Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Part:C, Tasarım Ve Teknoloji
GU J Sci Part:C
4(4):331-341 (2016)

Küçük ve Orta Büyüklükte Sismik Aktivite Gösteren Bölgelerdeki Yerel Zemin Koşullarının Belirlenmesi

Mustafa Kerem KOÇKAR[1, ♠]

[1]*Gazi Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Merkezi, Ankara/TÜRKİYE*

Başvuru: 19/10/2016 *Kabul: 25/11/2016*

ÖZ

Ankara ve çevresi gibi yüksek sismik aktivitenin tekrarlanma aralığının ve aletsel kayıt verilerinin az olduğu bölgelerde, sismik tehlike değerlendirmelerinin yapılması zordur. Bu sebeple orta ve küçük magnitüdlü deprem üretme potansiyeline sahip olan bu alanlarda yerel zemin koşullarına bağlı olarak yapılacak değerlendirmeler büyük önem kazanmaktadır. Günümüzde özellikle yeraltı sediman ve havza koşullarının karakteristiklerinin belirlenmesi için nispeten kolay ve ekonomik bir yöntem olarak kabul edilen mikrotremor yöntemi, yerel zemin koşullarının güvenilir bir şekilde değerlendirmesinde sıklıkla kullanılan bir uygulamadır. Bu çalışma ile Ankara'nın batısındaki Pliyo-Kuvaterner zeminlere ait havza sedimanlarının yer tepkileri mikrotremor ölçümlerinin kısa-periyot gürültü kayıtları aracılığıyla incelenmiş ve buna bağlı olarak değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca yer etkilerinin sebeplerinin detaylı olarak araştırılması amacıyla, mikrotremor verileri çalışma alanında yapılmış olan sismik ölçümler ve jeoteknik sondaj çalışmalarından elde edilen dinamik zemin karakterizasyonu sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda litolojik birimin yaşının, zemin tabakalarının kalınlığı ile bu birimlerdeki zemin özelliklerinin ve tekdüze olmayan yeraltı yapısının yer etkilerini tetiklediği belirlenmiştir. Özellikle sediman kalınlıklarının, basen topoğrafyasının ve zayıf zemin karakterlerinin, mikrotremor yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar, bu bölgelerde yapılacak deprem tehlikesi değerlendirmelerinde önemli bir altlık teşkil edecektir. Buradan yola çıkılarak, Ankara ve çevresi gibi küçük ve orta büyüklükte sismik aktivite gösteren alanlardaki yerel zemin koşullarının yer sarsıntısı karakteristiğini nasıl ve ne ölçüde değiştirdiği üzerine değerlendirmeler yapılmış ve alınacak önlemler hakkında gerekli öneriler verilmiştir.

Anahtar kelimeler: *Yerel zemin koşulları, H/V mikrotremor yöntemi, iki boyutlu yer etkileri, sismik zemin karakterizasyonu, Ankara.*

The Determination of Local Site Conditions in Small and Medium Seismic Activity Regions

ABSTRACT

It is challenging to perform seismic hazard assessment in regions where recurrence period of high magnitude seismic activity is low and instrumental seismic records are scarce. Ankara and its vicinity presents an example for such a region for which the importance of assessments based on local site conditions increases where small and moderate magnitude earthquake generation potential exists. Microtremor method which is considered a relatively easy and economically striking method to identify subsurface sediment characteristics and basin conditions at large areas is frequently used in order to evaluate the local site effects reliably. In this study, the site response of the Plio-Quaternary basin sediments located to the west of Ankara was investigated via short-period noise recordings of microtremor measurements and relevant assessments were made. Furthermore, microtremor data has been compared with the seismic measurements and dynamic soil characterization results acquired from geotechnical borehole studies conducted in the region in order to investigate the reasons for site response in detail. As a result of this study, it was determined that the age of the lithological unit, the depth of the soil thickness along with their soil characteristics and the non-uniform subsurface conditions affects the site effect. It can be observed that especially sediment thicknesses, basin topography and weak soil characters are compatible with the results of the microtremor method. This study shall constitute an important basis for earthquake hazard assessments to be conducted for the region. Therefore, evaluations regarding how and in which scale the local soil conditions in Ankara and its vicinity (where small and moderate magnitude seismic activity is present) affect the ground shaking characteristic has been made, and necessary recommendations are presented.

Keywords: *Local soil condition, H/V microtremor method, 2D site effects, seismic site conditions, Ankara.*

♠*İletişim yazarı, e-mail: mkockar@gazi.edu.tr*

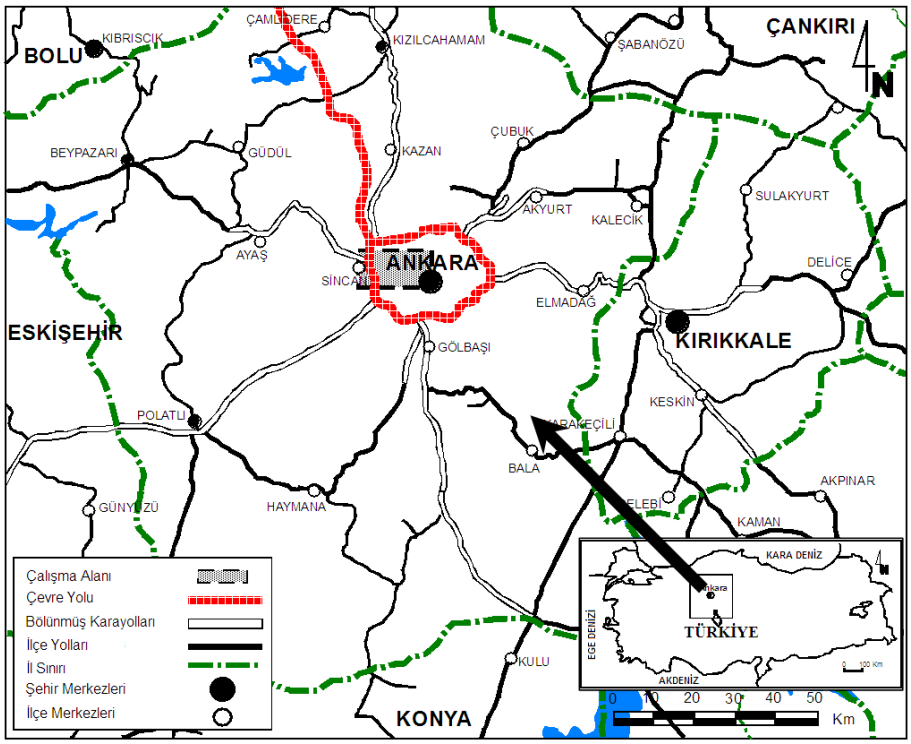
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda meydana gelen depremler, önemli miktarda zararların ve hayat kayıplarının yerel zemin koşullarının etkisi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir (örneğin, Michoacan Meksika 1985, Northridge 1994, Kobe 1995, Chi-Chi Tayvan 1999, Kocaeli ve Düzce 1999, Sichuan Çin 2008, Christchurch-Yeni Zellanda 2010, Van 2011). Depremlerle meydana gelen hasar ve can kayıplarına etki eden başka faktörlerde olmasına rağmen (yer hareketi karakteristiği, sıvılaşma ve yapısal eksiklikler, vb.), yerel zemin koşullarından dolayı oluşan yer hareketi büyütmeleri sismik hasarın artmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ankara, büyük fay sistemlerine nispeten uzak olmasına karşın (yaklaşık 75 - 100 km) deprem tehlikesi açısından güvenli olarak kabul edilmemesi gerektiği düşünülmektedir. Bu duruma benzer bir örnek olarak, Kocaeli Depremi (1999) esnasında deprem merkezi olan Gölcük-İzmit'e 90 km'den daha uzak olmasına karşın yer etkilerinden dolayı ciddi hasar gören Avcılar ve çevresi verilebilir. Bu nedenle, kuvvetli yer hareketlerinin sonrasında meydana gelen kayda değer zemin büyütme etkilerine sebep olan yerel zemin koşullarının etkisi deprem mühendisliği çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu bağlamda, her ne kadar büyük fay sistemlerine nispeten uzak bir noktada yer almasına karşın Ankara ve civarındaki pekişmemiş zayıf zeminlerin deprem esnasında nasıl bir davranış göstereceklerinin incelenmesi gerektiği düşünülmektedir. Buna ilave olarak, Marmara Bölgesi gibi yüksek deprem riski taşıyan alanlarda büyük depremlerin sıklık aralığı ve kurulmuş olan mevcut sismik ağlar göz önüne alındığında yer etkenlerini belirlenmesi açısından çok sayıda imkan bulunmaktadır. Ancak, Ankara'nın da içerisinde yer aldığı Orta Anadolu bölgesinde sismik aktivitenin tekrarlanma aralığı seyrek ve bu tür çalışmaları gerçekleştirecek sismik istasyon ağları yetersizdir [1]. Zemin koşullarının güvenilir bir şekilde belirlenmesi ve yer hareketlerinin kaydedilmesi için sismik ağ kurmak çok masraflı olabilir ve uzun zaman alabilir. Bunun yerine, yerel saha koşullarının tahmin edilmesi için ekonomik ve pratik bir uygulama olarak karşımıza çıkan ve ivme-ölçer akselerometrelerle yapılan mikrotremor ölçümleri ile ortam gürültüsünün kaydedilmesi sayesinde makul bir alternatif çözüm yaratılabilir. Yerel saha etkilerinin tahmin edilmesinde kullanılan mikrotremor ölçümlerinde H/V metodunun kullanılması ile yer hareketi tepkilerinin belirlenmesi için ortamın kısa-periyot gürültü kayıtlarının kullanılması çeşitli çalışmalarda başarılı sonuçlar vermiştir. Nakamura yöntemi [2] olarak da adlandırılan bu yöntem güvenilir bir yöntemdir [3, 4] ve özellikle kentsel alanlarda kaynak-yol (source-path) etkisi problemini çözmek amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemin özellikle zemin titreşim periyotlarının ve büyütmelerin tahmin edilmesinde güvenilir sonuçlar verdiği düşünülmekte ve H/V yöntemlerinin sismik bölgeleme çalışmaları için kullanışlı olduğu görülmektedir. Ancak çalışma alanında yer alan sediman karakterlerinin yeraltı heterojenliğinin eksiksiz olarak tanımlamak, elde edilecek verilerin güvenilir bir şekilde yorumlanması için büyük önem arz etmektedir [5, 6]. Ankara'nın batısındaki zeminlerin büyük kısmı basen dolgusu tipindeki Pliyo-Kuvaterner çökellerden oluşmaktadır. Bu pekişmemiş zeminlerin Ankara çevresinde yer alan büyük ölçekli Fay Sistemlerinden kaynaklanan yıkıcı depremler yaşadığında, zayıf zeminler üzerinde ciddi hasarlar meydana getirebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, Ankara baseni genelinde büyük bir alan kapsayan bu sedimanların basen (havza) dolgusu olma özelliklerinden dolayı yer hareketi büyütmeleri ve rezonans durumu ile ilişkili yerel zemin etkilerinin detaylı incelenmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

2. ÇALIŞMA ALANININ GENEL YERLEŞİM ÖZELLİKLERİ VE DEPREMSELLİK (GENERAL SETTING AND SEISMICITY OF THE STUDY AREA)

Yaklaşık 5 milyonluk nüfusa sahip Türkiye'nin başkenti Ankara, İç Anadolu'nun doğusu ile batısını ve kuzeyi ile güneyini bağlayan karayollarının kesişim noktasında yer almaktadır. Çalışma alanı Ankara baseninde, şehir merkezinin batısında ve Ankara Çayı boyunca doğu-batı yönünde ilerleyen ve yaklaşık DKD-BGB yönlü 25 ile 30 km uzunluğunda ve 10 ile 15 km genişliğindeki fayla sınırlı bir çöküntü havzasıdır. Çalışma alanı şehrin büyüme potansiyeli yüksek olduğu bir alanda yer almaktadır. Bu bölge çoğunlukla yoğun konut ile küçük ve büyük ölçekli sanayi tesislerinin bulunduğu bir alandadır (Şekil 1).

Ankara kent merkezi etrafında yer alan faylar sismik olarak aktiftir, ancak küçük ve orta ölçekli deprem üretme potansiyeline sahiptirler ($M \leq 6$). Ankara'ya 50 ile 75 km uzaklıkta meydana gelen bu sismik aktivitelere 6 Haziran 2000 Orta depremi ve artçı şokları (M_w = 6.0, M_w 5.4 ve M_b 4.6) [7], 31 Temmuz - 9 Ağustos 2005 Bala depremleri serisi (M_w = 5.2, 4.8 ve 4.7) [7] ve 12 - 27 Aralık 2007 Bala depremleri serisi (M_w = 5.7, 5.6 ve 5.2) [7] örnek olarak verilebilir. Bu depremler Ankara'yı etkileme potansiyeline sahip nispeten orta büyüklükte sismik aktivitelerdir. Ancak bölgesel ölçekte bakıldığında Ankara'nın, çevresinde yer alan ve özellikle de büyük ölçekli yıkıcı deprem ($M > 7.0$) üretme kapasitesine sahip fay sistemlerinden, örneğin Kuzey Anadolu Fay Sistemi (NAFS), Tuz Gölü Fay Zonu (TGFZ) ve Seyfe Fay Zonundan (SFZ) önemli ölçüde etkilenebilir. Bu fay sistemleri üzerinde gerçekleşmiş olan büyük depremlere örnek olarak KAFS üzerinde 26 Kasım 1943 Kastamonu depremi (M_L = 7.3), 1 Şubat 1944 Gerede depremi (M_L = 7.3) ve 13 Ağustos 1951 Çankırı depremi (M_L = 6.9) ve SFZ üzerinde 19 Mart 1938 Taşkovan-Akpınar depremi (M_L = 6.6) [7] verilebilir. Bu sebeple, bahsedilen bu Fay Sistemleri ve Fay Zonları üzerinde gerçekleşme olasılığı olan büyük sismik aktiviteler Ankara baseni ve çevresinde yer alan sedimanların yerel zemin karakteristiklerini önemli ölçüde etkileyebilir, ciddi hasar ve can kayıplarına neden olabilir.



Şekil 1. Ankara kent merkezinde yer alan çalışma alanının lokasyon haritası ((Location map of the study area situated the city center of Ankara)

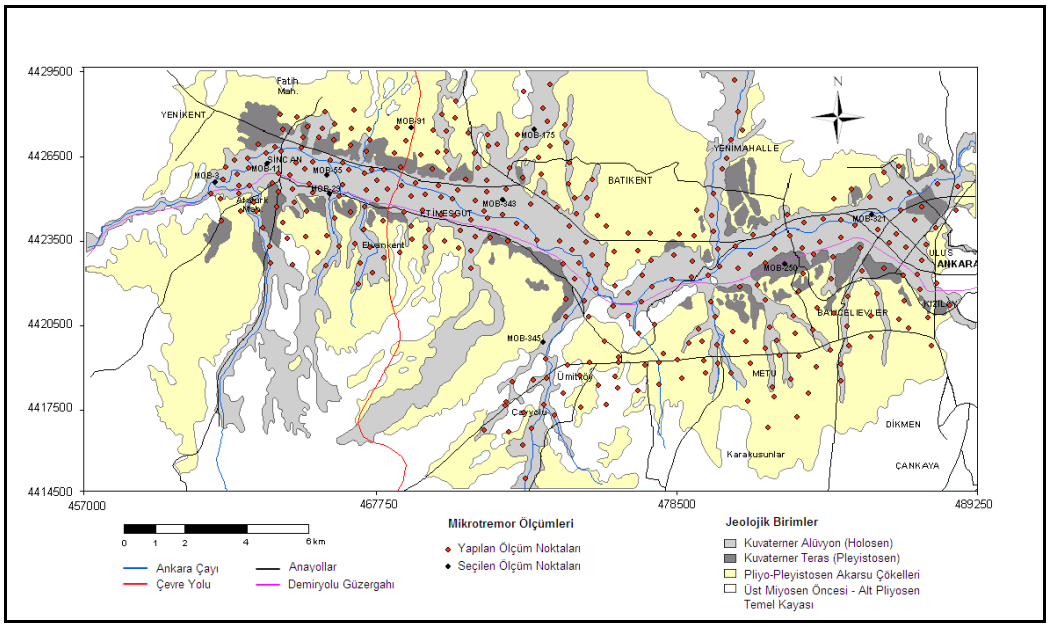
3. ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİSİ VE SEDİMAN KARAKTERİSTİKLERİ (GEOLOGY AND SEDIMENT CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREA)

Çalışma alanı için oluşturulan 1:25.000 ölçekli jeoloji haritası jeolojik birimlerini dört ana jeolojik birime ayırmaktadır: (1) Üst Miyosen öncesi - Alt Pliyosen temel kayası, (2) Üst Pliyosen - Pleyistosen akarsu çökelleri, (3) Kuvaterner teras çökelleri ve (4) Kuvaterner alüvyal çökelleri (Şekil 2). Bu çalışma ile literatürde "Ankara kili" olarak da bilinen ve yukarıda bahsedilen üç genç sedimanter birim üzerine yapılan çalışmalara odaklanılmıştır (Pliyo-Kuvaterner çökeller). Bu birimlerden Pliyo-Pleyistosen akarsu çökelleri karasal kökenli olup çalışma alanının fayla sınırlı baseni ve çevresinde çökelmiştir (Şekil 2). Bu birimin kalınlığı, bulundukları stratigrafik konuma göre birkaç metreden 200 m'ye kadar değişim göstermektedir [8]. Kuvaterner alüvyon ve teras sedimanları ise sel suları ile taşınmış ve fayla sınırlı Ankara baseni içerisinde yer alan Ankara Çayı'nın taşkın ovasında çökelmiştir. Kuvaterner çökeller basenin marjininde bulunan teras çökelleri (Üst Pleyistosen) ve basenin ekseninde akarsu taşkın ovasında bulunan alüvyon (Holosen) çökeller olarak ayırtlanmıştır. Kuvaterner alüvyon birimler nispeten kalın tabakalıdır ve güncel akarsu yatakları boyunca sel suları ile çökelmiştir (Şekil 2). Genellikle pekişmemiş zayıf ve diğer sediman birimlere nazaran nispeten daha homojen ve yumuşak çökellerdir. Yeraltı suyu seviyesi 2 ile 6 m arasında değişmektedir. Alüvyon sedimanların kalınlıkları genellikle 5 ile 30 m arasında değişmektedir [9].

4. ARAZİ ÖLÇÜMLERİ VE VERİ ANALİZİ

(FIELD MEASUREMENTS AND DATA ANAYSIS)

Mikrotremor ölçümleri, Ankara basenindeki yer etkilerini belirlemek amacı ile Pliyo-Kuvaterner sedimanlarda 352 noktada gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Bu ölçümlerden 207 (58.81%) adedi Kuvaterner (alüvyon ve teras) ve 132 (37.50%) adedi Pliyo-Pleyistosen akarsu çökelleri üzerindedir. Ayrıca 13 (3.69%) adet ölçüm de Pliyo-Kuvaterner zeminler için referans olması ve sayısal haritalarda ölçüm noktaları arasında mekansal interpolasyon işlemi sırasında birim geçişlerindeki hata payını azaltmak amacıyla temel kayada alınmıştır. Mikrotremor ölçümlerinde kullanılan yatay ve düşey bileşenler arasındaki spektral oranlar yöntemi (H/V), bölgenin hakim titreşim periyotlarını ve zemin büyütme oranlarını belirlemek için kullanılmıştır. Deneysel sonuçların doğruluğunu kontrol etmek ve zemin profiline dair daha güvenilir bilgiler elde etmek amacıyla Ankara baseninde gerçekleştirilen ivme-ölçer akselerometre ile alınan H/V mikrotremor ölçümleri çalışma alanında yapılan diğer zemin araştırması çalışmaları ile karşılaştırılarak güvenilirlikleri kontrol edilmiştir (örneğin, yerinde sismik ölçümler ile bazı kontrol noktalarında geniş-bant sismometre kullanılarak alınan H/V mikrotermor ölçümleri).

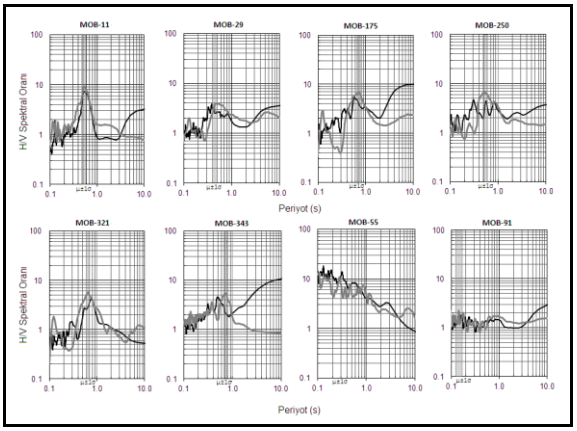


Şekil 2. Çalışma alanındaki temel jeolojik birimler ve mikrotremor ölçüm noktaları [8] ve [10]'den değiştirilerek alınmıştır (The major geologic units and microtremor measurement locations in the study area)

4.1. Mikrotremor Ölçüm Yöntemleri ve Verilerin Analiz edilmesi (Microtremor Measurement Methods and Data Analyses)

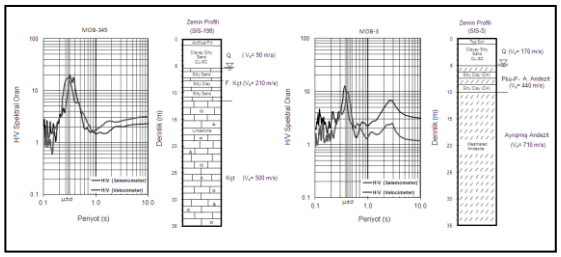
Mikrotremor arazi ekipmanı verilerin analiz edilmesi için 24-bit dijital kayıt birimi ile DATAMARK LS-8000 WD A/D tipi ölçüm cihazı (Hakusan Co. Ltd.) ve JEP-6A3 üç bileşenli ivme-ölçer akselerometreden (Akashi Co. Ltd.) oluşmaktadır. 1μg ve 1 mgal'e (cm/s/s) tekabül eden sensör ve LS-8000 WD sayısallaştırıcının çözünürlüğü, diğer ivme-ölçer sensörler ile karşılaştırıldığında H/V mikrotremor deneyi için olan ortam titreşim seviyelerini tespit etmek için yeterli olduğu söylenebilir (Kudo, kişisel görüşme, 2012). Ayrıca, çalışma alanında farklı zeminlerde temsili 10 kontrol noktasında (Şekil 2) Pliyo-Kuvaterner sedimanlar üzerinde 1 Hz'lik hız-ölçer sensörlü Guralp CMG-40TD geniş-bant sismometre ile birlikte 24-bit sayısallaştırıcı kullanılarak H/V kısa periyotlu gürültü ölçümleri de alınmıştır. Bu ölçümler ivme-ölçer akselerometre ile yapılan ölçümlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini test etmek amacıyla alınmıştır. İvme-ölçer sensörü ile elde edilen H/V spektrumlarıyla aynı lokasyondaki hız-ölçer sismometre sensörü ile yapılan kontrol ölçümleri karşılaştırıldığında, bu yöntemin zemin hakim titreşim periyotlarını ve büyütme oranlarını kestirmede nispeten tutarlı sonuçlar verdiği açıkça gözlemlenebilir (Şekil 3 ve 4).

H/V yöntemi, tek bir noktadaki ortam gürültüsünün yatay bileşeninin spektral oranının düşey bileşenine oranına dayanmaktadır [2]. Bu yöntemin amacı S-dalgalarının yumuşak sedimanlardan dolayı büyütme değerinin mikrotremor ölçümleri ile belirlenmesini amaçlamaktadır. Kaydedilen ortam gürültüsünün yatay ve düşey bileşenlerinin spektral oranının, bir deprem kaydındaki S-dalgalarının yüzey sedimanlardaki kaydının sediman katmanının en altındaki sediman-anakaya ara yüzündeki S-dalgalarına oranına eşdeğer olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3. Farklı sensörlerle analiz edilmiş H/V spektrumlarından örnekler (siyah çizgi ivme- ve gri çizgi hız-ölçer). Kuvaterner alüvyon zeminler MOB-11, -29, -175, -321, -343 ve -55 tarafından ve Kuvaterner teras ile Pliyo-Pleyistosen zeminler sırasıyla MOB-250 ve -91 tarafından temsil edilmektedir.

(Examples of analyzed H/V spectra at different sites (black line acceleration- and gray lines velocimeter-sensor). The Quaternary alluvium sites are represented by MOB-11, -29, -175, -321, -343 and -55, and the Quaternary terrace and Plio-Pleistocene sites are represented by MOB-250 and -91, respectively.)



Şekil 4. İnce gevşek alüvyon sediman tabakaları ile kaya birimleri arasındaki tekdüze olmayan yüzey topografyası konfigürasyonu ile ilişkili keskin empedans kontrastı (yüksek zemin büyütme oranları) örnekleri (MOB-345 ve MOB-3)

(The sharp impedance contrast between the thin layer of loose alluvial sediments and the rock units in relation to the non-uniform configuration of the surface topography, i.e., MOB-345 and MOB-3)

Saha etkilerinin belirlenmesinde kısa-periyotlu mikrotremorlerin kullanımı uzun yıllardır incelenmekte olan bir yöntemdir. Yapılan bu çalışmalarda mikrotermor ölçümlerinde yatay hareketin kısa-periyotlarda temelde kayma dalgalarından meydana geldiği ve yatay hareketleri spektrumunun sahadaki zeminin transfer fonksiyonunu yansıttığı varsayılmaktadır. Ayrıca zeminlerin rezonans frekansının doğrudan ölçülmesi yoluyla zayıf sedimanların baskın titreşim periyotlarının ve zemin büyütme seviyelerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu yaklaşım, bazı değişikliklerle birlikte çok farklı sismik ortamlarda yer etkilerinin karakterize edilmesi için bu zamana kadar başarıyla kullanılmıştır [3, 11, 12].

Saha tepkisinin belirlenmesi için kullanılan mikrotremor yöntemleri iki grupta kategorize edilebilir. Bunlar analitik (teorik) ve yeterli bir belirleme seviyesine imkan tanıyan ampirik yöntemlerdir. Ancak, bu çalışmada da kullanılan frekans spektrumunun üç bileşenli sismograf kullanılarak kaydedilen kayıttan hesaplanması prensibine dayanan ampirik yöntemlerin daha etkili olduğu söylenebilir. Analizinin basitliği, farklı saha koşullarında sadece birkaç dakika kısa-periyot gürültü kaydının alınması sayesinde hızlı arazi çalışmalarına imkan tanıması ve düşük maliyetli gürültü ölçümlerinin kullanılmasından dolayı saha etkilerinin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. H/V yönteminin ortaya koyulmasının ardından [2], yer hareketi tepkisinin elde edilmesi için ortam gürültüsü ölçümlerinin kullanımı çeşitli çalışmalarda başarı ile uygulanmıştır. Bu yöntem özellikle baskın titreşim periyotlarını ve yumuşak çökellerin zemin tepkilerini başarılı bir şekilde belirleyebilmektedir [13, 14].

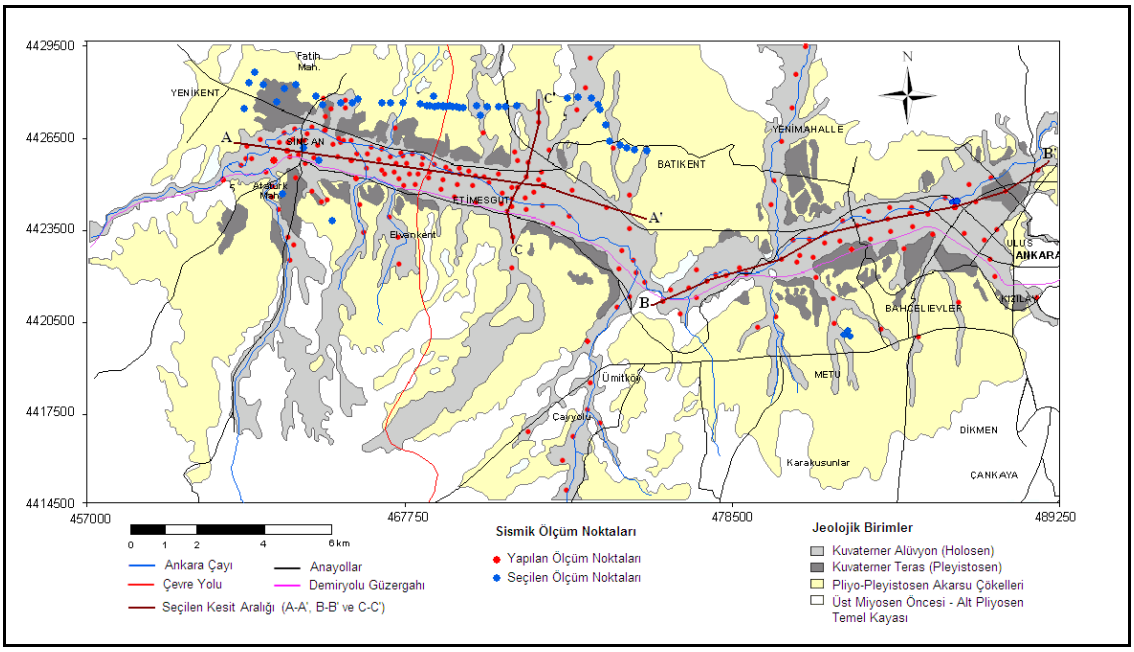
Birçok deneysel veri seti H/V spektral oranların ham gürültü spektrumu verisinden çok daha kararlı olduğunu doğrulamaktadır [3; 12]. Buna ek olarak, zayıf zemin özelliği gösteren alanlarda bunlar genellikle temel rezonans frekansı ile iyi bir şekilde örtüşebilen belirgin pikler ortaya koyarlar. Ancak bu piklerin anlamı ve büyüklüğü H/V yöntemi ile ilgili çalışmalarda halen tartışılmakta olan bir konudur. Ortam gürültüsünün doğasının sadece sediman katmanların tamamını başarılı bir şekilde tetikleyecek her yönde hissedilebilen enerjiye sahip olmayan yüzey kaynakları ile kısıtlı olmadığına da dikkat edilmelidir [13]. Dolayısıyla, ortam gürültüsü kayıtlarının, H/V spektral oranlarının temel frekansının belirlenmesine olanak sağladığı ancak daha yüksek modların tekrar oluşturulmasını her zaman başaramadığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen büyütme oranları çeşitli parametrelere karşı çok hassastır (örneğin, hız kontrastı, Poisson's oranı ve kaynak-kayıtçı mesafeleri vb.) ve bu nedenle meydana gelen arka plan gürültüsü göz önüne alındığında kesin olarak doğrulanamamaktadır [15, 16]. Gürültü kayıtlarının anlamı ve büyüklüğü H/V yöntemi açısından halen tartışılmakta olan bir husus olmasına karşın, spektral eğrilerden elde edilen baskın titreşim periyodu değerlerinin güvenilir olduğu hususunda genel bir fikir birliği söz konusudur [17].

4.2. Sismik Saha Karakterizasyonu ve Veri Analizleri (Seismic Site Characterization and Data Analysis)

Yer hareketi büyütmelerindeki mekânsal dağılımların belirlenmesinde, sismik saha koşullarının haritalanmasında ve ayrıca hem büyüklük hem de frekansa bağlı saha büyütmelerinin niceliksel olarak belirlenmesinde sistematik yaklaşımlar geliştirilebilir [18]. Buna bağlı olarak, sismik saha koşullarının karakterize edilmesinde, standartlaştırılmış bir yöntem olan zeminlerin ilk 30 m'sindeki ortalama kayma dalgası hızlarının ölçümlenmesi yöntemi kullanılabilir (International Code Council) [19]. IBC 2006 tasarım koduna göre zemin sınıfları için bölgesel bir V_s modeli geliştirmek üzere çalışma alanında Pliyo-Kuvaterner sedimanlar üzerinde 259 noktada sismik hız ölçümleri alınmış [1] ve zeminlerin ilk 30 metresindeki ortalama kayma dalgası hızları hesaplanmıştır [20] (Şekil 5). Bu ölçümlerin 217 (84 %) adedi Kuvaterner ve 42 (16%) adedi Pliyo-Pleyistosen sedimanlarda gerçekleştirilmiştir. Kuvaterner alüvyon sahalar 30 metre derinlik içerisinde Holosen alüvyon ve altında daha sıkı sediman istiflerinden oluşmaktadır. Alüvyon sedimanların kayma dalgası hızları 80 ile 200 m/s arasında değişirken bu birimin altında yer alan istifler genellikle 300 m/s' den daha yüksek hıza sahiptir. Kuvaterner teras çökeller ise genellikle ince bir teras sediman birimine (10 metreden az) ve bunun altında daha sıkı sediman malzemelerine sahiptir. Teras sedimanların kayma dalgası hızları 180 ile 240 m/s arasında değişmekte ve altında kalan çökellerin hızı ise genellikle 300 m/s'nin üzerindedir. Son olarak, Pliyo-Pleyistosen çökellerde genellikle 230 ile 440 m/s arasında kayma dalgası hızları ölçümlenmiş ve derinlik arttıkça hız değerlerinin arttığı görülmüştür.

IBC (2006) tarafından belirtilen saha koşulları göz önünde bulundurulduğunda, sedimanter birimler genel olarak çeşitli alt gruplara ayrılmıştır ve bu birimlerin $V_s(30)$ sonuçlarının dağılımının yorumlaması istatistiksel olarak incelenmiştir (Tablo 1). Kuvaterner sedimanlarda farklı $V_s(30)$ karakteristiklerine sahip iki birim vardır, bunlar E-Sınıfı Kuvaterner alüvyon birimi ve D-Sınıfı Kuvaterner alüvyon ve teras çökelleridir (Tablo 1). Kuvaterner (Holosen) alüvyon birim içerisindeki $V_s(30)$ değişimi, sahadaki ilk 30 metre içerisinde daha sıkı zemin karakteri olan teras çökelleri ve Pliyo-Pleyistosen akarsu çökellerinin varlığından etkilenmiştir. Kuvaterner teras birimler genellikle Kuvaterner alüvyon birimlerden daha sıkı karakterdedir, ancak etrafında yer alan daha yaşlı sedimanlardan daha az sıkı olma eğilimindedirler. Bu çökellerin kalınlığı genelde 10 metreden daha az olarak belirlenmiş ve ilk 30 metre içerisinde önemli miktarda daha sıkı zemin karakteri olan Pliyo-Pleyistosen sedimanlara rastlanmış ve bunlar $V_s(30)$ değerlerini arttırarak etkilemiştir. Pliyo-Pleyistosen sedimanlar,

çevrelerinde yer alan ve nispeten daha sıkı olan $V_s(30)$ değerleri ortaya koyan Kuvaterner çökeller ile karşılaştırıldığında özellikle daha iyi çimentolanmış, deforme olmuş ve sismik hızları yükselmiştir. Pliyo-Pleyistosen çökeller ölçüm noktalarında genellikle 30 metreden daha kalın olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Temel jeolojik birimler ve sismik ölçüm lokasyonlarının gösterildiği çalışma alanı haritası [20]

(The map of major geologic units and locations of seismic measurement locations)

Tablo 1. Jeolojik birimlerin zemin karakteristiklerinin istatistiksel dağılımı ve bunların $V_s(30)$ verisine göre IBC 2006 zemin sınıflandırmaları (Statistical distribution of the soil characteristics of geologic units and their IBC 2006 site classes based on $V_s(30)$ data)

Jeolojik Birim	Ort. V_s(30) (m/s)	Std. S. (m/s)	Aralık (m/s)	Veri Sayısı	Oran (%)		Zemin Sınıfı (IBC 2006)	Genel Açıklama
Kuvaterner	**202**	**34**	**125-292**	**2**	0.9		Class C	**Holosen-Üst Pleyistosen**
				134	**61.8**	**100**	**Class D**	
				81	**37.3**		**Class E**	
Kuvaterner alüvyon	198	32	125-292	2	1.0		Class C	Holosen
				119	58.9	93.0	Class D	
				81	40.1		Class E	
Kuvaterner teras	251	24	218-284	0	-		Class C	Üst Pleyistosen
				15	100	7.0	Class D	
				0	-		Class E	
Pliyo-Pleyistosen	**343**	**42**	**250-451**	**14**	**33.3**		**Class C**	**Üst Pliyosen - Pleyistosen**
				28	**66.7**	**100**	**Class D**	
				0	-		Class E	

$V_s(30)$ verisinin değerlendirilmesi esnasında, Pliyo-Kuvaterner sedimanların genellikle mevcut daha genç ve daha yaşlı jeolojik birimlerin kayma dalgası hızı kategorileri arasındaki sınırda yer alan değişken hız aralıkları verdiği gözlemlenmiştir (Tablo 1). Alüvyonun kalınlığına bakılacak olunursa, bu birimin yüzeyde olduğu $V_s(30)$ profillerinde ilk 30 metre altında farklı malzemeleri içeriyor olması önemlidir. Ayrıca, yüzey örtü malzemesi niteliğindeki alüvyon kalınlığı bu basenin sınırına doğru kademeli olarak azalmaktadır. Bu nedenle, ilk 30 m derinlik içerisinde altında farklı malzeme olan alüvyon birimlerin litolojik kalınlığı azaldığında doğal olarak $V_s(30)$ değerlerinin kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, $V_s(30)$ verilerine dayanan saha karakterizasyon çalışmaları sediman koşulları için uygun bir niceliksel ölçüttür ve sedimanter birimlerin karakteristikleri ile yer etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlayan yerel zemin koşullarının tanımlanmasında değerli sonuçlar ortaya koymaktadır.

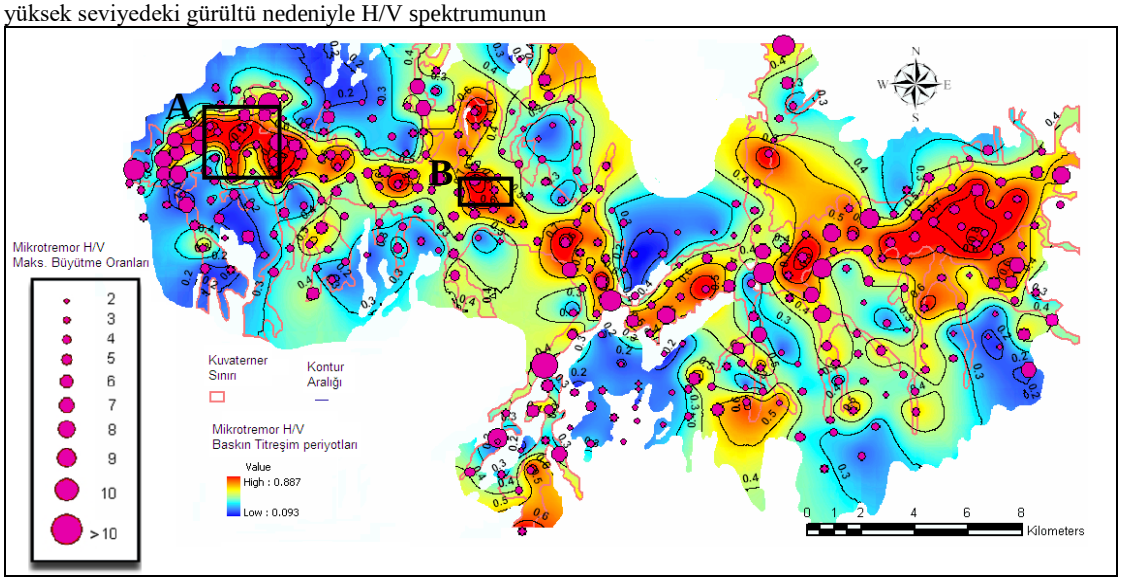
5. ÇALIŞMA ALANINDA YER ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

(ASSESSMENT OF SITE EFFECTS IN THE STUDY AREA)

Şekil 3 ve 4'te çeşitli noktalar için H/V tepki spektrumu örnekleri verilmiştir. Farklı çökel alanları için olan H/V spektrumları daha sıkı zemin özelliği gösteren Pliyo-Pleyistosen akarsu sedimanları için nispeten daha düz tepki eğrileri verdiği (Şekil 3, MOB-91) ve diğer yandan alüvyal zemin noktalarında ise genellikle hakim titreşim periyotlarını belirleyen maksimum (pik) büyütme oranları verdiği görülmektedir (Şekil 3, MOB-11, 29, 175, 321). H/V titreşim periyodundaki değişim genellikle alüvyon için sediman karakteristiğine ait H/V pik periyodu ne kadar yüksek ise alüvyon çökelin kalınlığının da o kadar fazla olacağı şeklinde yansımaktadır. Bu ilişki her noktada birebir doğru olmasa bile H/V titreşim periyodu arttıkça büyütme oranlarının daha yüksek olacağına dair genel bir eğilim söz konusudur. Bunun aksine, H/V oranının pik noktasındaki değerinin genellikle depremin bu noktada göstereceği pik değerinden daha düşük olma eğilimi olduğu da unutulmamalıdır [15].

Çalışma alanındaki H/V tepki spektrumları Kuvaterner sahalarda genellikle her iki sensörle (hız- ve ivme-ölçer) yapılan ölçüm sonuçları için yüksek periyotlarda benzer pik frekanslara sahiptirler (Şekil 4, MOB-11, 321 ve 343). Bu zeminler alüyyon kalınlığının nispeten yüksek olduğu noktalardır. Ancak çalışma alanında bazı istasyonlardan alınan ölçüm sonuçlarında alüvyon kalınlığı fazla olmasına karşın alanın genel karakteristiği düşünüldüğünde hem hakim titreşim periyotları hem de H/V büyütme oranları benzerlik göstermemektedir (Şekil 3, MOB-55). Bunun nedeni, yüksek seviyedeki gürültü nedeniyle H/V spektrumunun şeklini tamamen bozan çok yoğun araç trafiğinin olduğu alanlarda ölçüm yapılmasıdır. Ayrıca, sıkı zemin özellikleri gösteren malzemeler ile (örneğin, anakaya veya çok sıkı zemin) yoğunluğu daha düşük yumuşak sedimanlar arasındaki litolojik sınır seviyelerindeki empedans farkı (rezonans özelliği), çalışma alanındaki bazı noktalarda kayıtların spektral grafiklerinin değişimlerinden açıkça çıkarılabilmektedir (Şekil 4). Bunun nedeninin muhtemel yüzey topografyasının tekdüze olmayan (non-uniform) yapısı ile alakalı olarak bu iki tabaka arasındaki keskin empedans farkından (yüksek zemin büyütme oranlarından) dolayı olduğu düşünülmektedir [21].

Mikrotremor ölçümleri sonucunda elde edilen sonuçlar temel alınarak Ankara baseni için saha tepkisi dağılımları haritalanmıştır. Öncelikle, ölçüm noktaları arasında mekansal interpolasyon işlemi gerçekleştirilerek Ankara baseni genelindeki hakim titreşim periyodu dağılımlarının haritası hazırlanmıştır (Şekil 6). Daha sonra bu harita üzerinde yine hakim periyotlarda gözlemlenen maksimum büyütme seviyeleri her bir ölçüm noktasında interpolasyon yapılmadan değerlendirilmiş ve büyütme seviyeleri açısından kademeli olarak büyüyen boyutlu semboller olarak gösterilmiştir (Şekil 6). Bunun sebebi Nakamura yönteminin niteliksel karakterinin H/V oranının pik değeri tarafından erişilen seviyelerinin güçlü bir sarsıntı esnasında yüzeydeki bir sinyalin büyütmesi ile ilişkilendirilmesinin hâlihazırda sağlanamamasından kaynaklanmaktadır [4, 12].

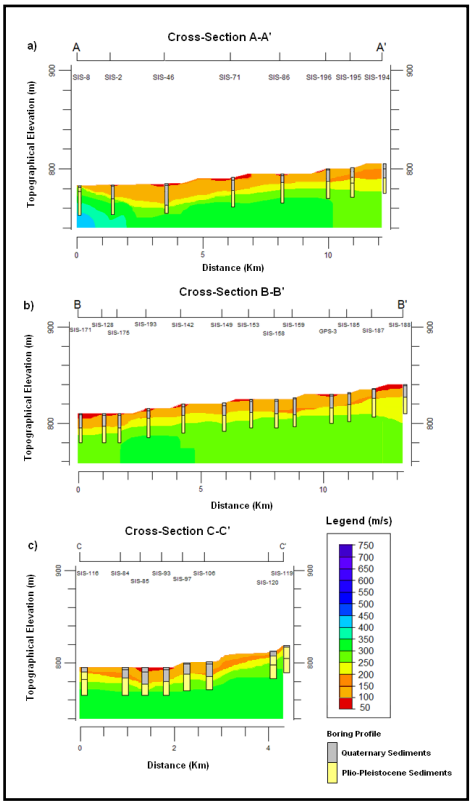


Şekil 6. H/V yöntemi ile elde edilen hakim titreşim periyodu ve maksimum büyütme seviyeleri haritası (Map of fundamental periods and maximum amplification levels obtained with the H/V method)

Şekil 6'da sunulan haritada hakim titreşim periyotlarındaki genel eğilimlerin çalışma alanındaki birimlerin dağılımı ile tutarlı olduğu görülmektedir. Hakim periyotlardaki genel dağılımlar Ankara baseninde alüvyondan kaya zeminlere kadar farklı litholojik birimlerin yer almasından dolayı göreceli olarak farklılıklar göstermektedir. Hakim titreşim periyotları Kuvaterner yaşlı alüvyon sedimanları için 0.4 ile 0.9 s arasında değişmektedir. Titreşim periyotlardaki bu farklılıkların olası nedenleri sediman özellikleri ve kayma dalgası hızlarındaki değişkenliğin yanı sıra alüvyon zeminlerin kalınlıklarıdır.

Bu düşüncenin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla, Ankara baseni genelindeki sediman kalınlıklarını ve karakterlerini incelemek amacıyla üç farklı kesit boyunca düşey ve yanal değişimleri gösteren 2 boyutlu V_S profilleri çıkarılmıştır (Şekil 7). Kesitlerin doğrultuları Şekil 5'te verilmiştir (A-A', B-B' ve C-C'). Eksenel çökelim sisteminin kontrolündeki güncel dere yatakları ve bunların ana kolları göz önünde bulundurulduğunda, alüvyon çökellerinin kalınlıklarının yüksek olduğu alanlarda kayma dalgası hızları nispeten düşüktür (Şekil 7a ve b). Ancak, Pliyo-Pleyistosen akarsu çökellerinin kalınlığı nispeten daha fazladır ve V_S sonuçları derinlik arttıkça sürekli olarak artış gösterir. Bundan dolayı, basenin ekseni boyunca derinlik değişimi genellikle Kuvaterner alüvyon çökellerin kalınlığı ile doğrudan ilişkilidir. Bu durum genellikle pekişmemiş zemin özelliği gösteren bu birimlerin sediman karakteristikleri ve litolojik kalınlıkları ile H/V yönteminden elde edilen hakim titreşim periyotları arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Ankara baseninin kenar sınırlarında baskın olan marjinal çökelim sistemi (Şekil 7c) topoğrafya eğiminin değişimine göre moloz akması ve örgülü nehirler tarafından çökelmiş teras ve alüvyon yelpazesi konglomeralarından oluşmaktadır. Marjinal çökelim ortamının doğasından dolayı dane boyları ince daneli alüvyon ovası sedimanlarını oluşturan eksenel taşkın ovası çökelim sistemi sedimanlarından daha büyüktür. Bu nedenle, kaba daneli çökellerin V_S sonuçları ince daneli çökellere göre daha yüksektir [22]. Doğal frekansları sediman kalınlığına dönüştürmek kolay bir işlem değildir. Zemin büyütme seviyelerindeki değişimler basen genelinde ortalama V_S değerlerinde bazı farklılıklar yaratmaktadırlar. Genellikle basen kenarlarda ve güncel nehir yataklarının sığ yan kollarında nispeten daha düşük büyütme seviyelerine rastlanılmıştır ve daha ince alüvyon tabakası kalınlıklarından dolayı daha düşük sönümlenmeler söz konusudur. Şekil 6'da sunulan harita göz önünde bulundurulduğunda, baskın periyotlarda gözlemlenen maksimum büyütme seviyeleri çökelim ortamı ve sediman karakteristiğinden dolayı değişkenlik göstermektedir, ancak bunlar Ankara baseninin litolojik birimleri ile nispeten uyumludur. Bu genel eğilim bazı noktalarda büyütme seviyelerinin genel karakteristiğini yansıtmıyor olabilir. Örneğin, H/V sonuçları düşey bileşenindeki olası büyütmelerden dolayı alüvyon sedimanlarının ana ekseni boyunca bazı noktalarda daha düşük büyütme seviyesi sonuçları vermektedir. Bunun yanısıra, H/V sonuçlarının basen kenarındaki alüvyon tabakası kalınlığının nispeten düşük olduğu zeminlerde ve temel kayası ile arasındaki sınıra yakın yerlerde yüksek büyütme seviyelerini de temsil edebilir (empedans farkı; Şekil 6). V_S sonuçlarının H/V sonuçları ile karşılaştırılması göz önünde bulundurulduğunda, Ankara basenindeki hakim titreşim periyotları ile maksimum büyütme seviyeleri genel olarak sismik sediman özellikleriyle iyi bir uyum göstermiştir.

Ankara'nın batısında Pliyo-Kuvaterner zeminler üzerindeki bu çalışma alanı yaklaşık olarak 250 km^2'den büyük makro ölçekli bir bölgedir. Bundan dolayı bahsedilen bu büyük ölçekteki mikrotremor ve sismik veri bankası ile arazide uygulanan yöntemlerin sonuçları ancak sayısal haritalar ya da tablolar biçiminde sunulabilmiştir. Bu sebeple, doğası gereği uygulamalı arazi çalışmalarında kullanılan yöntemlere ait belirsizlikleri ve içerdikleri sayısal/verisel hatalara ilişkin detaylı bir bilgi verilmesi çok zordur. Bu amaçla çalışılan alandaki mikrotremor verileri; yapılmış olan sismik ölçümler, jeolojik veriler ve jeoteknik sondaj çalışmalarından elde edilen dinamik zemin karakterizasyonu sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bununla da yetinilmeyip mikrotremor verileri ayrıca kendi içerisinde farklı sensörler yardımıyla belirli alanlarda yeniden değerlendirilerek yapılan ölçümlerin doğruluğu ve güvenilirliği test edilmiştir. Tüm bu kontrollü ve karşılaştırmalı olarak yapılan çalışmaların sonuçlarına bakıldığında yukarıda da belirtildiği üzere çalışmaların tolerans limitleri içerisinde tutarlı ve güvenilir olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Çalışma alanında farklı en kesitlerden alınan 2-boyutlu derinlik modelleri, A-A' (a), B-B' (b) ve C-C' (c). Bu kesitlerin doğrultu yönleri Şekil 5'te verilmiştir (2-D basin depth models taken from the different cross-sections in the study area, namely A-A′ (a), B-B′ (b) and C-C′ (c). Note that the trends of these sections are presented by Figure 5)

6. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada Ankara'nın batısındaki gibi küçük ve orta büyüklükte sismik aktivite gösteren alanlardaki yerel zemin koşullarının ve buna bağlı yer etkilerinin belirlenmesi için yapılan uygulamalı yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır. Bu çalışmalar, deprem tehlikesi değerlendirmelerine ve buna bağlı olarak yapılacak olan mekânsal planlama çalışmalarına önemli bir altlık teşkil edecektir. Çalışma alanı hali hazırda ve gelecekte Ankara'nın önemli büyüme potansiyeline sahip yerleşim alanlarının içerisinde yer almaktadır. Yakın geçmişteki yaşadığımız örnekler, Ankara baseni ve çevresinde meydana gelebilecek önemli sismik aktivitelerin Ankara'nın yoğun nüfuslu şehir merkezini etkileyebileceğini göstermektedir. Ankara şehir merkezinin büyük fay sistemlerinden nispeten uzakta yer

aldığı düşünülse de, bu gibi büyük şehirlerin kentleşme oranının hızla artması, aşırı nüfus, plansız kentleşme ve yetersiz altyapısından dolayı can ve mal kaybı açısından afet risklerine açıktır. Bu sebeple, yapılan bölgeleme çalışmaları ve yerel saha değerlendirmeleri; genel arazi kullanımı, kentsel planlama ve büyük gelişme alanları belirlenip onaylanmadan önce gerekebilecek özel çalışma sahalarının (örneğin Belediyeler için mikrobölgeleme çalışmaları vb.) belirlenmesi açısından Türkiye'nin başkenti olan Ankara için önem teşkil etmektedir. Özellikle yapılan bu çalışmalar mülki ve yerel idareler, mühendisler, şehir plancıları ve acil durum müdahale personeli vb. için potansiyel tehlike ve riski doğru şekilde değerlendirebilmek ve zarar azaltma açısından genel anlamda faydalı olacaktır.

Yapılan bu makro ölçekte bölgeleme çalışmalarının yukarıda belirtildiği gibi özel çalışma sahalarına adapte edilmesine yönelik olarak deprem tehlike analizlerinde ve risk azaltma çalışmalarında nasıl kullanılabileceğine dair bir örnek bu kısımda açıklanmıştır. 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra çalışma alanının batısındaki Sincan Belediyesi sınırları içerisinde, Belediye İmar İşleri Müdürlüğünce tespit edilen kayıtlara göre 8 farklı mahallede toplam 73 binada hafif şiddette hasar tespit edilmiştir. Ayrıca bu bölgede bir caminin kubbesi çökmüş ve yapım aşamasında olan çok katlı binanın bir cephesi tamamen yıkılmıştır. Ayrıca, Etimesgut ilçesinde Ankara Şeker Fabrikası içerisindeki lojmanların bir kısmı hem yapı stokunun eski hem de zeminlerin çok zayıf olması sebebiyle depremden etkilenmiştir. Depremlere yaklaşık 350-250 km uzaklıkta bulunan alanlarda bu şekilde hasar tespit vakalarının olması düşündürücüdür. Bahsedilen alanların zeminleri incelendiğinde bahsedilen bu çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler göre çok problemli alanlar üzerinde yer aldıkları görülmektedir. Şekil 6'da bahsedilen bu alanlar siyah renkli kare içerisinde A ve B bölgeleri olarak gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 7'de A bölgesi A-A' kesitinin batısında ve B bölgesi de C-C' kesitinin merkezinde yer almaktadır. Şekil 8'de ise bu bölgelere ait büyütülmüş mekânsal alan haritaları verilmiştir. Bu alanları detaylı incelediğimizde A ve B bölgeleri güncel akarsu çökellerinin ekseninde yer alan (yer altı su seviyesi neredeyse yüzeyde), pekişmemiş zemin özelliği gösteren ve düşük kayma dalgası hızı özelliklerine sahip derin Kuvaterner alüvyon zeminler üzerindedir. Hakim titreşim periyotları ile zemin büyütme seviyelerinin de buna bağlı olarak yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 6). Bu alanlar için depremlerin çok uzakta olmasına ve hasar yaratmayacağı düşünülmesine rağmen yerel zemin koşulların yaratmış olduğu saha tepkilerinden dolayı etkisi bu denli yüksek olmuştur. Yapılan bu örnek değerlendirme, yer etkilerinin belirlenmesine dair bu tür mekânsal bölgeleme çalışmalarının deprem tehlike analizlerine ve risk azaltma çalışmalarına çok önemli bir altlık teşkil ettiğini açıkça göstermektedir.

.



Şekil 8. Sincan ve Etimesgut ilçelerinde, Şekil 6'da belirtilen A ve B bölgelerine ait mekânsal alan haritaları. Şekillerdeki sarı kutular hasar tespitinin yapıldığı alanları göstermektedir (The spatial domain maps of A and B zones in Sincan and Etimesgut districts shown in Figure 6. In these figures, the yellow boxes indicate the areas where damage was detected)

Bu çalışma sonucunda yer etkilerini tetikleyen üç ana unsurun olduğu belirlenmiştir. Bunlar jeolojik formasyonun yaşı, zemin tabakalarının kalınlığı ile daha genç sedimanter birimlerdeki zemin özellikleri ve tekdüze olmayan yeraltı konfigürasyonlarıdır. Kuvaterner alüvyon birimleri, yüzeye yakın yerlerde düşük sismik hız özellikleri gösteren zeminlerin yer almasından dolayı yüksek periyotlarda yer hareketlerini Pliyo-Pleyistosen yaşlı çökellere göre daha fazla büyütmektedirler. Ankara baseninde sismik verilerin H/V ölçümleri ile karşılaştırılması göz önünde bulundurulduğunda, hakim titreşim periyodu haritasındaki değişimlerin maksimum büyütme seviyeleri ile sismik saha karakterizasyonu sonuçları uyumluluk göstermektedir. Hakim periyotlardaki yüksek büyütmelerin çalışma alanında genellikle birim içinde düşük kayma dalgası hızı özelliklerine sahip daha kalın pekişmemiş sedimanlara tekabül eden Kuvaterner zeminler boyunca olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçların karşılaştırılması H/V baskın periyot değerlerinin büyük ihtimalle pekişmemiş

sediman özelliklerinin yaratmış olduğu yer tepkilerinden dolayı artan büyüklük ivmeleri ile yükselebileceğini göstermektedir. Ayrıca, sismik dalgalarının yayılımı yüzey topografyasından ve tekdüze olmayan yeraltı konfigürasyonlarından ciddi şekilde etkilenmekte ve bu da pekişmemiş sedimanlar ile sağlam zemini teşkil eden birimler arasındaki büyük yoğunluk farklarından dolayı empedans özelliklerinin oraya çıkmasına neden olmaktadır. Dolayısı ile bu çalışma arka plan gürültüsünün kaydedilmesine dayanan H/V yönteminin genellikle hakim titreşim periyotlarını belirleyen maksimum büyütmeleri ortaya koyan düşük açılı dalıma sahip yumuşak alüvyon tabakalarının sismik davranışına dair güvenilir veriler elde edilebileceğini açık bir şekilde göstermektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmaya vermiş olduğu katkılarından dolayı Sayın Haluk Akgün, Sayın Uğur Kuran, Sayın Kıvanç Okalp, Sayın Mete Mirzaoğlu, Sayın Mert Eker ve Sayın Selim Cambazoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Koçkar, M.K., "Engineering geological and geotechnical site characterization and determination of the seismic hazards of Upper Pliocene and Quaternary deposits situated towards the west of Ankara", Ph.D. Dissertation, Middle East Technical University, Ankara, 401p, 2006.

[2] Nakamura, Y., "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (QR of RTRI) 30:1, pp. 273-281, 1989.

[3] Lermo, J., Chavez-Garcia, F.J., "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", Bulletin of the Seismological Society of America 83, pp. 1574-1594, 1993.

[4] Bard, P.-Y., "Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?", In: The effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (Eds.), Rotterdam, pp. 1251-1279, 1999.

[5] Lacave, C., Bard, P.-Y., Koller, M.G., "Microzonation: techniques and examples", In: Block 15: Naturgefahren - Erdbebenrisiko, (elektronik kitap: http://www.ndk.ethz.ch/downloads /publ/publ_B115/Koller. pdf), 23 p, 1999.

[6] Chatelain, J-L., Guillier, B., Cara, F., Duval, A-M., Atakan, K., Bard P.-Y., The WP02 SESAME team, "Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings", Bulletin of Earthquake Engineering 6, pp. 33-74, 2008.

[7] AFAD, T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı Türkiye 1900 - 20xx Deprem Kataloğu. http://www.deprem.gov.tr/tr/depremkatalogu.

[8] Erol, O., Yurdakul, M.E., Algan, Ü., Gürel, N., Herece, E., Tekirli, E., Ünsal, Y., Yüksel, M., "Ankara'nın jeomorfoloji haritası", MTA Rapor No: 6875, 300 p, 1980.

[9] Kasapoğlu, K.E., "Ankara Kenti Zeminlerinin Jeomühendislik Özellikleri", Doçentlik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, 1980.

[10] Akyürek, B., Duru, M., Sütçü, Y.F., Papak, İ., Şaroğlu, F., Pehlivan, N., Gönenç, O., Granit, S. ve Yaşar, T., "Ankara şehri çevresinin jeolojisi ve doğal kaynakları", MTA Derleme No: 9961 (yayınlanmamış), 1997.

[11] Chávez-García, F. J., "Site effects: from observation and modeling to accounting for them in building codes, Chapter 3", Earthquake Geotechnical Engineering. 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering-Invited Lectures. Kyriazis D. Pitilakis (Eds.), Springer, pp. 53-70, 2007.

[12] Duval, A.M, Méneroud, J.P, Vidal, S., Singer, A, De Santis, F., Ramos, C., Romero, G., Rodriguez, R., Pernia, A., Reyes, A. and Griman, C., "Caracas, Venezuela, Site effect determination with microtremors", Pure and Applied Geophysics 158, pp. 2513-2523, 2001.

[13] Lachet, C., Bard, P. Y., "Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique", Journal of Physics of the Earth 42, pp. 377-397, 1994.

[14] Mucciarelli, M., "Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: an experimental approach", Journal of Earthquake Engineering 2:4, pp. 625–638, 1998.

[15] Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., Fah, D., "H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations", Geophysical Journal International 167:2, pp. 827-837, 2006.

[16] Bour, M., Fouissac, D., Dominique, P., Martin, C., "On the use of microtremor recordings in seismic microzonation", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 17, pp. 465-474, 1998.

[17] Raptakis, D.G., Manakou, M.V., Chavez-Garcia, F.J., Makra, K.A., Pitilakis, K.D., "3D configuration of Mygdonian basin and preliminary estimate of its site response", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25, pp. 871-887, 2005.

[18] Wald, D.J., Allen, T.I., "Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification", Bulletin of the Seismological Society of America 97:5, pp. 1379-1395, 2007.

[19] International Code Council, ICC., International Building Code. Structural and fire-and life-safety provisions (seismic, wind, accessibility, egress, occupancy and roof codes), Whittier, CA, 2006.

[20] Koçkar, M.K., Akgün, H., Rathje, E.M., "Evaluation of site conditions for the Ankara basin of Turkey based on seismic site characterization of near-surface geologic materials", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, pp. 8-20, 2010.

[21] Horike, M., Zhao B., Kawase, H., "Comparison of site response characteristics inferred from microtremors and earthquake shear waves", Bulletin of the Seismological Society of America 91, pp. 1526-1536, 2001.

[22] Eker, A. M., Koçkar, M.K., Akgün, H., "Local site characterization and seismic zonation study by utilizing active and passive surface wave methods: A case study for the northern side of Ankara, Turkey", Engineering Geology 151, pp. 64-81, 2012.