
Araştırma Makalesi / Research Article

Aktif Tektonizma Etkisi Altındaki Çaldıran (Van) Yerleşim Alanının Yüzeysel Dalgası Yöntemleriyle İncelenmesi

Ayhan ALKAN¹, İsmail AKKAYA^{2*},

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği ABD, Van
²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Van
(ORCID: [0000-0001-9460-6828](https://orcid.org/0000-0001-9460-6828)) (ORCID: [0000-0002-7682-962X](https://orcid.org/0000-0002-7682-962X))

Öz

Çaldıran (Van) yerleşim alanı ve çevresi deprem üretme potansiyeli son derece fazla olan aktif bir bölgede yer almaktadır. Sağ yönlü doğrultu atım karakterli Çaldıran fay zonu bölgenin en önemli tektonik unsurlarındandır. Depreme bağlı yapısal hasarların, yerel zemin özelliklerinin ve yapı-zemin ilişkilerinin incelenmesinde kayma dalga hızı (Vs) temel parametrelerden birisidir. Bu çalışmada, aktif ve pasif kaynaklı yüzeysel dalgası yöntemleri uygulanarak elde edilen Vs hızlarından Van ili Çaldıran ilçesi yerleşim alanı ve çevresinin zemin özellikleri araştırılmıştır. Çalışma alanında 66 noktada mikrotremör ölçümü, 56 serimde Yüzeysel Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW), 39 serimde ise hem MASW hem de sismik kırılma ölçümleri yapılmıştır. Çalışma alanının mühendislik özelliklerinin ortaya konması ve deprem-zemin-yapı ilişkilerinin incelenmesi için bölgenin büyütme, periyot (t_0), ilk 30 m'deki ortalama Vs hızını temsil eden Vs30, zemin sınıfı ve sismik zayıflık indisi (K_g) haritaları hazırlanmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak, farklı doğrultularda iki boyutlu (2B) derinlik kesitleri oluşturulmuştur.

Anahtar kelimeler: Çaldıran fay zonu, Mikrotremör, MASW, Vs30, Sismik zayıflık indisi.

Investigation of Çaldıran (Van) Settlement Area Under the Effect of Active Tectonics by Surface Wave Methods

Abstract

Çaldıran (Van) settlement area and its surroundings are located in an active region with a high earthquake potential. The right-lateral strike-slip characteristic Çaldıran fault zone is one of the most important tectonic units of the region. Shear wave velocity (Vs) is one of the fundamental parameters in the investigation of earthquake-related structural damages, local soil properties and structure-soil relations. In this study, active and passive sourced surface wave methods were applied at different measurement points in the study area in order to determine soil properties of the settlement area and its surroundings in Çaldıran district of city of Van. Microtremor measurements were performed at 66 points, Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW) at 56 points, and both MASW and seismic refraction measurements were carried out at 39 points in the study area. In order to investigate the engineering properties of study area and earthquake-soil-structure relations parameters such as the amplification factor, fundamental period (t_0), Vs30 value, soil classification and seismic vulnerability index (K_g) maps have been prepared. Two-dimensional (2D) depth cross-sections in different directions were created using the data obtained.

Keywords: Çaldıran fault zone, MASW, Microtremör, Vs30, Seismic vulnerability index.

*Sorumlu yazar: iakkaya@yyu.edu.tr

Geliş Tarihi: 30.06.2021, Kabul Tarihi: 25.08.2021

1. Giriş

Büyük ve hasar verici deprem olma olasılığı son derece fazla olan Türkiye’de geçmişten günümüze kadar pek çok yıkıcı deprem meydana gelmiş, ağır hasar ve can kayıpları oluşmuştur. Deprem riski yüksek olan bölgelerde yer tepkisi ve zeminin dinamik parametrelerinin belirlenmesi son derece önemlidir. Zeminlerin deprem esnasındaki farklı davranış karakteristiklerine bağlı olarak üzerine kurulu olan yapılara olan etkileri de değişkenlik gösterebilmektedir. Dolayısıyla zemin tabakaların özelliklerini ortaya koymak, depremin oluşturacağı zararın analizinde belirleyici olabilmektedir.

Çaldıran ve çevresi aktif tektonizma ve depremsellik etkisi altındadır. Bölgede hem tarihsel hem de aletsel dönemde birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Çalışma alanında yer alan sağ yönlü doğrultu atımlı fay karakterli Çaldıran Fay zonunda 24 Kasım 1976 tarihinde ($M_s=7.5$, $M_w=7.1$) meydana gelen depremde bölge ve çevresinde yüksek düzeyde hasar oluşmuş, can ve mal kayıpları yaşanmıştır. İlçe çevresinde artan nüfusa bağlı olarak artan yapı sayısı zemin araştırılmalarının da önemi arttırmaktadır [1- 6].

Olası hasar verici depremlerde yerel zemin karakteristiği ve bina tasarım özellikleri hasar oranlarını arttırıcı temel nedenlerdir. Bu nedenle mühendislik yapısının oturacağı zeminin doğru ve güvenilir bir şekilde tanımlanması gerekir. Jeofizik yöntemlerden elde edilen kayma dalga hızı (V_s) zeminin deprem sırasındaki davranışını belirlemede kullanılan en önemli parametrelerden birisidir. Bununla birlikte, depremler sırasında meydana gelen hasara kayma dalga hızı (V_s) ve yüzey dalgalarının neden olduğu bilinmektedir. Ayrıca, kayma dalga hızı mühendislik yapılarının deprem esnasındaki farklı davranış biçimlerini ve zarar görme olasılığını tahmin etmede kullanılan temel parametrelerdendir. Bu nedenle ele alınan zeminin hız kesitinin derinliğe göre değişiminin belirlenmesi gerekmektedir. Geleneksel sismik yöntemlerin (kırılma ve yansıma) dışında V_s dalga hızı belirlemede, aktif ve pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri geliştirilmiştir ve günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Dispersiyona uğrayan yüzey dalgaları, tabaka kalınlığına, V_p ve V_s dalga hızlarına ve yoğunluk parametrelerine bağlıdır. Yüzey dalgası yöntemleri (MASW, ReMi, SPAC) dispersiyon özelliğinden yararlanarak V_s dalga hızının belirlenmesini sağlarlar. Teknolojik gelişmelerle birlikte yüksek çözüm gücü ve doğrulukta veri üretilebilen cihazların geliştirilmesi bu yöntemlerin kullanım alanlarında arttırmıştır. Yüzey dalgası yöntemleri kullanılarak geçmişten günümüze pek çok bilimsel araştırma ve çalışma yapılmıştır [3, 7- 17].

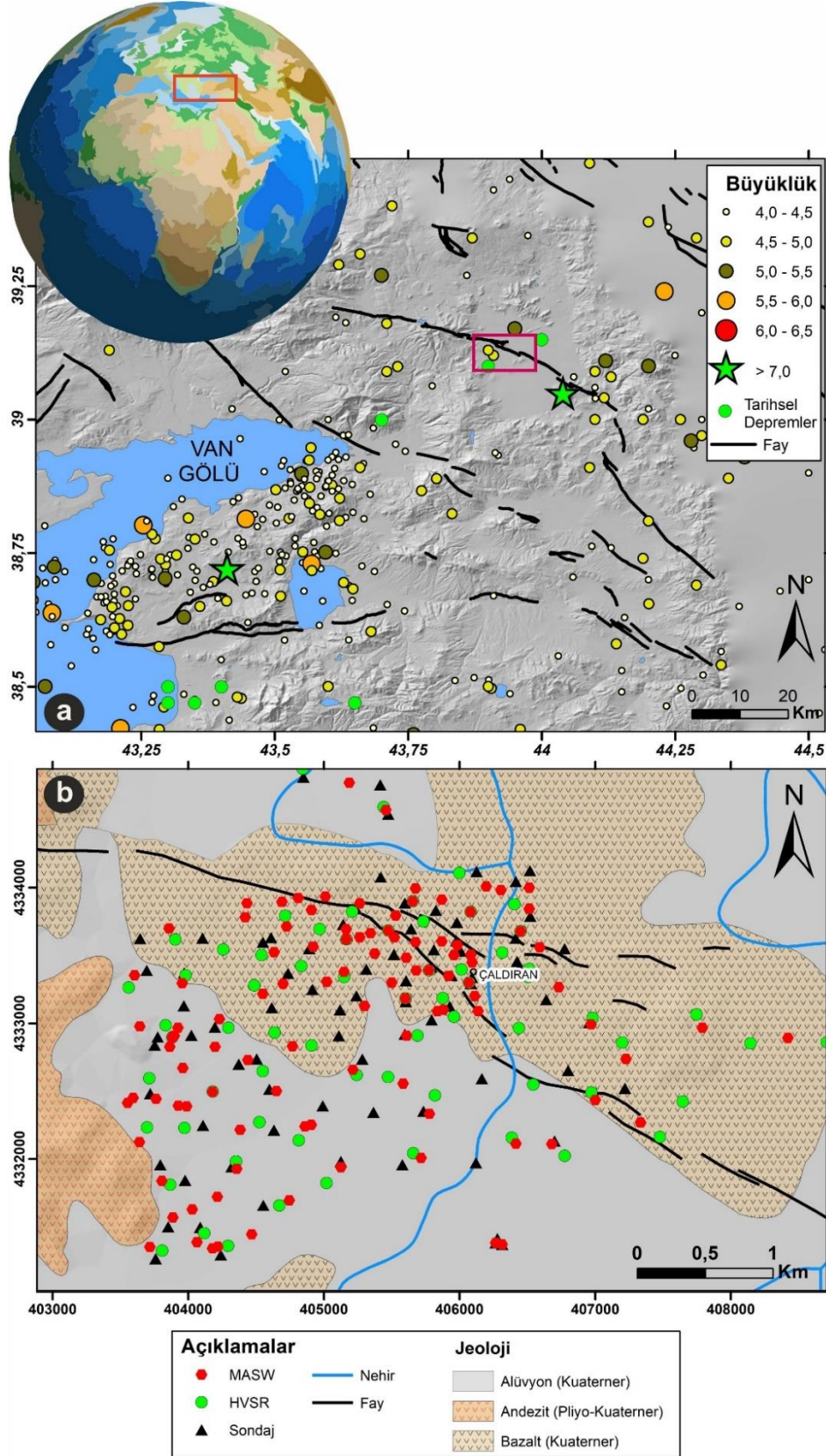
Bu çalışma kapsamında hem deprem-zemin-yapı etkileşiminde hem de mühendislik analizlerinde son derece önemli bir girdi parametresi olan V_s hızının belirlenmesi için yüzey dalgası ölçüm yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma alanında elde edilen verilerle derinlik kesitleri oluşturulmuştur. Alanı tanımlamak açısından farklı doğrultularda oluşturulan profillerle bölgenin yanal ve düşey yönde zemin yapısı ve alandaki en önemli tektonik unsur olan Çaldıran Fayına ilişkin bulgular üretilmiştir. Elde edilen veri setlerinin tamamı çalışma bölgesinin jeolojik ve tektonik unsurları ile birlikte değerlendirilmiştir.

2. Çalışma Alanının Jeolojisi ve Depremselliği

Çaldıran yerleşim alanı ve çevresinde genel olarak Pliyo-Kuvaterner yaşlı volkanik birimler ve pekişmemiş sedimanlardan oluşan alüvyon birimler yer almaktadır (Şekil 1b). Bölgede Pliyo-Kuvaterner yaşta, trakit, andezit, trakiandezit ve bazaltlar ile bunlara bağlı olarak gelişmiş tüf ve tüfitler oldukça yaygın olarak yüzeyler [18]. Bölgede Tendürek volkanına ait birimler geniş alanlara yayılmış bazalt lavları, andezit ve tüf yaygın olarak izlenir. Bazaltlar genel olarak siyah renkli, bol gaz boşluklu yer yer cüruf şeklinde, akma dokulu olup, hamuru tamamen plajiyoklaz mikrolitleri ve camdan oluşmuştur [19]. İnceleme alanında bazalt birimler bazı yerlerde alüvyonun altında, bazı yerlerde ise yüzeyden itibaren kendini göstermektedir. Andezitler ise kiremit kırmızısı renginde faneritik dokulu yer yer kırıklı-çatlaklı şeklinde gözlemlenmiştir. Üst kotlarda bu birimlerin ayrılmış malzemeleri bulunmaktadır. Havza ise pekişmemiş genç alüvyon yelpazesi ve akarsu çökellerinden oluşmaktadır. Alüvyon birimler sarımsı-kahverengimsi siltli kil, siltli killi kum, siltli killi çakıl, kumlu çakıl şeklinde gözlenmektedir [19, 6].

Avrasya ve Arap Levhalarının çarpışması sonucu gelişen kuzey-güney yönlü sıkışma rejimi bölgenin tektonik yapısının gelişmesinde ana unsur olmuştur. Çarpışmaya bağlı olarak yüksek topoğrafik yapılar ve birçok sıkışma havzası oluşmuştur. Kuzey-güney yönlü sıkışma rejimi sonucunda

genel olarak doğu-batı doğrultulu ters faylar, kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu sağ yönlü ve kuzeydoğu-güneybatı yönelimli sol yönlü doğrultu atımlı faylar ile kuzey-güney doğrultulu genişleme yapıları tarafından temsil edilen bir tektonik yapı meydana gelmiştir [20- 23].



Şekil 1. Çalışma alanının depremsellik ve jeoloji haritası (Faylar Emre vd. [24]'den, deprem verileri ise Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsünden [25] alınmıştır).

Çalışma alanı ve çevresinde tarihsel ve aletsel dönemde hasar verici büyük deprem üretmiş pek çok aktif fay zonu bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi farklı segmentlere ayrılmış Çaldıran Fay zonudur. Çaldıran Fayı K35°B ile K70°B arasında değişen doğrultularda Türkiye-İran sınırına kadar 60 km boyunca devam eden sağ yanal doğrultu atım karakterindedir [22]. İran sınırları içerisinde yer alan ve Çaldıran Fayının devamı niteliğindeki Salmas ve Kuzey Tebriz fayları bölgeyi etkileyebilecek diğer tektonik yapılarıdır [6]. Çaldıran fayı 1976 yılında, Mw=7.1 büyüklüğünde deprem üretmiş ve bu deprem 3840 kişinin hayatını kaybetmesine ve büyük hasarlara sebep olmuştur. Deprem sonrası yapılan çalışmalarda 50-55 km'lik yüzey kırığı ile 2.75 metrelik yanal atım belirlenmiştir [26, 22]. Çalışma alanı ve çevresini de içeren Van Gölü havzası deprem üretme potansiyeli son derece yüksek bir bölgedir ve farklı büyüklüklerde pek çok deprem meydana gelmiştir (Şekil 1a).

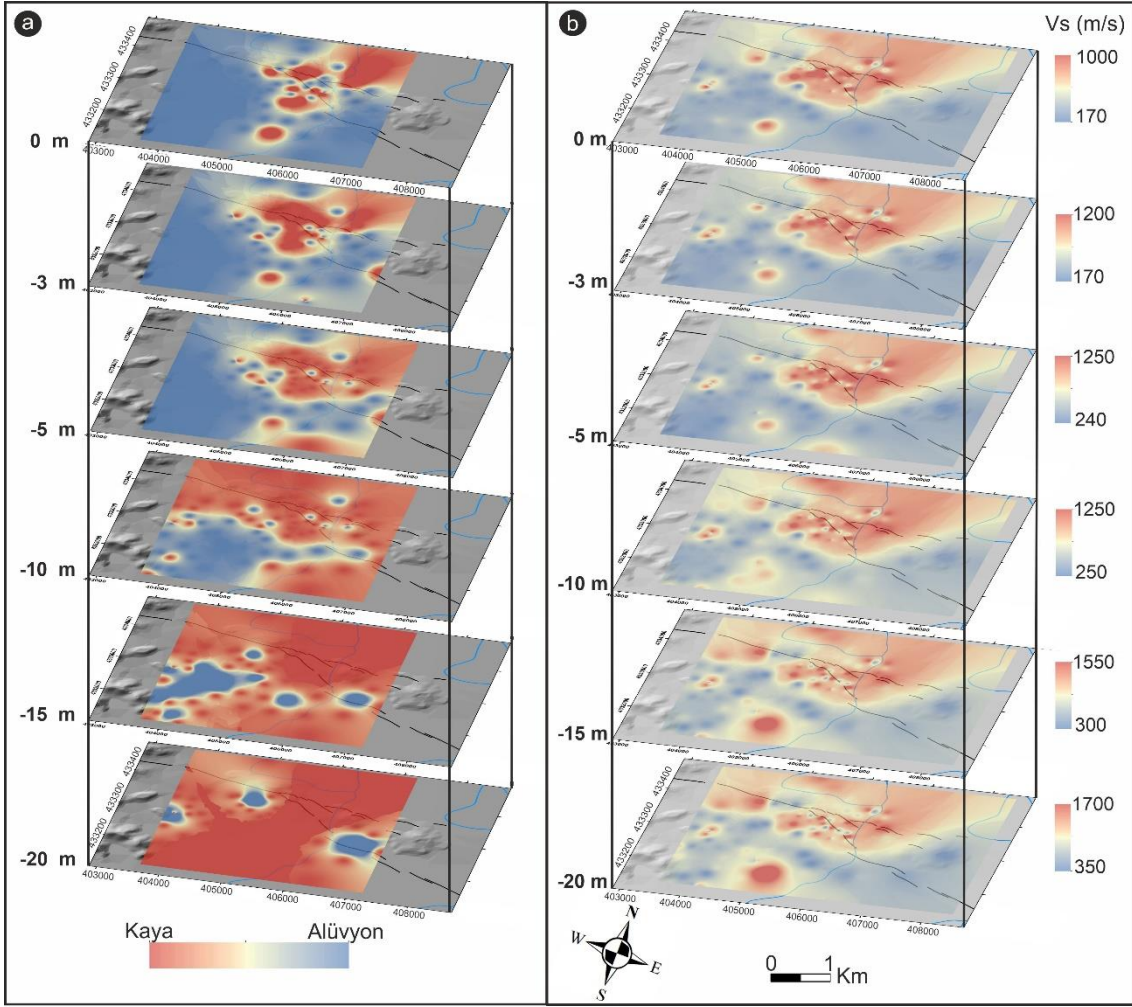
3. Arazi İncelemeleri

Çaldıran yerleşim alanı ve çevresinde zemin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için 66 mikrotremor ölçümü, 95 sismik kırılma ve MASW (Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi) ölçümü yapılmış, farklı kurum ve özel şirketler tarafından daha önceden yapılmış 80 zemin sondajı verileri de değerlendirilmiştir (Şekil 1b). Zeminlerin düşey doğrultudaki litolojik özelliklerini, mühendislik parametrelerini ve hız kesitlerinin doğruluğunu belirlemek için jeoteknik sondajlar kullanılmıştır. Sondaj verilerinden elde edilen kaya birimlerinin derinlikle değişimi de Şekil 2a'da verilmiştir. İnceleme alanındaki kaya birimler (Andezit, Bazalt) bazı bölgelerde alüvyon örtüsü altında farklı derinliklerde bulunurken, bazı bölgelerde ise yüzeyden itibaren yer almaktadır. Çalışma alanı genelinde yüzeyden 15-20 m sonra kaya birimlerinin yoğun olarak yer aldığı söylenebilir (Şekil 2). Kaya seviyesi değişimlerinde bölgesel jeoloji, çevredeki volkanlardan farklı zamanlarda farklı seviyelerde lav akıntıları ve bölgenin tektonik koşulları etkili olmuştur.

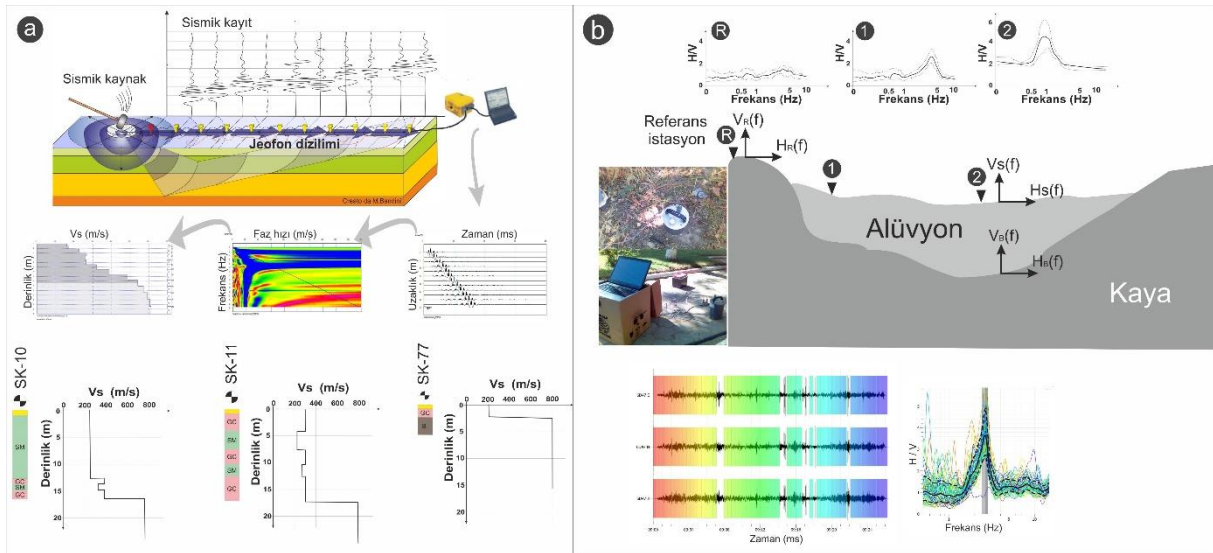
3.1. Mikrotremor Ölçümleri ve Değerlendirmeler

Çalışma alanında bölgenin baskın periyot ve büyütme değerlerinin belirlenmesi amacıyla 66 noktada mikrotremor ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde Güralp CMG-6TD geniş bant hız ölçer sismometre cihazı ve ekipmanları kullanılmıştır. Mikrotremor verilerinin değerlendirilmesinde bölgede hem yatay bileşenlerin düşey bileşene spektral oranı yöntemi (Nakamura, HVSR, tek istasyon mikrotremor) hem de spektral oranlar (referans istasyon) yöntemi kullanılmıştır (Şekil 3b).

Mikrotremor kayıtları, 100 Hz örnekleme aralığı ile 30 dakikalık kayıt süresi boyunca gerçekleştirilmiştir. Veri işleme, ilk aşamada mikrotremor verilerinin trend etkisi giderilmiş, ardından 0.01-20 Hz frekans aralığında bant geçişli Butterworth süzgeci uygulanmıştır. Böylelikle bu frekans aralığının dışındaki veriler kayıttan atılmıştır. 25-30 sn'lik pencereler seçilerek %5 oranda törpüleme (cosinüs taper) uygulanmıştır. Pencere uzunluğu SESAME [15] kriterlerine göre seçilmiştir. Elde edilen pencerelere Fourier dönüşümü uygulanarak her bir bileşene ait genlik spektrumları elde edilmiştir. Sonuç olarak yatay bileşenlerin düşey bileşene oranı hesaplanarak H/V spektral oranları elde edilmiştir. Spektral oran (referans istasyon) yönteminde ise, alüvyal sahalardaki veriler referans istasyonunda elde edilen verilerle oranlanarak HVSR spektrumları ve büyütme değerleri belirlenmiştir (Şekil 3b). Nakamura yöntemine göre büyütme değerlerinin elde edilmesindeki literatür tartışmaları gözetilerek büyütme değerleri için Spektral oran (referans istasyon) yöntemi sonuçları kullanılmıştır. Çevresel gürültü koşullarının veri kalitesine olumsuz etkilerinden dolayı ölçümler gece veya günün erken saatlerinde yapılmıştır. Veri işleme açık kaynaklı Geopsy yazılım paketleri kullanılmıştır [27]. Elde edilen herbir ölçüm noktası için baskın frekans/periyot değeri ve bu değere karşılık gelen genlik (büyütme) değerleri kullanılarak bölge için dağılım haritaları üretilmiştir (Şekil 4a-b).



Şekil 2. Sondaj verilerinden (a) ve Vs hızlarından (b) elde edilen kaya birimlerin derinlikle değişimleri.



Şekil 3. MASW verilerinin değerlendirme aşamaları ve 1-Boyutlu Vs hız modelleri (a), mikrotremor ölçümleri ve H/V spektrumu.

Çalışma alanı için elde edilen baskın periyot değerleri incelendiğinde, HVSR pik periyot değerlerinin 0.1 ile 0.52 saniye arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 4a). Çalışma alanının batı ve kuzey kesimlerinde göreceli olarak düşük periyot değerleri (0.1-0.2 s) elde edilmiştir. Bu alanlar

volkanik kaya birimlerin yer aldığı bölgelerdir ve elde edilen sonuçlarla uyumludur. Alanın merkez ve güney kesimlerinde ise göreceli olarak daha yüksek periyot (0.3-0.5 s) değerleri elde edilmiştir (Şekil 4a). Bu bölgelerdeki yüksek pik periyot değerleri, kalın ve zayıf zemin tabakalarının varlığına işaret eder. Çalışma alanındaki periyot değerleri alüvyon kalınlığına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Bölgede yapılan sondaj verileri de alüvyon birimlerin farklı kalınlıklara sahip olduğunu göstermektedir ve elde edilen periyot sonuçlarıyla uyumludur. HVSR pik periyot değerinin jeolojik birimin sıklığı/sağlamlığı ile ters orantılı olduğu söylenebilir. Bölgesel tektonik yapılar, morfoloji ve jeolojik durum incelendiğinde bu sonuçların bölgedeki jeolojik yapı ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Mikrotremor yönteminin zeminin baskın pik periyot/frekansını tahmin etmede güvenilirliğini kanıtlamış olsa da, büyütme faktörünün belirlenmesi ile ilgili literatürde tartışmalar bulunmaktadır [28, 29]. Bu nedenle çalışma alanında Spektral oran (referans istasyon) yöntemi uygulanarak alüvyon birimlerde alınan ölçümler, kayada ölçülen referans istasyona oranlanarak büyütme değerleri elde edilmiştir. Şekil 4b'de verilen büyütme haritası incelendiğinde yerleşim alanının bulunduğu merkez kesimlerde, alanın güney ve doğu kesimlerinde nispeten yüksek büyütme değerleri (2-2.8) elde edilmiştir. Alanın kuzey ve batı kesimlerinde ise büyütme değerlerinin azaldığı görülmektedir (1.5-2). Zemin büyütmesi alüvyon zeminlerin özellikleri ve ortamın jeolojik koşullarıyla doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle jeofizik uygulamalarla belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Elde edilen zemin büyütme ve periyot/frekans değerleri ilgili alanlarda yapılacak yapıların tasarımı, olası depremlerde rezonansa girip girmemelerinin değerlendirilmesi ve yapı-zemin ilişkileri açısından önemli bilgiler içermektedirler.

Yapı-zemin etkileşimi açısından önemli bir diğer parametre ise *Sismik Zayıflık İndisi* (K_g)'dir. Sismik zayıflık indisi (K_g), zemin dinamik özelliklerine bağlı olarak değişen bir parametredir. Bu parametre ile bir alanın kuvvetli yer hareketine karşı dayanıklı veya zayıf kalma durumunun noktasal olarak değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Periyot ve büyütme değerleriyle ilişkili olan bu parametre gerek zemin gerekse yapı için hesaplanabilmektedir [30, 8, 4, 5].

$$K_g = \frac{A^2}{f} \quad (1)$$

(1) denklemi sismik zayıflık indisi olarak adlandırılır. Burada, f zeminin baskın titreşim frekansı, A ise zemin tabakasının sismik genlik büyütmesidir.

Çalışma alanı için hesaplanan K_g haritası incelendiğinde, sismik zayıflık indisi değerlerinin 0.1 ile 3.55 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 4c). Alanın kuzey ve batı kesimlerinde göreceli olarak düşük K_g (0.1-0.2) değerleri elde edilmiştir. Bu alanlar volkanik birimlerin yer aldığı bölgelerdir ve elde edilen sonuçlarla uyumludur. Alanın merkez ve güney kesimlerinde ise göreceli olarak daha yüksek K_g (2-3.5) değerleri elde edilmiştir (Şekil 4c). Bu bölgeler alüvyon birimlerin bulunduğu kesimlerdir. Çaldıran fayının ana segmentinin olduğu kesimlerde de düşük K_g değerleri elde edilmiştir. Bu bölge volkanik birimlerin yoğun olduğu kesimdedir. Teorik anlamda faya yaklaştıkça sismik zayıflık indisinin artması beklenir. Ancak çalışma alanının bu kesimlerinin sağlam kaya niteliği elde edilen periyot ve dolayısıyla K_g indisi değerlerinin de düşük elde edilmesine neden olmuştur. Bu bulgu faya olan uzaklık, zemin türü, fay tipi gibi parametrelerin zayıflık indisi hesaplamalarında göz ardı edilmemesi gerektiğinin bir göstergesidir.

Çalışma alanında yapı yoğunluğunun olduğu merkez bölgelerde sismik zayıflık indisinin yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4c). Bölgenin deprem potansiyeli ve 1976 Çaldıran ($M_s=7.3$) depremi gibi büyük deprem üretebilme kapasitesi değerlendirildiğinde olası büyük bir depremde yapıların hasar durumlarının zayıflık indisi ile ilişkili olarak artabileceği ön görülmüştür. Bu kesimlerde özellikle yapı stoğu detaylı olarak değerlendirilmeli ve yapı-zemin-hasar ilişkisi gözetilerek planlamalar yapılmalıdır. Gerek zemin gerekse yapı zayıflık indisi değeri arttıkça hasar görme derecesi de artacaktır. Bunun daha doğru olarak ortaya konulabilmesi için zemin için elde edilen bu sismik zayıflık indisinin yanı sıra yapılar içinde zayıflık indislerinin belirlenmesi gerekmektedir.

3.2. MASW Ölçümleri ve Değerlendirilmesi

Vs hızı, zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışının belirlenmesinde kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle çalışma alanının hız kesitinin derinlikle değişimini belirlemek son derece önemlidir. Jeolojik birimlerin dinamik yükler altındaki davranışlarını belirlemek için yüksek çözünürlük ve yüksek araştırma derinliği nedeniyle mühendislik çalışmalarında geleneksel sismik yöntemler (kırılma) ve yüzey dalgası yöntemleri kullanılmaktadır. Yerleşim alanlarında düşük sinyal/gürültü oranı, serim uzunluklarının kısıtlı olması, enerji kaynağı kısıtı ve buna bağlı inceleme derinliğindeki sınırlılık gibi nedenlerden dolayı düşük frekanslarda uzun dalga boyları ile seyahat eden yüzey dalgalarının kullanılması avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda, veri toplama ve işleme aşamaları daha hızlı ve kolaydır [10, 31]. Vs hızını belirlemek için aktif kaynaklı (SASW, MASW) ve pasif kaynaklı (ReMi, SPAC, mikrotremor) yüzey dalgası yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde Vs hızları belirlenirken yüzey dalgalarının dispersiyon özelliğinden yararlanır [10]. Bu çalışmada, aktif kaynaklı yöntem olan Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi Yöntemi (MASW) kullanılarak, Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisi elde edilmiştir. Dispersiyon eğrilerinin ters çözümü ile kayma dalgası hızları derinliğe bağlı olarak belirlenmiştir. MASW yöntemi, saha araştırmaları ve mühendislik jeofiziği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [3, 10, 12, 13, 16, 17, 31-38].

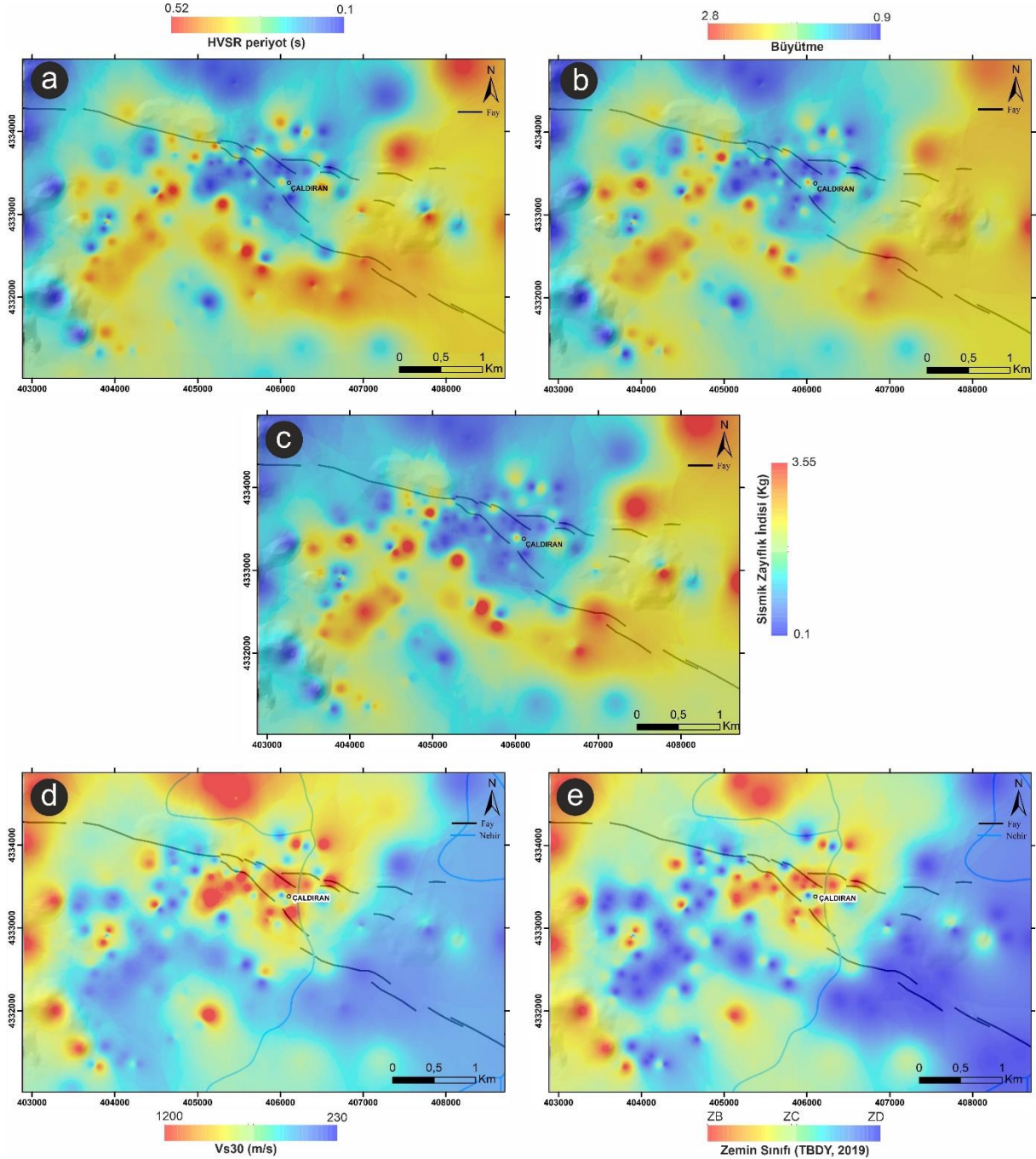
Bu çalışmada, 8 kg balyoz darbe kaynağı, Doremi marka Sara model 12 kanallı sismik sismograf, 3-5 m jeofon aralığı ve düşük frekanslı (4.5 Hz) düşey jeofonlar kullanılarak MASW yöntemi uygulamaları yapılmıştır (Şekil 3a). MASW verileri 0.5 ms örnekleme aralığı ve 1 sn kayıt uzunluğu ile elde edilmiştir. MASW ölçümleri 56 noktada sadece MASW, 39 noktada MASW ve kırılma olmak üzere toplam 95 lokasyonda yapılmıştır (Şekil 1b). Elde edilen veriler Seisimager yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir [39].

MASW yöntemi veri analizi üç adımda gerçekleştirilir: arazide ölçülerin alınması, dispersiyon analizi ve ters çözüm işlemi ile ortamın hız değerlerinin elde edilmesi (Şekil 3a). Dispersiyon eğrisinin belirlenmesinde, faz kayması, τ -p dönüşümü ve frekans-dalga sayısı (f-k) veya uzaysal otokorelasyon (SPAC) gibi birçok sayısal yöntem geliştirilmiştir [10, 14, 33].

Çalışma alanında gerçekleştirilen yüzey dalgası ölçümleri sonucu elde edilen hız verileri kullanılarak oluşturulan kayma dalga hızının (Vs) derinlikle değişimleri Şekil 2b'de verilmiştir. Elde edilen sonuçların Şekil 2a'da verilen sondaj verilerinden elde edilen jeolojik birimlerin derinlikle değişimleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Elde edilen yüksek hızların temsil ettiği volkanik birimler ($V_s > 760$ m/s), çalışma alanında yüzeyden itibaren farklı derinliklerde tespit edilmiştir. Bölgede özellikle alanın merkez kesimlerinde alüvyon birimin kalınlığı değişkenlik göstermektedir. 20'inci metrelerden sonra alanın genelinde yüksek hızlar hakim olmaktadır.

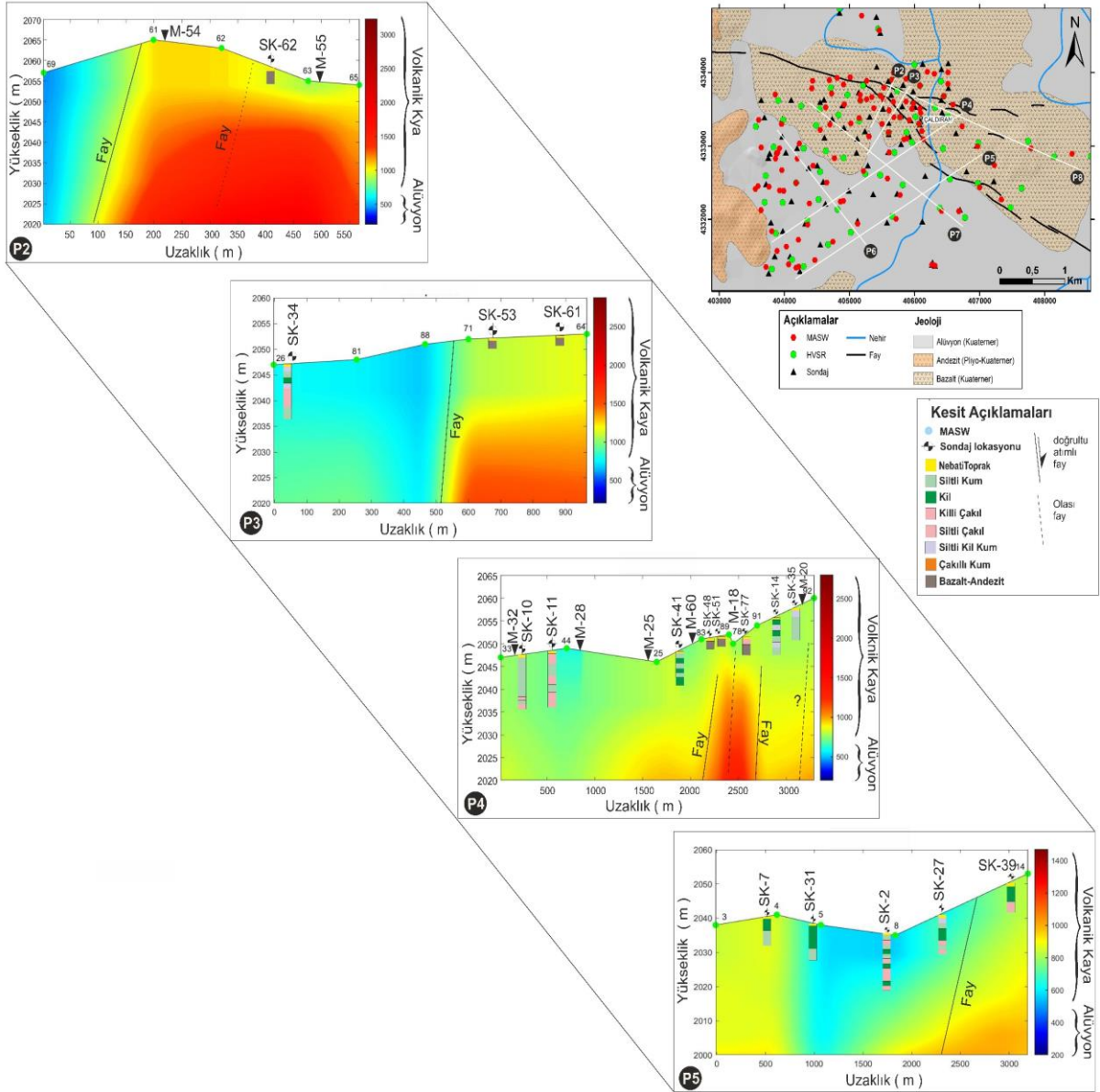
Vs30, yüzeyden itibaren ilk 30 m derinlikteki ortalama Vs hızı, zeminin dinamik analizi, deprem tehlike değerlendirme çalışmaları, mühendislik ve jeoteknik tasarım parametrelerinin hesaplanması gibi pek çok araştırmada kullanılan önemli bir parametredir. Bu çalışmada elde edilen Vs30 dağılım haritası ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [40] kriteri kullanılarak oluşturulan zemin sınıfı haritası Şekil 4e'de verilmiştir. Çaldıran yerleşim alanı ve çevresinde Vs30 değerleri alüvyal birimlerde 230-350 m/s arasında değişmektedir (Şekil 4d). Volkanik kaya birimleri yer aldığı kuzey ve batı kesimlerde yüksek hız değerleri, özellikle yapılaşmanın yoğun olduğu alanlarında ise düşük hız değerleri elde edilmiştir. Olası bir büyük depremde düşük hızlı bu alanların hasar seviyesini arttırıcı etkileri olabilir. Çaldıran bölgesinde alüvyal birimler genel olarak ZC-ZD, volkanik birimler ise ZB zemin sınıfı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 4e).

Çalışma alanında gerçekleştirilen yüzey dalgası ölçümleri sonucu elde edilen veriler kullanılarak iki boyutlu (2B) derinlik Vs hız kesitleri oluşturulmuştur (Şekil 5). Farklı doğrultular boyunca oluşturulan kesitlerde yüksek hızlarla temsil edilen volkanik birimler ($V_s > 700$ m/s) çalışma alanında yüzeyden itibaren farklı derinliklerde tespit edilmiştir. Alüvyon birimin kalınlığı alan içerisinde değişkenlik göstermektedir, özellikle alanın orta kesimlerinde derin alüvyon bölgeleri belirlenmiştir. Çalışma bölgesi genelinde 15-20 metreden sonra yüksek hız değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4. Çalışma alanında elde edilen verilerinden hazırlanan dağılım haritaları; basınç periyot (a), büyütme (b), sismik zayıflık indisi- K_g (c), V_{s30} (d), yerel zemin sınıfı (e).

P2 profili olarak adlandırılan kesit kuzeydoğu (KD)-güneybatı (GB) yönünde oluşturulmuştur (Şekil 5). Kesitte zemin-kaya ayrımı net olarak görülmektedir. Profil üzerinde yer alan jeoteknik sondajdan elde edilen jeolojik birimler kesit ile uyumludur. Çaldıran fayı, profildeki hız değişimlerine göre işaretlenmiştir. Profilde genellikle yüksek hız değerleri hakimdir ve bölgenin genel jeolojik yapısı ile son derece uyumludur. P3 profili de KD-GB yönünde Çaldıran fayını kesecek şekilde oluşturulmuştur (Şekil 5). Kesitlerde Çaldıran fayı net olarak işaretlenmiştir. P4 ve P5 profilleri, KD-GB doğrultusunda Çaldıran havzasını baştan sona temsil etmek ve Çaldıran fayını belirlemek için oluşturulmuştur (Şekil 5). Her iki profilde havzadaki alüvyon ve kaya birimlerin derinlikle değişimi yanal ve düşey doğrultuda ortaya konmuştur. Faya ilişkin değişimler de profillerde görülmüştür. Özellikle havza ortasındaki göreceli olarak kalın alüvyon yapı P5 ve P6 profillerinde net olarak görülmektedir. Bu kesitlerde de görüldüğü gibi havzadaki yeraltı jeolojik yapısı bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir.

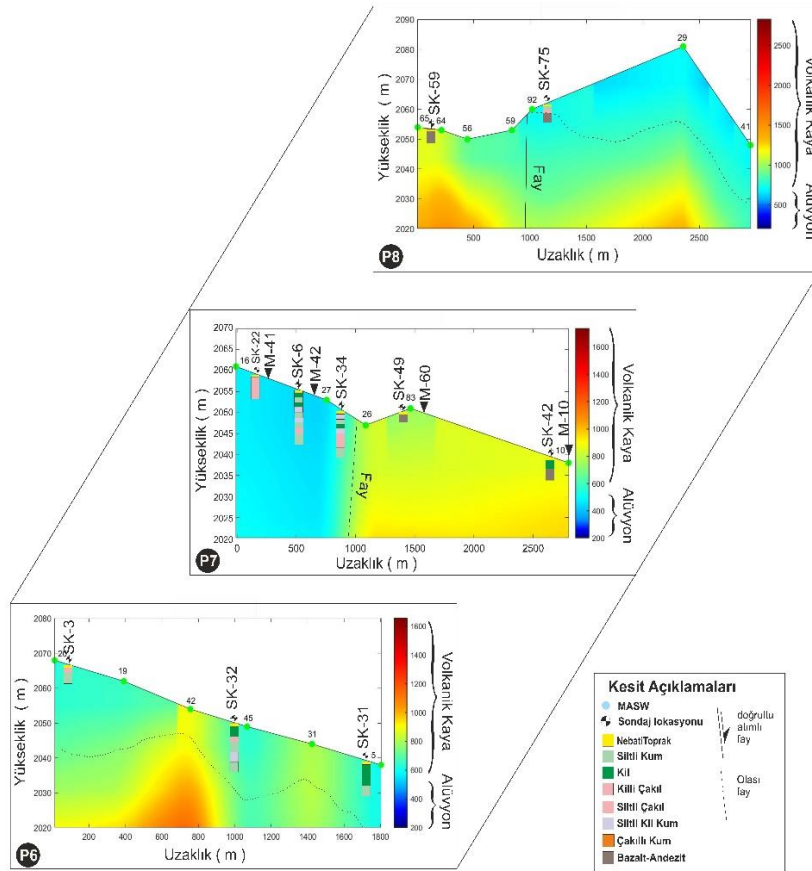


Şekil 5. Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultulu profillerin Vs hız verilerinin derinliğe bağlı değişimleri (Kesitlerde yüksek hız değerleri (>700 m/s) volkanik kökenli Bazalt-Andezit birimleri, mavi tonlardaki düşük hız değerleri (<400 m/s) ise alandaki alüvyal birimleri temsil etmektedir).

Bu durumun çalışma alanında farklı zamanlarda meydana gelen volkanik etkinliklerle oluşan jeolojik ve morfolojik değişimlerle ilişkili olarak şekillendiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Bu veriler alandaki sondaj verileri ile uyumluluk sergilemektedir.

P6 profili olarak adlandırılan kesit kuzeybatı (KB)-güneydoğu (GD) yönünde oluşturulmuştur (Şekil 6). Profilde, genellikle düşük hız değerleri ile temsil edilen farklı derinlik seviyesindeki alüvyon birimlerinin değişimi belirlenmiştir. Bu değişim bölgedeki volkanik birimlerle örtü niteliğindeki farklı derinlik ve kalınlıktaki alüvyon birimlerinin ilişkisini gösterir niteliktedir. P6 profiline göre havzada 20-30 m kalınlıkta alüvyon olduğu söylenebilir, buda jeolojik sondajlardan oluşturulan kat haritası (Şekil 2a) ve Vs hızı kat haritası (Şekil 2b) ile uyumludur. P7 ve P8 profili, KB-GD yönünde P6 profiline paralel oluşturulmuştur (Şekil 6). P7 profilinin başlangıcında alüvyal birimleri temsil eden düşük hızlar hakim iken, kesit sonunda nispeten daha yüksek hızlara sahip kaya birimleri gözlenmektedir. Kesit, çalışma alanının güneybatı kesimlerinde kaya birimlerinin daha sık olduğunu göstermektedir. P8 profilinde farklı derinliklerde alüvyal birimleri temsil eden düşük hızlar görülmektedir. Kesitin orta kesimlerinde ise topoğrafik değişimle ilişkili olarak alüvyon kalınlığının daha fazla olduğu

gözlenmiştir. Çaldıran fayı profildeki hız değişimlerine göre işaretlenmiştir. Oluşturulan profillerden elde edilen sonuçların jeolojik yapı ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultulu profillerin Vs hız verilerinin derinliğe bağlı değişimleri.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmanın temel amacı, büyük ve yıkıcı deprem üretme potansiyeline sahip Çaldıran Fay zone etki alanındaki Çaldıran yerleşim alanının yanal ve düşey doğrultudaki mühendislik özelliklerinin değişimlerini yüzey dalgası yöntemleri ile incelemektir. Bu amaç doğrultusunda çalışma alanında elde edilen veriler kullanılarak baskın periyot, büyütme, sismik zayıflık indisi (K_g), ilk 30 m'deki ortalama Vs hızını temsil eden Vs30 ve zemin sınıfı haritaları oluşturulmuştur. Alandaki kaya ve alüvyon birimlerin değişimlerini ortaya koymak için hem kat haritaları hemde farklı yönlerde derinlik kesitleri oluşturulmuştur. Elde edilen Vs hız profilleri, saha karakterizasyonunun tutarlılığını değerlendirmek için sondaj verileri ve HVSr microtremor ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çalışma alanında alüvyon birimlerde Vs30 değerleri 230 ile 350 m/s arasında değişmektedir. Volkanik kaya birimlerinin bulunduğu bölgenin kuzey ve batı kesimlerinde Vs30 değerleri (>700 m/s) daha yüksek elde edilmiştir. Vs30 değerlerine kullanılarak TBDY'ne göre çalışma alanlarındaki alüvyon birimler genel olarak ZC-ZD, volkanik birimler ise ZB zemin sınıfı olarak haritalanmıştır. Çaldıran yerleşim alanı ve çevresinde baskın periyot değerlerinin 0.1 ile 0.52 saniye arasında, büyütme değerlerinin 1 ile 2.8 arasında ve sismik zayıflık indisi değerlerinin 0.1 ile 3.55 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bölgenin kuzey ve batı kesimlerinde nispeten düşük periyot (0.1-0.2 s), büyütme (< 2) ve K_g (0.1-0.2) değerleri elde edilmiştir. Bu alanlar volkanik kaya birimlerin yüzeyden itibaren yer aldığı kesimlerdir ve elde edilen sonuçlarla uyumludur. Bölgenin güney kesimleri ve şehir merkezindeki bazı lokasyonlar nispeten daha yüksek pik periyot (0.3-0.5 s), büyütme (>2) ve K_g (2-3.5) değerlerine sahiptir. Bu alanlardaki yüksek periyot değerleri, kalın-gevşek alüvyon birimlerin varlığına ve bazı kesimlerde de ayrılmış volkanik birimlerin bulunduğunu göstermektedir. K_g ve periyot değerlerinin ölçülen jeolojik birimin sıklığı/sağlamlığı ile ters orantılı olduğu söylenebilir. Çaldıran fayının ana segmenti ve çevresinde de düşük K_g değerleri elde edilmiştir. Volkanik kaya birimler bu bölgelerde

yoğun olarak yer almaktadır. Teorik olarak, faya yaklaştıkça K_g değerlerinin ve hasar oranının artması beklenir. Ancak inceleme alanının bu kısımları volkanik kaya birimlerden oluştuğu için düşük büyütme ve K_g değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, K_g hesaplamaları için faya uzaklık, zemin sınıfı, fay tipi gibi parametrelerin son derece önemli ve etkili olduğunu göstermektedir.

Çalışma kapsamında yapılan jeofizik ölçümlerin veri işlemesi sonucunda elde edilen iki boyutlu derinlik kesitleri ile Çaldıran yerleşim alanı ve çevresinin yatay ve düşey yönde mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen kesitlerde alüvyon kalınlıklarının değişkenliği, zemin-kaya ayrımı ve bölgedeki en etkili sismik kaynak olan Çaldıran fayı ve segmentleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların jeolojik yapı ile uyumlu olduğu görülmüştür. İnceleme alanında kaya birimler (Andezit-Bazalt) yer yer yüzeyden itibaren yer yerde alüvyon örtü altında farklı derinliklerde yer almaktadır. Çevrede yer alan volkanlardan kaynaklanan farklı zamanlarda farklı seviyelerde lav akışları, bölgenin jeolojik ve tektonik koşulları bu kaya seviyesi değişimlerinde etkili olmuştur.

Çalışma alanında yerleşim ve yapı stoğunun yoğun olarak bulunduğu kesimlerde periyot, büyütme ve sismik zayıflık indisinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çaldıran yerleşim alanının bu kesimlerinde çok katlı yapılaşma artma eğilimindedir. Yine aynı alanlardaki yüksek periyot ve büyütme değerleride göz önünde tutularak çok katlı yapıların rezonansa girme olasılığı söz konusu olabilir. Bu olasılık çalışma alanı için büyük depremlerde hasar oranlarını artırıcı bir etken olarak değerlendirilmiştir. Bölgenin depremselliği ve 1976 Çaldıran ($M_s=7.5$, $M_w=7.1$) depremi gibi yıkıcı depremler üretme kapasitesi göz önüne alındığında, olası büyük bir depremde yapıların hasar oranının K_g değerine göre artabileceği öngörülmüştür. Olası hasar değerlendirmesini daha doğru bir şekilde ortaya koyabilmek için hem zemin hem de yapılar için sismik zayıflık indisinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye olan katkıları eşit düzeydedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] 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.
- [2] 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. <https://doi.org/10.1007/s11600-017-0103-0>.
- [3] 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.
- [4] Akkaya İ. 2020a. Availability of seismic vulnerability index (K_g) in the assessment of building damage in Van, Eastern Turkey. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19 (1): 189-204.
- [5] Akkaya İ. 2020b. Jeofizik verilerinden elde edilen sismik zayıflık indisinin yapısal hasar değerlendirmesinde kullanılabilirliği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (4): 1711-1723.
- [6] Alkan A. 2021. Çaldıran (Van) Yerleşim Alanı Zemin Özelliklerinin Yüzey Dalgası Yöntemleri ile İncelenmesi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi*, Van, 1-111.

- [7] Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of sub-surface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 30: 25-33.
- [8] Nakamura Y. 2000. Clear Identification of the Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications. In: 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand (CD-ROM) : 2656
- [9] Lermo J., Chavez-Garcia F.J. 1994. Are microtremors useful in site response evaluation?. Bulletin of the Seismological Society of America, 84: 1350-1364.
- [10] Park C.B., Miller R.D., Xia J. 1999. Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, 64: 800-808.
- [11] Bard P. 1999. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation. The Effects of Surface Geology on Seismic Motion. 3: 1251-1279.
- [12] Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., 2000. Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes. The Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, 1295-1298.
- [13] Louie J.N. 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 91 (2): 347-364.
- [14] Okada H. 2003. The microtremor survey method. Geophysical Monograph, No. 12, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- [15] SESAME. 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation SESAME European Research Project P12-Deliverable. D23.12 [ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/Software/Sesame/Userguidelines/Sesame-HV-UserGuide lines.doc](ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/Software/Sesame/Userguidelines/Sesame-HV-UserGuide%20lines.doc)
- [16] Pamuk E., Akgün M., Özdağ Ö.C., Gönenç T. 2017. 2D soil and engineering-seismic bedrock modeling of eastern part of Izmir inner bay/Turkey. Journal of Applied Geophysics, 137: 104-117.
- [17] Ólafsdóttir E.Á., Erlingsson S., Bessason B. 2018. Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils. Canadian Geotechnical Journal, 55 (2): 217-233.
- [18] Şaroğlu F., Yılmaz Y. 1986. Doğu Anadolu'da Neotektonik Dönemdeki Jeolojik Evrim ve Havza Modelleri, MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- [19] Erkanol D., Avşar M., Aslan Ö., Burçak M., Kurtman T., Şener S., Çakır Y., Kocaman H. 1991. Çaldıran-Muradiye (Van)-Doğubayazıt (Ağrı) İran sınırı Arasında Kalan Alanın Genel Jeolojisi. MTA Rap. No: 9733, Ankara.
- [20] Koçyiğit A., Yılmaz 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.
- [21] Koçyiğit A. 2013. New field and seismic data about the intraplate strike-slip deformation in Van region, East Anatolian plateau, Turkey. Journal of Asian Earth Sciences, 62: 586-605.
- [22] Selçuk A.S., Erturaç M.K., Nomade S. 2016. Geology of the Çaldıran Fault, Eastern Turkey: Age, slip rate and implications on the characteristic slip behaviour. Tectonophysics, 680: 155-173.
- [23] Şengül 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 (3): 193-208.
- [24] Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş., Şaroğlu F. 2013. 1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi, Ankara, Türkiye.
- [25] KOERI. 2021. Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute Regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center (KOERI) website. Available: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/>
- [26] Arpat E., Şaroğlu F., İz H.B. 1977. Çaldıran depremi. Yeryuvarı ve İnsan, 2: 29-41.
- [27] GEOPSY. 1997. Geophysical Signal Database for Noise Array Processing. www.geopsy.org. Erişim tarihi: Şubat 2021.
- [28] Bard P. 1998. Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, eds. K. Irikura, K. Kudo, H.

- Okada and T. Sasatani (Balkema, Rotterdam), Vol III, Yokohama, Japan, 1251–1279, ISBN:9058090302.
- [29] Asten W.M. 2006. On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods. *Geophysics*, 71 (6): V153-V162.
- [30] Nakamura Y. 1997. Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor. World Congress on Railway Research, Florence.
- [31] Xia J., Miller R.D., Park C.B., Hunter J.A., Harris J.B., Ivanov J. 2002. Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements. *Soil Dyn Earthq Eng*, 22: 181-190
- [32] Miller R.D., Xia J., Park C.B., Ivanov J. 1999. Using MASW to map bedrock in Olathe, Kansas. *Exp Abstrs Soc Explor Geophys*, 433-436. doi:10.1190/1.1821045
- [33] Foti S. 2000. Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves, Ph.D. Diss., Politecnico di Torino, 1-230, Milano.
- [34] Park C.B., Miller R.D. 2005. Seismic Characterization of Wind Turbine Sites in Kansas by the MASW Method, Kansas Geological Survey Open-file Report, 2005-23.
- [35] Dikmen Ü., Arısoy M.Ö., Akkaya İ. 2010a. Offset and linear spread geometry in the MASW method. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7: 211-222.
- [36] Dikmen Ü., Başokur A.T., Akkaya İ., Arısoy M.Ö. 2010b. Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi yönteminde uygun atış mesafesinin seçimi. *Yerbilimleri*, 31 (1): 23-32.
- [37] Tün M., Pekkan E., Özel O., Güney Y. 2016. An investigation into the bedrock depth in the Eskisehir Quaternary Basin (Turkey) using the microtremor method. *Geophys. J. Int.*, 207: 589-607.
- [38] Silahtar A., Budakoğlu E., Horasan G., Yıldırım E., Küyük H.S., Yavuz E., Çaka D. 2016. Investigation of site properties in Adapazarı, Turkey, using microtremors and surface waves. *Environ Earth Sci*, 75: 1354. DOI 10.1007/s12665-016-6151-y
- [39] SeisImager/SW, 2005. Manual V 1.4 Windows™ software for analysis of surface waves (Pickwin v. 3.14; WaveEq v. 2.07), including explanation of Geometrics Seismodule Controller Software Surface Wave Data Acquisition Wizards. <ftp://geom.geometrics.com/pub/seismic/SeisImager>
- [40] TBDY, 2019. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2018, Sayı: 30364.