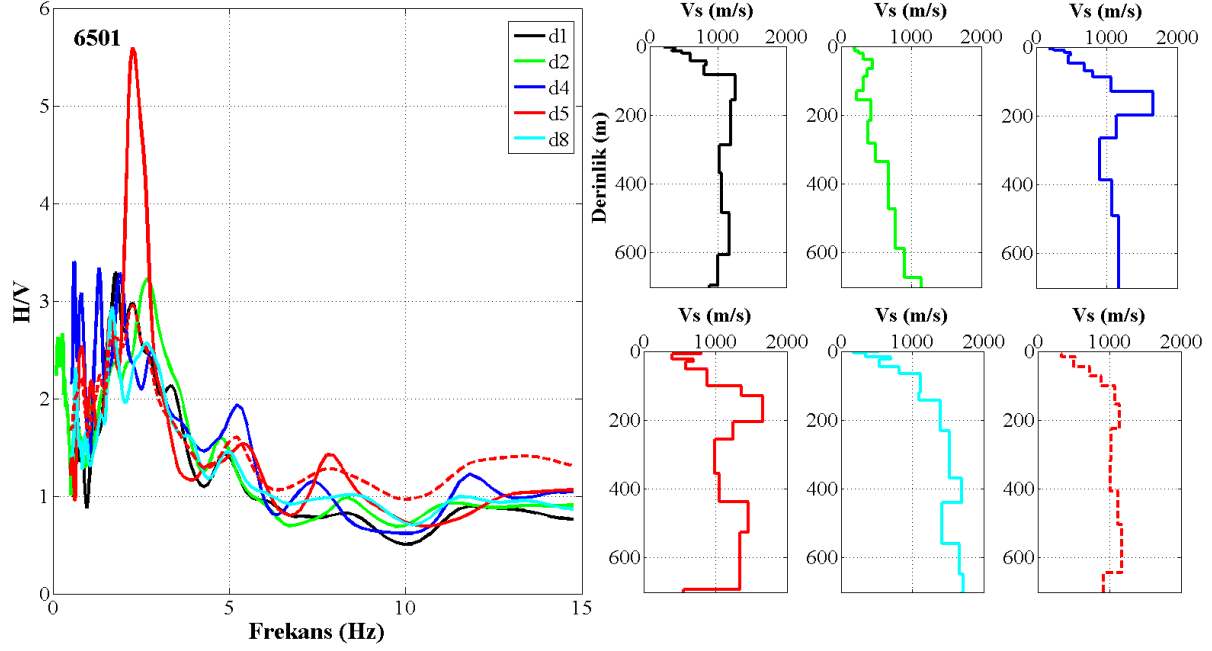
Şekil 3. 6505 istasyonu için Vs hızlarına bağlı olarak hata (misfit) değerinin frekansa bağlı değişimi.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Van Gölü doğusunda özellikle yerleşim alanları yakınında bulunan Van il merkezindeki (6501, TVAN), Erciş ilçesindeki (6506, ERCV) ve Çaldıran ilçesindeki (6505, CLDR) geniş bant (broad-band) ve kuvvetli yer hareketi (strong-motion) deprem istasyonları ve bu istasyonlar tarafından kaydedilen depremler kullanılmıştır (Çizelge 1 ve 2). Çalışmada kullanılan her bir istasyonda kaydedilen depremlerin HVSR spektral oran eğrileri elde edilmiş ve bu eğrilerin ters çözümünden derinliğe bağlı kayma dalgası hızı değişimi belirlenmiştir. EHVSr eğrilerinin ters çözümünde, yüzey altı elastik parametrelerin değerlerini geniş bir aralıkta araştırmak için sabit parametrelili başlangıç modelleri oluşturulmuştur (V_p : 1730 m/s, V_s : 1000 m/s, ρ : 1.95, h : 0 ile 200 m, Q_p : 10 ile 40, Q_s : 5 ile 30 aralığında).

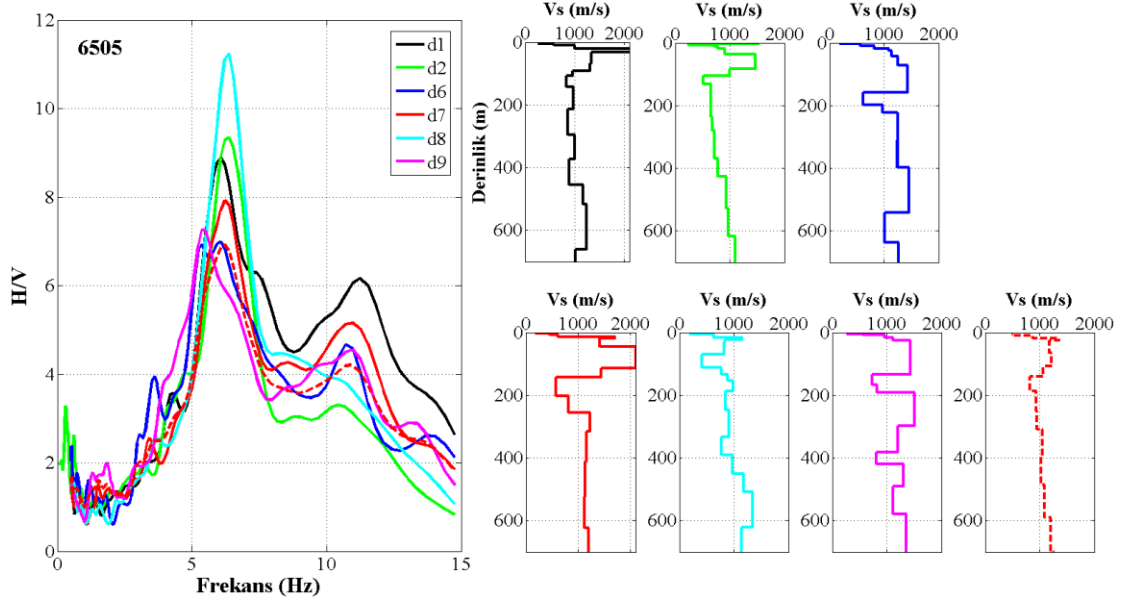
Çalışma alanı içerisinde, Van il merkezinde bulunan ve AFAD tarafından kurulan 6501 kodlu istasyon Çizelge 1’de verilen depremlerden 5 tanesini kaydetmiştir. İstasyon tarafından kaydedilen her bir deprem için hesaplanan EHVSr eğrileri Şekil 4’te sol panelde gösterilmektedir. EHVSr eğrileri incelendiğinde, kaydedilen depremlerden 1.3-2.6 Hz frekans aralığında değişen maksimum piklere sebep olmuştur. Bu eğrilerin ortalaması (kırmızı kesikli eğri) incelendiğinde ise 1.68 ile 2.25 Hz aralığında değişen frekanslarda pikler elde edilmiştir. Genlik açısından EHVSr eğrileri, d5 depremi hariç yaklaşık 3 civarındadır. Kaydedilen her bir depremin EHVSr eğrisinin ters çözümü sonucu elde edilen derinlik- V_s hız kesitleri Şekil 4’te sağ panelde verilmiştir. Derinlik-hız kesitlerine göre, 65-400 m derinlikten sonra yüksek hızlı ($V_s > 760$ m/s) tabakalara geçilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) ve diğer uluslararası (NEHRP, EC8) yönetmeliklere göre, V_s dalga hızının 760 m/s’den büyük değerleri mühendislik ana kayası olarak ifade edilmektedir. Ortalama V_s hız kesitinde (kırmızı kesikli eğri) ise yaklaşık 100 m’den sonraki derinliklerde, yüksek hızların temsil edildiği tabaka seviyeleri belirlenmiştir. Bu çalışmada, istasyonlar tarafından kaydedilen depremlerde kuzey, güney, doğu ve batı yönlerindeki farklı derecelerde hasara neden olan depremler kullanılmıştır.

Bu yaklaşımdaki temel amaç, farklı doğrultu ve uzaklıktaki depremlerin EHVSR spektral eğrilerinin ve derinliğe bağlı hız değişimlerinin belirlenmesidir. 6501 kodlu istasyon için kaydedilen depremlerin spektral eğrileri göreceli olarak çok fazla bir değişim göstermemiştir. Hız kesitlerinde ise benzer sonuçlar elde edilirken, bazı deprem kayıtları için farklı derinlik seviyeleri tespit edilmiştir. Burada depremin faylanma mekanizmasının, deprem karakteristiğinin (büyüklük, derinlik, yırtılma hızı, fay boyu gibi), kaydedilen istasyona olan uzaklığın ve ortamın jeolojik özelliklerinin etkili olduğu düşünülmektedir. 6501 istasyonu Van il merkezinde yer almaktadır ve bölgede yapılan önceki çalışmalarda alüvyon kalınlığının 250-300 m'den fazla olduğu öngörülmektedir (Özvan, 2004; Akkaya & Özvan, 2019). Yerel zemin koşulları, zemin sıklığı ve örtü yükü gibi parametrelerde göz önüne alındığında, elde edilen sonuçlarla jeolojik yapı uyum sergilemektedir.



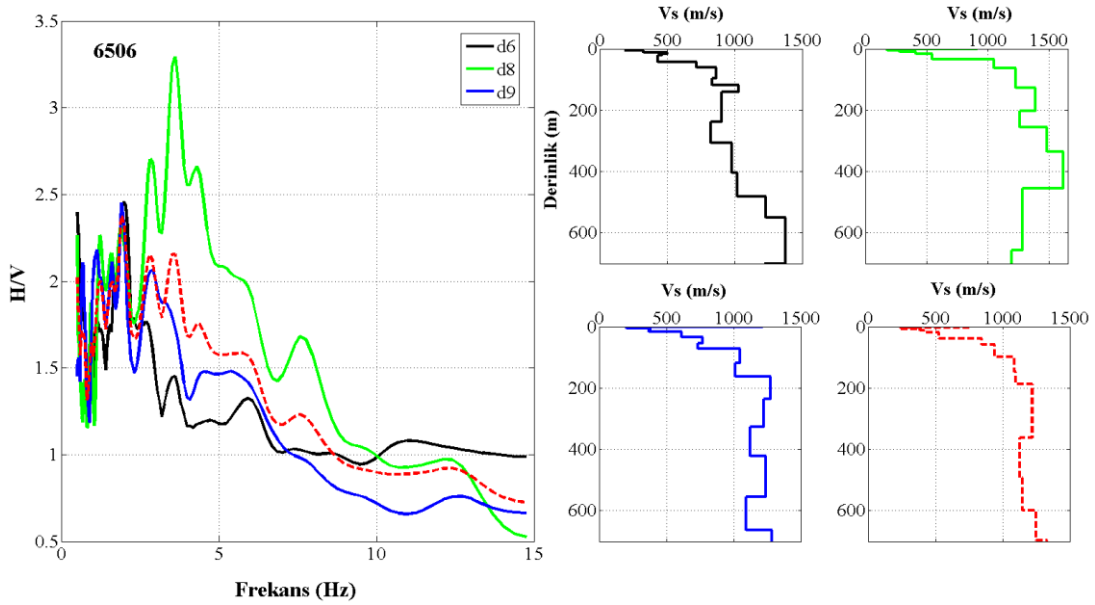
Şekil 4. Sol panel, Van il merkezi yakınında kurulu olan 6501 istasyonu kayıtlarından elde edilen EHVSER eğrilerini göstermektedir. Her bir renk farklı deprem kodunu (Çizelge 1) ve deprem lokasyonunu (Şekil 1) temsil etmektedir. Sağ panel, her bir eğriden elde edilen derinlik-Vs hız kesitleri ve bunların ortalamasını (kırmızı kesikli çizgi) göstermektedir.

Çaldıran ilçesi yakınında AFAD tarafından kurulan 6505 kodlu istasyon Çizelge 1'de verilen depremlerden 6 tanesini kaydetmiştir. İstasyon tarafından kaydedilen her bir deprem için hesaplanan EHVSER eğrileri Şekil 5'de sol panelde verilmiştir. EHVSER eğrileri incelendiğinde, kaydedilen tüm depremler için benzer eğri karakteristiği hâkimdir. Ortalama (kırmızı kesikli eğri) eğri incelendiğinde ise 6.2-10.5 Hz frekanslarında iki pik göze çarpmaktadır. Birden fazla baskın frekans pik noktalarının elde edilmesi, bölgede bulunan alüvyon birimlerin ve artan derinliklerdeki volkanik kayalarla olan hız kontrastından kaynaklanmaktadır. 6505 istasyonu tarafından kaydedilen 6 depremin EHVSER eğrisinin ters çözümü sonucu elde edilen derinlik-Vs hız kesitleri Şekil 5'de sağ panelde verilmiştir. Elde edilen hız kesitleri genel olarak benzer karakterdedir. İstasyon altı için 15-20 m derinliklerden sonra yüksek hızlı tabakalara geçildiği tespit edilmiştir. Bu bulgu istasyonun bulunduğu bölgenin jeolojik yapısıyla son derece uyumludur. Bölgede, Alkan (2021) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında Çaldıran yerleşim alanı ve çevresinde alüvyon kalınlığının yer yer değişkenlik göstermekle birlikte 20 m derinlikten daha sığ olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 5. Sol panel, Çaldıran ilçe merkezi yakınında kurulu olan 6501 istasyonu kayıtlarından elde edilen EHVSR eğrilerini göstermektedir. Her bir renk farklı deprem kodunu (Çizelge 1) ve deprem lokasyonunu (Şekil 1) temsil etmektedir. Sağ panel, her bir eğriden elde edilen derinlik-Vs hız kesitleri ve bunların ortalamasını (kırmızı kesikli çizgi) göstermektedir.

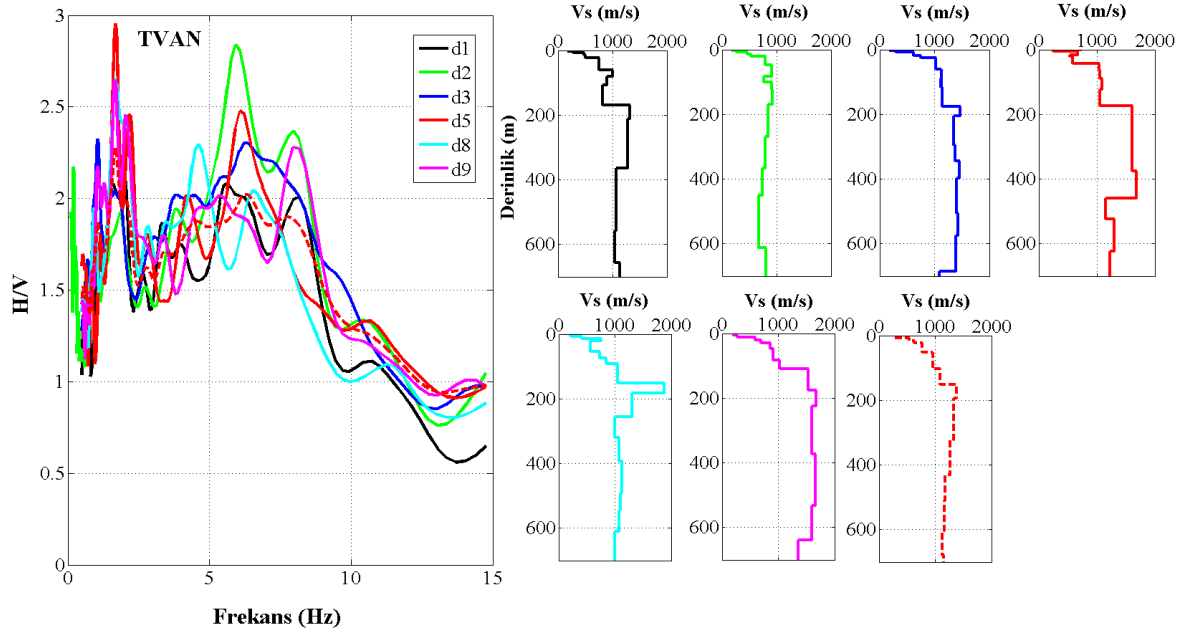
Erciş ilçesinde AFAD tarafından kurulan 6506 kodlu istasyon Çizelge 1’de verilen depremlerden 3 tanesini kaydetmiştir (Şekil 6). İstasyonda kaydedilen depremler için hesaplanan EHVSR eğrileri incelendiğinde, 1.75-3.5 Hz frekans aralığında pikler elde edilmiştir (Şekil 6, sol panel). Vs hız değerleri ise 65 ile 300 m derinliklerden sonra yüksek hız seviyelerine geçmiştir. Farklı seviyelerdeki alüvyon birimlerin kalınlığı ve sıklığı gibi farklı fiziksel özelliklerden dolayı, kaydedilen depremler için farklı hız geçişleri elde edilmiştir. Bölgedeki kalın alüvyon yapısı depremlerin hasar düzeyini çeşitli derecelerde artırıcı etkiler gösterebilmektedir. Bunun en önemli göstergesi 23 Ekim 2011 Van ($M_w=7.1$) depremi sonrası Erciş ilçesinde yaşanan hasar ve kayıplardır.



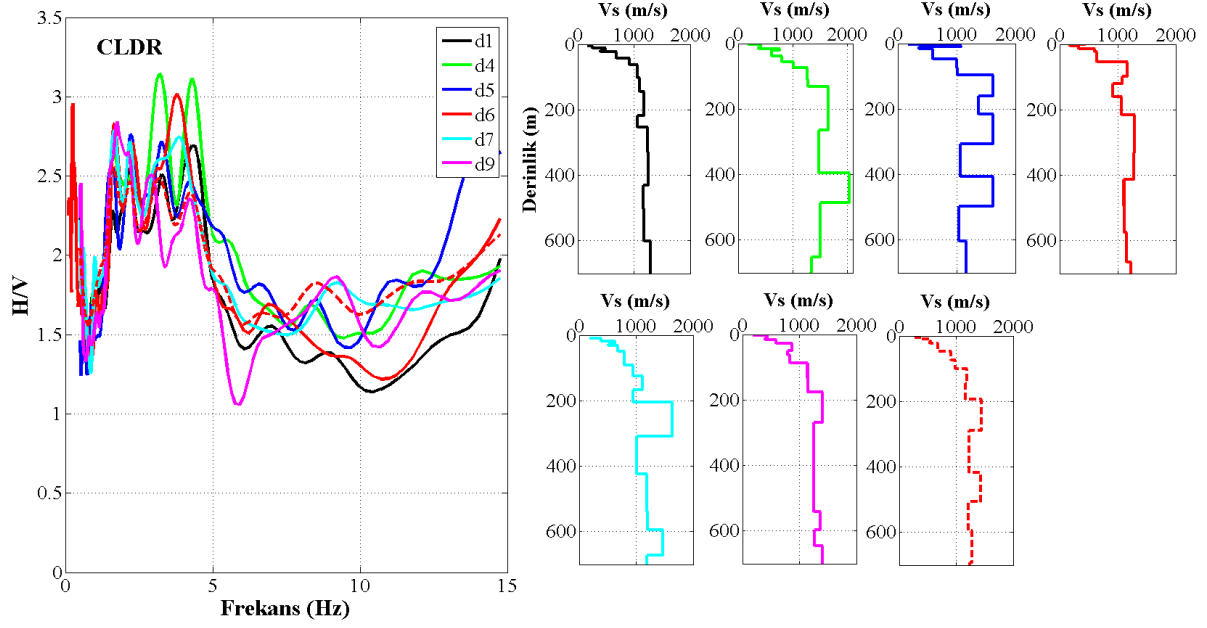
Şekil 6. Sol panel, Erciş ilçe merkezi yakınında kurulu olan 6506 istasyonu kayıtlarından elde edilen EHVSR eğrilerini göstermektedir. Her bir renk farklı deprem kodunu (Çizelge 1) ve deprem lokasyonunu (Şekil 1) temsil etmektedir. Sağ panel, her bir eğriden elde edilen derinlik-Vs hız kesitleri ve bunların ortalamasını (kırmızı kesikli çizgi) göstermektedir.

Van il merkezinde AFAD tarafından kurulan geniş bantlı TVAN kodlu istasyon Çizelge 1’de verilen depremlerden 6 tanesi kaydetmiştir (Şekil 7). İstasyon tarafından kaydedilen ortalama EHVSr eğrileri incelendiğinde 1.68 ile 6.2 Hz frekanslarında pikler elde edilmiştir. Derinlik-Vs hız kesitleri incelendiğinde 25-100 m derinlik sonrasında yüksek hızlı ($V_s > 760$ m/s) tabakalar gözlemlenebilir. Bu istasyon için elde edilen verilerle Şekil 4’te verilen 6501 kodlu kuvvetli yer hareketi istasyonuna ait EHVSr eğrileri karşılaştırıldığında, 1.6 Hz civarında benzer pikler ve genlik değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, TVAN istasyonu için yüksek frekanslarda da pikler gözlenmiştir. Farklı doğrultu ve uzaklıklardaki deprem kayıtlarından elde edilen EHVSr eğrilerindeki farklı frekanslardaki pikler jeolojik yapının özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Buna bağlı olarak, ters çözüm sonucu elde edilen hız kesitleri yüksek hız geçişlerinde benzerlikler göstermiştir.

Çaldıran ilçesinde KOERI tarafından kurulan CLDR kodlu istasyon Çizelge 1’de verilen depremlerden 6 tanesi kaydetmiştir (Şekil 8). EHVSr eğrileri incelendiğinde, kaydedilen tüm depremler için benzer eğri karakteristiği net olarak göze çarpmaktadır. Ortalama eğri (kırmızı kesikli eğri) incelendiğinde ise 5 Hz’den küçük (1.6-4.2 Hz aralığında) ve 5 Hz’den büyük (6.2 ve 8.5 Hz) frekanslarda olmak üzere iki ayrı pik elde edilmiştir. Çaldıran ilçesi yakınında kurulmuş olan 6505 kodlu kuvvetli yer hareketi istasyonu EHVSr eğrileri (Şekil 5) ile CLDR istasyonu EHVSr eğrileri karşılaştırıldığında, yüksek frekanslarda yaklaşık benzer pikler elde edilmiştir. Fakat düşük frekanslarda 6505 istasyonunda pik görülmemiştir. Bu durum geniş-bant istasyonlar tarafından kaydedilen deprem verilerinin kullanılmasıyla, farklı frekans bantlarındaki eğrileri belirlemede daha yararlı olabileceğini ortaya çıkarmıştır. Farklı frekanslarda birden fazla baskın pik noktalarının elde edilmesi bölgede bulunan farklı alüvyon seviyelerine ve bu alüvyon birimlerle kaya birimler arasındaki hız ve/veya empedans kontrastından kaynaklandığı düşünülmektedir.

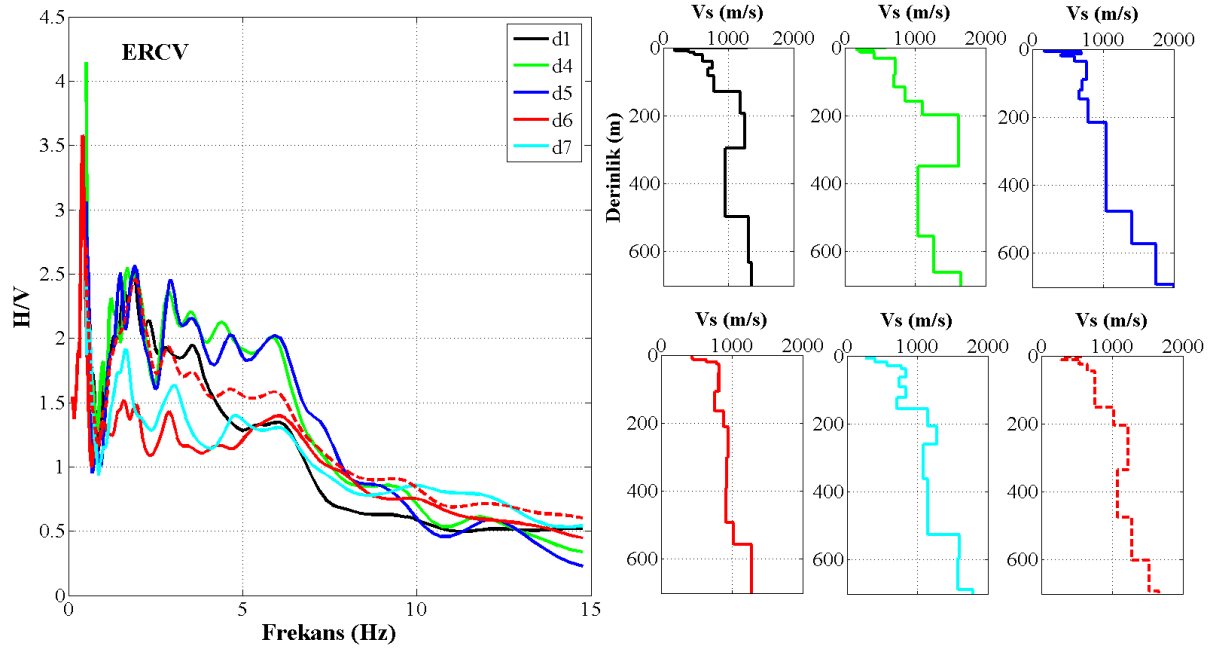


Şekil 7. Sol panel, Van il merkezi yakınında kurulu olan TVAN istasyonu kayıtlarından elde edilen EHVSr eğrilerini göstermektedir. Her bir renk farklı deprem kodunu (Çizelge 1) ve deprem lokasyonunu (Şekil 1) temsil etmektedir. Sağ panel, her bir eğriden elde edilen derinlik-Vs hız kesitleri ve bunların ortalamasını (kırmızı kesikli çizgi) göstermektedir.



Şekil 8. Sol panel, Çaldıran ilçe merkezi yakınında kurulu olan CLDR istasyonu kayıtlarından elde edilen EHVSR eğrilerini göstermektedir. Her bir renk farklı deprem kodunu (Çizelge 1) ve deprem lokasyonunu (Şekil 1) temsil etmektedir. Sağ panel, her bir eğriden elde edilen derinlik-Vs hız kesitleri ve bunların ortalamasını (kırmızı kesikli çizgi) göstermektedir.

Erciş ilçesinde KOERI tarafından kurulan ERCV kodlu istasyon Çizelge 1’de verilen depremlerden 5 tanesini kaydetmiştir (Şekil 9). EHVSR eğrileri incelendiğinde, 1.8-3.0 Hz frekans aralığında pikler göze çarpmaktadır. Vs hız değerleri ise 45 ile 160 m derinliklerden sonra yüksek hız seviyelerine geçmiştir. Şekil 6’da gösterilen ve Erciş ilçesi sınırları içerisinde kurulu olan 6506 kodlu kuvvetli yer hareketi istasyonundan elde edilen EHVSR eğrileri ile ERCV istasyonundan elde edilen eğriler birbirlerine oldukça uyumludur.



Şekil 9. Sol panel, Erciş ilçe merkezi yakınında kurulu olan ERCV istasyonu kayıtlarından elde edilen EHVSR eğrilerini göstermektedir. Her bir renk farklı deprem kodunu (Çizelge 1) ve deprem lokasyonunu (Şekil 1) temsil etmektedir. Sağ panel, her bir eğriden elde edilen derinlik-Vs hız kesitleri ve bunların ortalamasını (kırmızı kesikli çizgi) göstermektedir.

4. Sonuç

Derinliğe bağlı kayma dalgası hız değişimi ve anakaya derinliğinin belirlenmesi depremlere bağlı oluşan hasarların değerlendirilmesinde son derece önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada Van ili, Çaldıran ve Erciş ilçelerinde kurulu olan kuvvetli yer hareketi ve geniş-bant deprem istasyonları tarafından kaydedilen kuzey, güney, doğu ve batı yönlerindeki farklı derecelerde hasara neden olan 9 depreme ait verilerin EHVS analizi yapılmıştır. Bu yaklaşımdaki en temel amaç, farklı yörünge ve uzaklıktaki depremlerin EHVS spektral eğrilerinin ve derinliğe bağlı hız değişimlerinin belirlenmesidir. İstasyonlardaki kayıt edilen deprem kayıtlarının kullanılmasıyla, istasyon altı ortalama kayma dalgası (Vs) hız yapısı ve ana kaya derinlikleri tespit edilmiştir.

İstasyonlar tarafından kaydedilen depremlerin spektral eğrilerinde, her bir istasyonda göreceli olarak benzer eğri karakteristiği elde edilmemiştir. Çalışma bölgesinde yapılan EHVS analizleri sonucunda, deprem istasyonlarının altında alüvyon birimlerinin kalınlığına bağlı olarak 1.6 ile 3.5 Hz aralığında değişen nispeten düşük frekans değerleri elde edilmiştir. Ayrıca bazı deprem istasyonlarının altında bulunan farklı kaya birimlerinin varlığı frekans değerlerini yükseltmiştir (> 5 Hz). Vs hız kesitlerinde ise bazı deprem kayıtları için farklı derinlik seviyelerinde yüksek hızlı anakaya geçişleri tespit edilmiştir. Bu farklılığa, depremin faylanma mekanizmasının, deprem karakteristiğinin (büyüklük, derinlik, yırtılma hızı, fay boyu gibi), depremin kaydedilen istasyona olan uzaklığının yanı sıra yerel zemin koşullarının, zemin sıklığı ve örtü yükü gibi ortamın jeolojik özelliklerinin etkili olduğu düşünülmektedir.

6505 ve TVAN kodlu istasyonlarda, birden fazla baskın frekans pik noktaları elde edilmiştir. Farklı frekanslardaki birden fazla baskın pik noktalarının elde edilmesi, bölgede bulunan farklı alüvyon seviyelerine ve bu alüvyon birimlerle kaya birimler arasındaki hız ve/veya empedans kontrastından kaynaklandığını göstermektedir.

Çalışmada kullanılan kuvvetli yer hareketi istasyonu verileri ile geniş-bant istasyon verileri karşılaştırıldığında, geniş-bant istasyonlar tarafından kaydedilen deprem verilerinin farklı frekans bantlarında EHVS eğrilerini belirleme de daha yararlı olabileceği görülmüştür.

Özellikle alüvyon birimler üzerine kurulu olan istasyonlarda (6501, 6506, ERCV) nispeten yüksek genlik değerleri ve yüksek periyotlar (0.28-0.64 sn) elde edilmiştir. Zayıf zemin birimleri ve yüksek alüvyon kalınlığı olan bu bölgelerde, deprem dalgalarının genlikleri artan bir eğilimdedir ve yüksek düzeyde hasara neden olabilecek düzeydedir. Özellikle yerleşim alanlarının eski göl ve akarsu çökelleri üzerinde kurulu olması ve yapı kalitesindeki problemlerde dikkate alındığında, bu bölgelerde olası büyük bir depremde hasar oranını artırıcı bir etken olarak görülmelidir ve bu risklere karşı önlemler alınmalıdır. Bunun en önemli göstergesi 23 Ekim 2011 Van ($M_w=7.1$) depremi sonrası yaşanan hasar ve kayıplardır.

Teşekkür

Çalışmada kullanılan kuvvetli yer hareketi kayıtları AFAD web sayfasından (<https://tadas.afad.gov.tr>), geniş-bant deprem kayıtları EIDA web sayfasından (<http://orfeus-eu.org/webdc3/>) alınmıştır. Verilerin işlenmesinde açık kaynak kodlu Geopsy (www.geopsy.org) yazılımı kullanılmıştır.

Kaynakça

- AFAD. (2022). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://tadas.afad.gov.tr> Erişim tarihi: 10.02.2022.
- Akkaya, İ. (2015). The Application of HVSR microtremor survey method in Yüksekova (Hakkari) region, Eastern Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 109, 87-95.
- Akkaya, İ., Özvan, A., Tapan, M., & Şengül, M. A. (2015). Determining the site effects of 23 October 2011 earthquake (Van province, Turkey) on the rural areas using HVSR microtremor method. *Journal of Earth System Science*, 124(7), 1429-1443.
- Akkaya, İ., Özvan, A., Akın, M., Akın, M. K., & Övün, U. (2018). Comparison of SPT and Vs-based liquefaction analyses: A Case Study in Erciş (Van, Turkey). *Acta Geophysica*, 66, 21-38. doi :10.1007/s11600-017-0103-0.

- Akkaya, İ., & Özvan, A. (2019). Site characterization in the Van settlement (Eastern Turkey) using surface waves and HVSR microtremor methods. *Journal of Applied Geophysics*, 160, 157-170.
- Akkaya, İ. (2020a). Availability of seismic vulnerability index (Kg) in the assessment of building damage in Van, Eastern Turkey. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19(1), 189-204.
- Akkaya, İ. (2020b). Jeofizik verilerinden elde edilen sismik zayıflık indisinin yapı hasar dağılımının belirlenmesinde kullanılabilirliği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(4), 1711-1723.
- Alkan, A. (2021). *Çaldıran (Van) yerleşim alanı zemin özelliklerinin yüzey dalgası yöntemleri ile incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi), Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye.
- Alkan, H., Çınar, H., & Oreshin, S. (2020). Lake Van (southeastern Turkey) experiment: Receiver function analyses of lithospheric structure from teleseismic observations. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 3891-3909
- Alkan, H., Büyüksaraç, A., Bektaş, Ö., & Işık, E. (2021). Coulomb stress change before and after 24.01.2020 Sivrice (Elazığ) earthquake (Mw=6.8) on the East Anatolian Fault Zone. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2648.
- Aydın, U., Pamuk, E., & Ozer, C. (2021). Investigation of soil dynamic characteristics at seismic stations using H/V spectral ratio method in Marmara Region, Turkey. *Natural Hazards*, doi: 10.1007/s11069-021-04959-4.
- Bard, P. Y. (1998, Aralık). *Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation*. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama Japonya.
- Bianco, F., Del Pezzo, E., Castellano, M., Ibanez, J., & Di Luccio, F. (2002). Separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in the Southern Apennine zone, Italy. *Geophysical Journal International*, 150(1), 10-22.
- Bignardi, S., Mantovani, A., & Abu Zeid, N. (2016). OpenHVSR: imaging the subsurface 2D/3D elastic properties through multiple HVSR modeling and inversion. *Computer & Geosciences*, 93, 103-13.
- Bignardi, S., Yezzi, A. J., Fiussello, S., & Comelli, A. (2018). OpenHVSR - Processing toolkit: Enhanced HVSR processing of distributed microtremor measurements and spatial variation of their informative content. *Computer & Geosciences*, 120, 10-20.
- Cukur, D., Krastel, S., Tomonaga, Y., Schmincke, H. U., Sumita, M., Meydan, A. F., Çağatay, M. N., Toker, M., Kim, S. P., Kong, G. S., & Horozal, S. (2017) Structural characteristics of the Lake Van Basin, eastern Turkey, from high-resolution seismic reflection profiles and multibeam echosounder data: geologic and tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 106, 239-253.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3229-3275.
- Fah, D., Kind, F., & Giardini, D. (2001). A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophysical Journal International*, 145, 535-549.
- Gupta, R. K., Agrawal, M., Pal, S. K., & Das, M. K. (2021). Seismic site characterization and site response study of Nirsa (India). *Natural Hazards*, 108, 2033-2057.
- Herak, M. (2008). ModelHVSR- A Matlab® tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. *Computer & Geosciences*, 34, 1514-26.
- Irmak, T. S., Doğan, B., & Karakaş, A. (2012). Source mechanism of the 23 October, 2011, Van (Turkey) earthquake (Mw= 7.1) and aftershocks with its tectonic implications. *Earth Planets Space*, 64, 991-1003.
- Koçyiğit, A., Yilmaz, A., Adamia, S., & Kulashvili, S. (2001). Neotectonics of East Anatolian Plateau (Turkey) and Lesser Caucasus: Implication for transition from thrusting to strike-slip faulting. *Geodinamica Acta*, 14, 177-195.
- Koçyiğit, A. (2013). New field and seismic data about the intraplate strike-slip deformation in Van region, East Anatolian plateau, E.Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 586-605.
- KOERI. (2022). *Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü*. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/> Erişim tarihi: 10.02.2022.

- Lachet, C., & Bard, P. Y. (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *Journal of Physical Earth*, 42, 377-397.
- Langston, C. (1977). Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67, 713-724.
- Lermo, J., & Chavez-Garcia, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1574-1594.
- Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshihara, M., Aki, K., & Zeng, Y. (1992). A comparative study of scattering, intrinsic, and coda Q-1 for Hawaii, Long Valley, and Central California between 1.5 and 15.0 Hz. *Journal of Geophysical Research*, 97, B9.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute Quarterly Reports*, 30, 25-33.
- Nakamura, Y. (2000, February). *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's technique and its applications*. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- Nakamura, Y. (2008, February). *On the H/V Spectrum*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Öztürk, S. (2018). Earthquake hazard potential in the Eastern Anatolian region of Turkey: seismotectonic b and Dc-values and precursory quiescence Z-value. *Frontiers of Earth Science*, 12(1), 215-236.
- Özvan, A. (2004). *Van Yerleşim Alanının Mühendislik Jeolojisi*. (Yüksek lisans tezi), Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye.
- Özvan, A., Akkaya, İ., Tapan, M., & Şengül, M. A. (2005, Mart). *Van yerleşkesinin deprem tehlikesi ve olası bir depremin sonuçları*. Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye.
- Pamuk, E. (2019). Investigation of the local site effects in the northern part of the eastern Anatolian region, Turkey. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 60(4), 549-568.
- Pamuk, E., & Ozer, C. (2020). The Site Effect Investigation with Using Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio Method on Earthquake Data, South of Turkey. *Geotectonics*, 54(4), 563-576.
- Parolai, S., Picozzi, M., Richwalski, S. M., & Milkereit, C. (2005). Joint inversion of phase velocity dispersion and H/V ratio curves from seismic noise recordings using a genetic algorithm, considering higher modes. *Geophysical Research Letters*. 32, L01303.
- Reilinger, R., Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., & Cakmak, R. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*, 111, B05411. doi:10.1029/2005JB004051
- Selçuk, A. S. (2016). Evaluation of the relative tectonic activity in the eastern Lake Van basin, East Turkey. *Geomorphology*, 270, 9-21.
- Sengul, M. A., Gürboğa, Ş., Akkaya, İ., & Özvan, A. (2019). Deformation patterns in the Van region (Eastern Turkey) and their significance for the tectonic framework. *Geologica Carpathica*, 70, 193-208.
- Şengör, A. M. C., & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241.
- Şengör, A. M. C., Ozeren, S., Genc, T., & Zor, E. (2003). East Anatolian high plateau as a mantle-supported, north-south shortened domal structure. *Geophysical Research Letters*, 30, 4.
- TBDY. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Ankara.
- Toker, M., Pınar, A., & Tur, H. (2017). Source mechanisms and faulting analysis of the aftershocks in the Lake Erçek area (Eastern Anatolia, Turkey) during the 2011 Van event (Mw 7.1): Implications for the regional stress field and ongoing deformation processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 150, 73-86.
- Toker, M., Pınar, A., & Hoşkan, N. (2021). An integrated critical approach to off-fault strike-slip motion triggered by the 2011 Van mainshock (Mw 7.1), Eastern Anatolia (Turkey): New stress field constraints on subcrustal deformation. *Journal of Geodynamics*, 147, 101861. doi : 0.1016/j.jog.2021.101861.
- Utkucu, M. (2013). 23 October 2011 Van, Eastern Anatolia, earthquake (MW 7.1) and seismotectonics of Lake Van area. *Journal of Seismology*, 17, 783-805.