

Ankara Batı Kesimi Zeminlerin Dinamik Özellikleri

Tolga KARABIYIKOĞLU¹, Ünal DİKMEN²

Öz

Günümüzde verilerin toplanması ve analiz edilmesindeki kolaylıkları nedeniyle doğal kaynaklı sismik yöntemler mikro bölgeleme çalışmalarında tercih edilmektedir. Ankara İlinin batısında yer alan, yerleşimin hızlı arttığı Ankara Çayı yatağını oluşturan Kuvaterner çökel birimin kalınlığını, kayma dalgası hızının derinlikle değişimini ve rezonans frekansını belirlemek amacıyla 18 farklı noktada Genişletilmiş Uzamsal Öz İlişki (SPAC) yöntemi ile veriler toplanmış ve değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar araştırmaya konu olan Kuvaterner yaşlı birimin beklenenden daha kalın olduğunu ve değişken geometri sunduğunu ortaya koymuştur. Bulgular uluslararası yapı kodlarında ve yönetmeliklerinde yer alan ve jeoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan V_{s30} değerinin bu tür bölgeler için yeterli olamayacağına işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Makaslama Dalgası Hızı, İlişki Fonksiyonu, Uzamsal Öz İlişki Yöntemi, Dispersiyon, Sönümlü En Küçük Kareler Yöntemi

Dynamic Properties of Soils in The Western Part of Ankara

Abstract

Nowadays, due to the easiness in gathering and analysing the data, natural sourced seismic methods are the preferred methods in microzonation studies. To determine the thickness and the variation of the shear wave velocity with depth and also the resonance frequency of the Quaternary sedimentary unit, forming the bed of the Ankara Stream, where settlement has been increasing rapidly in the west of the city of Ankara, Turkey, the data has been collected at 18 different points with the Extended Spatial Autocorrelation method and evaluated. Obtained results point out that the Quaternary unit, as the subject of the research, is thicker and has variable geometry. Findings indicate that the V_{s30} value, included in international building codes and regulations and is widely used in geotechnical engineering, may not be sufficient for such regions.

Keywords: Shear Wave Velocity, Correlation Function, Spatial Autocorrelation Method, Dispersion, Damped Least Squares Method

¹ Öğretim Görevlisi, Dr., Ankara Üniversitesi, Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi, Ankara

İlgili yazar e-posta / Corresponding author e-posta: tkara@ankara.edu.tr ORCID No: 0000-0001-8862-7526

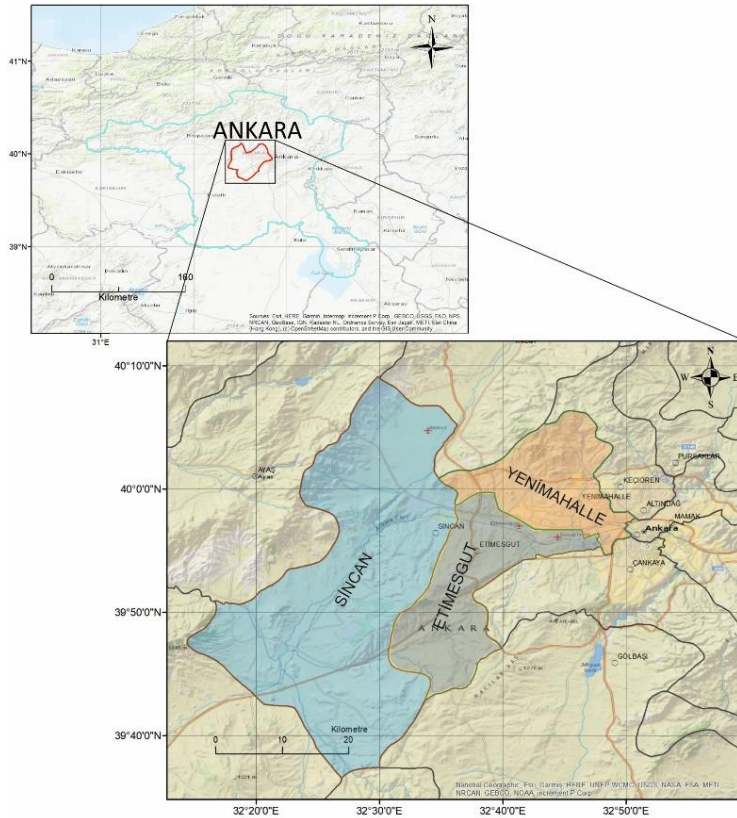
² Prof. Dr., Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara

e-posta: dikmen@eng.ankara.edu.tr ORCID No: 0000-0002-7603-4296

1. GİRİŞ

Makaslama dalgası hızı (V_s) yeraltının mühendislik özelliklerinin (makaslama modülü, elastisite modülü, sıkışmazlık modülü, rezonans periyodu, sismik genlik büyütmesi, Poisson oranı gibi) belirlenmesinde kullanılan temel parametrelerden biridir. Günümüzde uzamsal Öz İlişki (Spatial Autocorrelation, SPAC) ve türevlerini içeren yer araştırma yöntemleri göreceli olarak daha az sayıda sismik algılayıcı (sismometre) kullanması nedeniyle yeraltı V_s hızının derinliğe bağlı değişiminin belirlenmesinde tercih edilmektedir. Uzamsal Öz İlişki Yöntemini diğer pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerinden ayıran en belirgin fark; iki boyutlu düzenli geometri alıcı dizilimi kullanmasıdır. Ayrıca, yer içinde ilerleyen tamamen doğal kaynaklı ve düşük frekanslı (0.1 Hz - 5.0 Hz) mikro titreşimlerin (microtremor) kayıt edilmesi ve analizi diğer yüzey dalgası yöntemlerine kıyasla daha derinden bilgi alınmasına imkân vermektedir. Bu nedenle, özellikle derin tortul istifi ve altındaki ana kaya derinliğinin araştırıldığı çalışmalar için pasif kaynaklı sismik yer araştırma yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin zayıf yanı ise; veri toplama aşamasının iki boyutlu düzenli bir alıcı dizilimini gerektirmesine karşın veri-işlem ve sunumun bir boyutta yapılmasıdır.

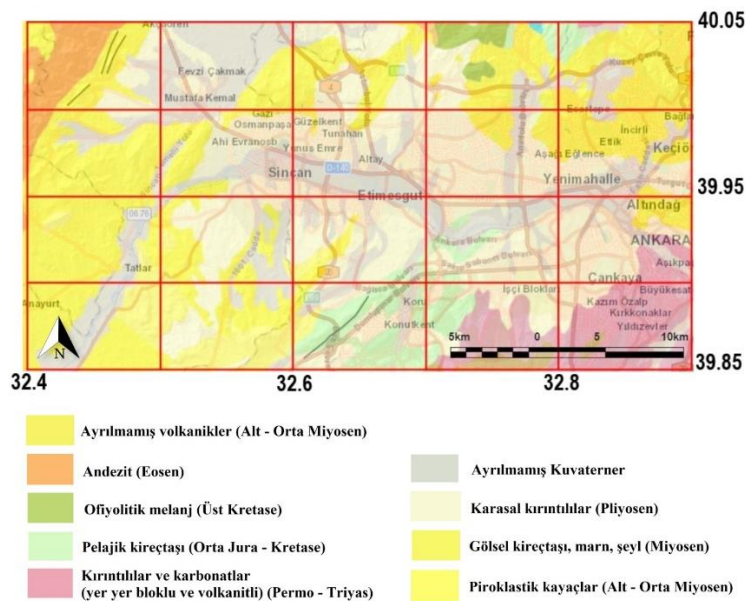
Ankara Kentinin batısında yapılaşma için yoğun olarak tercih edilen Yenimahalle, Batıkent, Etimesgut, Sincan ve Yenikent yerleşim alanlarını kapsayan bölgede (Şekil 1) Ankara Çayı'na yatak oluşturan Kuvaterner yaşlı tortulun kalınlığı ve konuma bağlı değişimi hakkında araştırma, birkaç noktada oldukça sığ sondaj ve jeofizik bilgileriyle sınırlıdır (Başokur, 2010, Koçkar 2006, Aydın 2010). Aydın (2010) ve Koçkar (2006)'da uygulanan sismik kırılma ve yüzey dalgası yöntemleri sonucunda ilk otuz metre derinliğe kadar ortalama V_s hızının Türkiye Deprem Yönetmeliğinde mühendislik kayasının V_s hızına ulaşmamasına dayanarak; tortulun tahmin edilenden daha kalın olduğu ve bu kalınlığın mekânsal olarak belirgin farklılıklar gösterebileceği düşünülmektedir. Mühendislik açısından bölgede en kritik birim Ankara Çayı ve yaklaşık kuzey-güney yönelimli kollarının tabanında birikmiş kohezyonsuz tortuldur (Başokur 2010).



Şekil 1. İnceleme Alanı (Sincan, Yenimahalle ve Etimesgut İlçeleri)

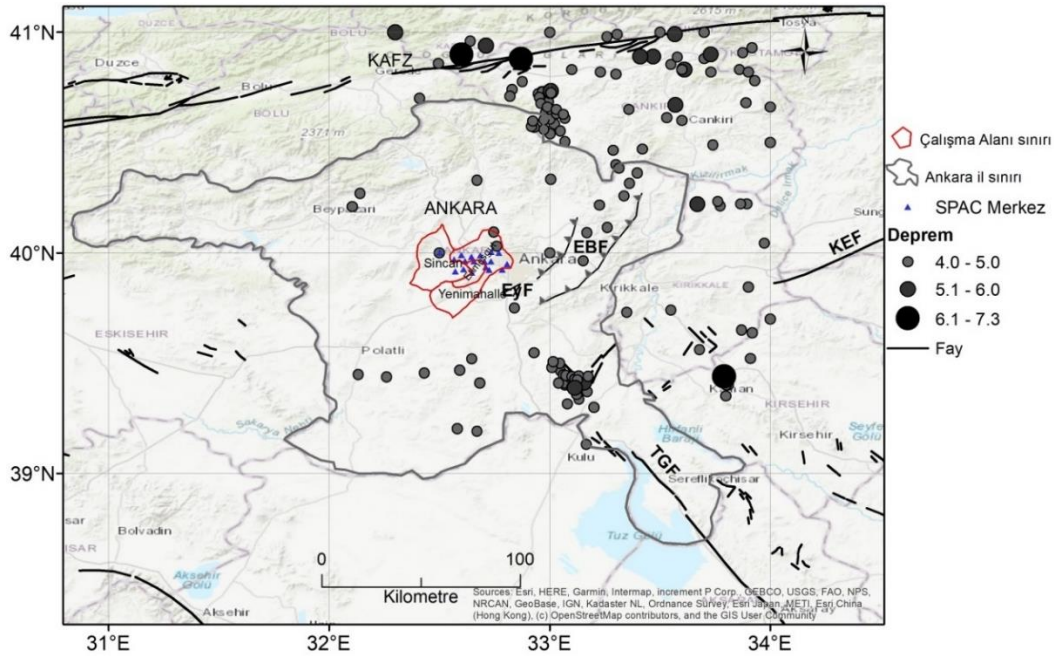
2. BÖLGENİN GENEL JEOLJİSİ VE SİSMOTEKTONİK DURUMU

Ankara Çayı ve yakın çevresinde 39.900K - 40.0088K enlemleri ile 32.4970D - 32.809D boylamları arasında kalan çalışma alanı ile civarına ait jeolojisi Şekil 2’de verilmiştir. Başokur (2010)’a göre çalışma alanında Üst Pliyosen - Pleyistosen aralığında çoğunlukla yatay durumlu gölsel kireçtaşı ve marn çökeli bulunmektedir. Etimesgut, Elvankent ve Sincan yerleşim alanları genellikle bu birimin üzerinde yer almaktadır. Üst Pliyosen-Pleyistosen yaşlı bu birim kuzeyde Orhaniye Köyü dolayında Eosen yaşlı denizel kireçtaşlarını üzerlerken, güneyde ofiyolitik melanjin ve Etimesgut İlçesindeki Dikmen Grovıklarının üzerinde açısız uyumsuz olarak yer almaktadır. Bu istiflenmenin en üst kesiminde beyaz renkli gölsel kireçtaşı Ankara Çayı ve Eskişehir Yolu arasında kalan bölgede, Ankara Çayı’na yakın kesimlerde, Sincan’ın yakın güneyinde sınırlı alanlarda gözlenmektedir. Başokur (2010) bu konumlarda kireçtaşı seviyesinin yerine gölsel kökenli, karbonatlı kumtaşının da bulunabileceğini belirtmektedir. Koçkar (2006)’a göre Üst Pliyosen-Pleyistosen akarsu tortulları çalışma alanında çok yaygındır ve Sincan, Etimesgut, Batıkent, Demetevler, Yenimahalle, Atatürk Orman Çiftliği, Bahçelievler, Anıttepe, Emek, Yenışehir, ODTÜ, Balgat ve Beytepe’yi kapsayan bölgedeki gibi fay kontrollü havzada çökelmiştir. ‘Ankara Kili Formasyonu’ da denilen Üst Pliyosen-Pleyistosen akarsu tortulları daha yaşlı, yüksek eğimli ve fazla deforme olmuş temel kayaların düzensiz erozyonlu yüzeyi üzerinde uyumsuz olarak yer alırken; Kuvaterner yaşlı alüvyon veya taraça tortullarınca örtülmekte veya nadiren, daha yaşlı birimlerce bindirilmektedir (Koçyiğit, 1991). Üst Pliyosen-Pleyistosen yaşlı gölsel kireçtaşı üzerinde, eski taraça özelliğinde, konglomera, kumtaşı ve silttaşından oluşan, çapraz tabakalı tortullar da görülmektedir. Taraça tortulları; Ankara Çayı daha yüksek kotlarda akarken ve henüz yatağını derinleştirmemişken depoladığı Kuvaterner yaşlı tortulları bölgedeki tektonizma kontrolünde çayın yatağının değişmesiyle yüksek seviyelerde bırakması sonucunda oluşmuştur. Ankara Çayı’nın kuzeyinde ve güneyinde, akarsuyun güncel alüvyal yatağının dışında ve üzerindeki seviyelerde tepe üstlerini kaplayacak şekilde gözlenmektedir. Kuvaterner ve güncel yaşlı alüvyon Ankara Çayı ile ona kuzeyden ve güneyden katılan derelerin vadi tabanlarında biriken kohezyonsuz çakıl, kum, silt ve killi tortuldur. Doğu-Batı uzanımlı Ankara Çayı ve kollarının taşkınlarıyla bu tortullar çökelmiştir (Koçkar, 2006). Başokur (2010)’a göre, bu birim bölgede mühendislik açısından en kritik birimdir. Ova Çayı yakınında alüvyonun güneye doğru göçmüş olan dere yatağı boyunca 100m’den kalın olabileceği tahmin edilmektedir ve bu kesimde yüksek katlı yapılaşma mevcuttur.



Şekil 2. Çalışma Alanı ve Civarı Genel Jeolojisi (URL 1)

Şekil 3'te Ankara ve civarında aktif faylar ve 1920 - 2020 yılları arasında meydana gelen depremlerin dağılımı verilmiştir. Ankara ve çevresinin deprem kaynakları Gökten ve Baran (1999), Koçyiğit (2008a, 2008b) ve Pampal vd. (2008) tarafından da incelenmiş olup, özellikle Koçyiğit (2008a) yakın zamanlarda meydana gelmiş deprem kayıtları ve Ankara dolayındaki neotektonik yapıları birlikte değerlendirilerek aktif olanları belirlemiştir. Ankara Çayının kuzeyinde ve güneyinde bulunan neotektonik dönem tortularının taban seviyesindeki farklar, Üst Pliyosen gösle kireçtaşının çayın kuzey ve güneyinde farklı yapısal özellikleri ve Ankara Çayı'nın güneyindeki sarplık yaklaşık doğu-batı doğrultulu eğim atımlı normal fayın göstergesidir. Bu fayın tavan bloğu Ankara Çayı vadisidir ve fayın taban bloğunda yapılaşma yoğundur (Başokur, 2010). Erol (1961)'e göre Ankara dolayında fay Erken Kuvaternerde başlamıştır. Başokur (2010)'a göre Ankara Çayı ve Ova Çayı vadilerinin arasında Sarayköy'ün güneyindeki Üst Pliyosen-Pleyistosen gösle kireçtaşında gözlenen yüksek eğim Pleyistosen sonrasındaki tektonik hareketin kanıtıdır. Çalışma alanını da kapsayan Ankara ve civarının ayrıntılı tektonik yapısına Gökten ve Baran (1999) ve Koçyiğit (2008a, 2008b)'den ulaşılabilir.



Şekil 3. Ankara Çevresinde Yer Alan Aktif Faylar ve 1920 - 2020 Yılları Arasında 4 ve Üzeri Büyüklükte Meydana Gelen Depremlerin Dağılımı (KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, EBZ: Elmadağ Bindirme Zonu, EF: Etimesgut Fayı, OF: Ovaçayı Fayı, BF: Başbereket Fayı, KEF: Kırıkkale-Erbaa Fayı, TGF: Tuzgolü Fayı, Eyf: Eymir Fayı) (URL 2)

3. UZAMSAL ÖZ İLİŞKİ YÖNTEMİ (SPAC)

Uzamsal Öz İlişki Yöntemi literatüre ilk Aki (1957, 1965) çalışmalarıyla önerilmiştir. Aralarında sabit mesafe bulunan ve farklı azimutlu çiftler oluşturan alıcılarda kaydedilmiş mikro titreşimlerde ilerleme yönünden bağımsız olarak, bu alıcı diziliminden geçen dalgaların faz hızını hesaplamak mümkündür. Aynı çalışmalara göre, mikro titreşimleri oluşturan dalgalar yüzey dalgaları gibi dispersif ise mikro titreşimler için uzamsal öz ilişki katsayıları tanımlanabilir. Chávez-García vd. (2005)'e göre SPAC yöntemi kaydedilen iki boyutlu dalga alanını konum ve zamanda rastsal ve durağan çevresel gürültü olarak varsayar. Bu çalışmada Okada ve Sakajiri (1983) ile Hidaka (1985) tarafından önerildiği gibi, yer yüzeyinde eş kenar üçgenin köşe noktalarında ve eş kenar üçgenin çevrel çemberinin merkezinde olmak üzere toplam dört alıcıyla eş zamanlı mikro titreşimlerin kaydedildiği geleneksel SPAC yöntemi; çevrel çemberin farklı

yarıçapları için uygulanmıştır. Farklı büyüklüklerde ve ortak merkezli dizilimlerden kaydedilecek eş zamanlı olmayan ancak eşit toplam süreli ve örnekleme koşullu mikro titreşimlerin tümleşik veri işlemi ilk kez Ling ve Okada (1993) tarafından uygulanmış ve “Genişletilmiş (Extended) SPAC Yöntemi” olarak adlandırılmıştır.

Yer yüzeyinde (x,y) ve $(x+x_i,y+y_i)$ gibi iki farklı konumda kaydedilen yer hareketi sırasıyla $u(x,y,t)$ ve $u(x+x_i,y+y_i,t)$ ise bu iki yer hareketi arasındaki benzerliğin ölçütü, aralarındaki ‘İlişki (correlation)’ fonksiyonudur. Zaman serilerinin aralarındaki faz farkının en düşük olduğu frekans bileşenlerinde ilişki fonksiyonunun değeri bire yakın, tersine faz farkının yüksek olduğu frekans bileşenlerinde ise sifıra yakındır. İşlem frekans ortamında gerçekleştirilmekte ve sırasıyla $U(x,y,f)$ ve $U(x+x_i,y+y_i,f)$ farklı konumlardaki verinin genlik spektrumlarını ifade eder. İlişki fonksiyonu frekans ortamında (1) bağıntısı ile üretilir (Aki, 1957; Chávez-García vd., 2005).

$$\rho(r, f) = \frac{\text{Re}[U(x, y, f)U^*(x + x_i, y + y_i, f)]}{\sqrt{[U(x, y, f)U^*(x, y, f)][U(x + x_i, y + y_i, f)U^*(x + x_i, y + y_i, f)]}} \quad (1)$$

(1) eşitliğinin sol tarafındaki $\rho(r, f)$ terimi frekansın ve iki algılayıcı noktası arasındaki mesafenin $r = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ bir fonksiyonudur. (1) eşitliğinin sağ tarafındaki pay terimi, zaman serilerinin çapraz güç yoğunluğu spektrumunu, payda terimi ise iki algılayıcıdan elde edilen zaman serilerinin öz güç spektrumlarının çarpımının karekökünü ifade etmektedir. $\text{Re}[\cdot]$ ise ilgili kompleks spektrumun gerçel kısmını belirtir. (1) bağıntısındaki (x,y) uygulamada üçgenin ağırlık merkez noktasını, $(x+x_i,y+y_i)$ ise köşe noktasına karşılık gelmektedir. (1) bağıntısının sayısal hesaplanması, merkez noktasındaki algılayıcıdan elde edilen mikro titreşim kaydına ait spektrum ile her bir köşe noktasındaki algılayıcıya ait mikro titreşim kaydının spektrumları arasında (iç ilişki olarak adlandırılır) ve ayrıca eşkenar üçgenin köşe noktalarındaki algılayıcılardan elde edilen mikro titreşim kayıtlarının spektrumları arasında yapılır (dış ilişki olarak adlandırılır). Örneğin, 4 kayıtçıdan oluşan bir eşkenar üçgen geometrisinde iki farklı r uzaklık değeri için SPAC katsayıları spektrumu elde edilir. Genel olarak uygulamada farklı yarıçaplarda en az iki adet iç içe geçmiş merkez noktası aynı eşkenar üçgen geometrisi kullanılır.

Aki (1957, 1965)’e göre kaydedilen iki boyutlu dalga alanının rastsal olduğu kabulüyle; SPAC katsayıları tüm veriden daha kısa süreli veri pencereleri üzerinden hesaplanır. Pencere seçimi için farklı algoritmaların mevcut olmasına karşın, kısa süreli pencerenin (örn. 1 s) genlik ortalamasının uzun süreli pencerenin (örn. 30 s) genlik ortalamasına oranlanmasına dayanan STA/LTA eşikleme yöntemi yaygın olarak kullanılır (Vaezi ve Van der Baan, 2015). Arazide kaydedilen mikro titreşim kayıtlarından hesaplan SPAC katsayıları, kuramsal hesaplanan SPAC katsayılarının yaklaştırılacağı gerçek veriyi oluşturur. Dalga alanının tümüyle Rayleigh dalgası temel kipinden oluştuğu kabul edilerek aralarındaki mesafe r olan alıcı çiftleri için kuramsal SPAC katsayıları (2) bağıntısı ile verilir (Okada, 2003).

$$\rho(r, f) = J_0\left(\frac{2\pi f}{V_R(f)} r\right) \quad (2)$$

(2) bağıntısında J_0 birinci tip sıfırncı dereceden Bessel fonksiyonunu, $V_R(f)$ dalga alanının frekansa bağlı faz hızını gösterir. (2) ifadesi, f frekansındaki $V_R(f)$ Rayleigh dalgası faz hızının Bessel fonksiyonunun değişkeninden elde edilebileceğini gösterir. Düzenli aralıklarla tanımlanan faz hızı yöneyi (2) bağıntısında kullanılarak ve her bir faz hızı-frekans çifti için grid tarama yaklaşımıyla kuramsal olarak hesaplanan SPAC katsayılarının gözlenen mikro titreşim kaydından elde edilen

(gerçek) SPAC katsayılarından farkının karesinin en küçükleştiği frekans-faz hızı çifti arazi verisi için dispersiyon fonksiyonu olarak belirlenir.

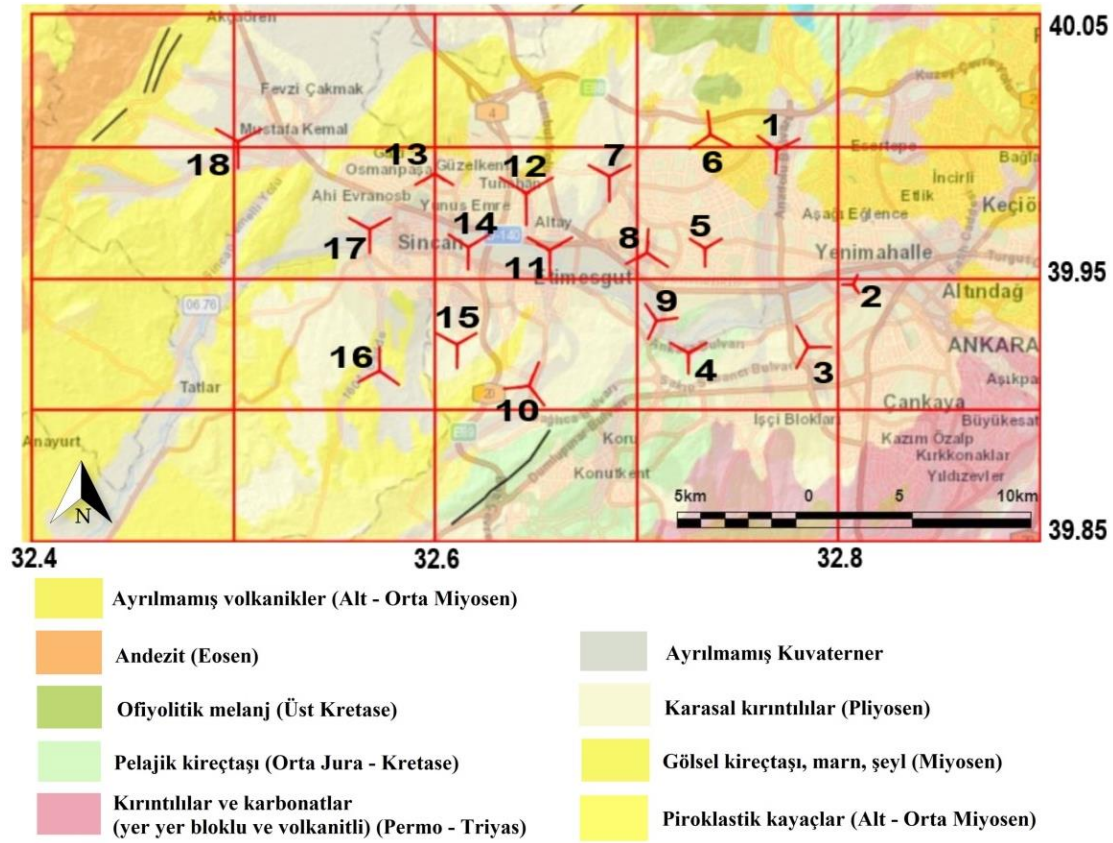
4. VERİ TOPLAMA VE ANALİZİ

Yapılaşma için yoğun olarak tercih edilen araştırma bölgesi zeminlerinin özellikleri hakkında bilgi edinmek üzere Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün desteği ile 2021 yılı Haziran - Temmuz aylarında araştırma bölgesinde toplam 18 farklı noktada mikro titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Doğal titreşim ölçümlerinde kullanılan ölçü alım geometrisi ve algılayıcı kurulum örneği Şekil 4'de verilmiştir. Her bir ölçüm noktası Şekil 4 sol paneldeki gibi, iç içe geçmiş üç adet eşkenar üçgenden oluşturulmuştur. Eşkenar üçgenin köşe noktalarında ve ağırlık merkezinde olmak üzere toplam 4 adet Güralp marka CMG-6TD geniş bant sismometre kullanılmıştır. Her bir sismometre ile birlikte bir adet 12V gerilimli güç bataryası ve GPS kullanılmıştır. Veri ölçümü algılayıcı üzerinde bulunan 8 GB dahili belleğe doğrudan aktarılarak gerçekleştirilmiştir. Sismometrelerin çalıştırılması ve ölçülen verinin onlardan alınabilmesi için, sırasıyla, üretici firmanın ücretsiz olarak sağladığı Scream! ve GCFextract isimli yazılımlar kullanılmıştır. Mikro titreşim ölçümlerinde 100 Hz frekans örnekleme oranı ile en az bir saat sürekli kayıt alınmıştır. Her bir istasyonda GPS başlangıç zamanları incelenmiş, veri işlem aşamasında ortak referans zaman noktası belirlenmiştir. Tüm ölçüm noktalarında kaydedilen mikro titreşimlerden Vs hızının derinliğe bağlı değişimini elde etmek için MATLAB dilinde bir bilgisayar programı yazılmıştır.

Şekil 5'te ölçüm yapılan 18 farklı noktanın konumları jeoloji haritası üzerinde gösterilmiştir. Ölçüm noktaları yoğun olarak Kuvaterner tortul üzerine gelmekle birlikte, bazı ölçüm noktalarının özellikle daha yaşlı birimler (Orta Miyosen yaşlı volkanikler ve Jura - Kretase yaşlı kireçtaşları) üzerinde kalmasına dikkat edilmiştir. M4 nolu ölçüm noktasında Kuvaterner yaşlı alüvyon, Orta Jura - Kretase yaşlı Pelajik kireçtaşları üzerinde; M5, M13 ve M15 noktaları Pliyosen yaşlı karasal kırıntılılar üzerindedir. M6 noktası ise Miyosen yaşlı gösel kireçtaşı, marn ve şeyl tortulu içindedir. Tablo 1'de ölçüm yapılan noktalara ilişkin konum bilgileri verilmiştir. Bölgedeki yapılaşmadan dolayı farklı yarıçaplı dizilimler kullanılmıştır.



Şekil 4. Veri Toplamada Kullanılan Dizilim Geometrisi ve İstasyon Kurulumu (Sol Panelde Verilen Sayılar İstasyon Numaralarını Gösterir)



Şekil 5. Mikro Titreşim Ölçüm Konumları

Tablo 1. Mikro Titreşim Ölçüm Noktaları Merkez Koordinatları ve Çevrel Çember Yarıçapları

MERKEZ NO	ENLEM	BOYLAM	JEOLJİ	YARIÇAP (M)
1	39.998883	32.769606	Kuvaterner alüvyon	60, 500, 1000
2	39.947842	32.807178	Kuvaterner alüvyon	100, 450
3	39.924050	32.784860	Kuvaterner alüvyon	100, 300
4	39.921619	32.725761	Kuvaterner alüvyon	100, 450, 870
5	39.961415	32.734067	Pliyosen karasal kırıntılılar	112.5, 750
6	40.004293	32.736216	Miyosen gölsel kireçtaşı, marn ve şeyl	100, 370, 1000
7	39.988463	32.686289	Kuvaterner alüvyon	613, 1000
8	39.959571	32.705229	Kuvaterner alüvyon	87, 460, 1012
9	39.934121	32.710015	Kuvaterner alüvyon	310, 840
10	39.909249	32.646606	Kuvaterner alüvyon	105, 1050
11	39.960595	32.656618	Kuvaterner alüvyon	100, 565, 1080

12	39.982120	32.645215	Kuvaterner alüvyon	107, 500, 1310
13	39.989610	32.599678	Pliyosen karasal kırıntılılar	100, 507, 897
14	39.962057	32.616497	Kuvaterner alüvyon	100, 440, 970
15	39.924869	32.610542	Pliyosen karasal kırıntılılar	100, 500, 1000
16	39.914760	32.572152	Kuvaterner alüvyon	100, 500
17	39.968590	32.567599	Kuvaterner alüvyon	102, 509, 1000
18	40.001668	32.502402	Kuvaterner alüvyon	105, 500, 1113

Veri işlemin ilk aşamasında Şekil 5 ve Tablo 1’de verilen her merkez noktasında arazi dispersiyon eğrisi hesaplanmıştır. Bu amaçla STA/LTA eşikleme yöntemiyle pencerelere ayrılmış mikro titreşim kayıtlarından (1) bağıntısıyla üretilen ilişki fonksiyonlarının pencereler üzerinden ve alıcı çiftleri üzerinden ortalaması alınarak arazi SPAC katsayı spektrumları elde edilmiştir. Grid tarama yaklaşımı kullanılarak bu spektrumlarla (2) bağıntısıyla hesaplanan kuramsal SPAC katsayılarının arasındaki hatayı gösteren faz hızı frekans haritası (dispersiyon haritası) üretilmiştir. Bu haritanın genliğinin en küçüklendiği frekans ve faz hızı çiftleri arazi (gerçek) dispersiyon eğrisi olarak değerlendirilmiştir. Arazi dispersiyon fonksiyonuna en uyumlu dispersiyon eğrisini sağlayan katmanlı yer modelini sönümlü en küçük kareler regresyonu ile çözmek yöntemin son aşamasını oluşturur. Çözülecek parametreler zemin istifi altındaki ana kaya dâhil katmanların Vs hızlarıdır. Ters çözümün başlangıç modelini belirlemek için arazi dispersiyon eğrisi el ile örneklenerek seçilen frekans ve faz hızı çiftleri kullanılmıştır. Bu çalışmada sönüm çarpanını hesaplamak için Dimri (1992)’de önerilen kısmi türevler dizeyinin elemanlarının karelerinin toplamının karekökü kullanılmıştır. Yakınsama kriteri ‘ortalama bağıl hatadır ve (3) bağıntısıyla verilir:

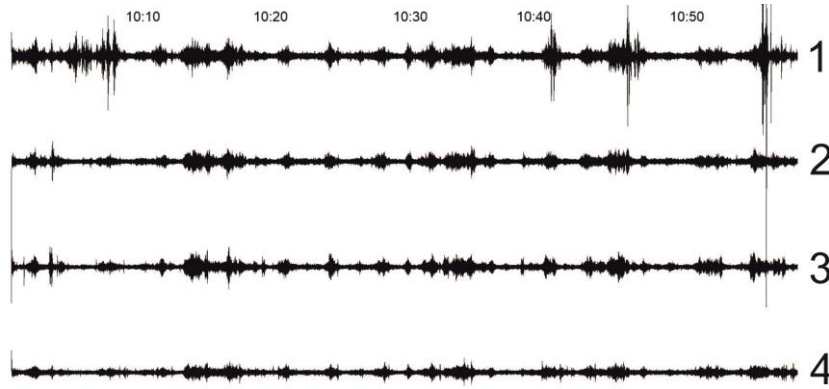
$$MRE = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left| \frac{V_R^g(j) - V_R^h(j)}{V_R^g(j)} \right| \quad (3)$$

(3) bağıntısında M incelenen frekans bandındaki örnek sayısını, $V_R^g(j)$ ölçülen veriden elde edilen j. frekanstaki faz hızını, $V_R^h(j)$ hesaplanan Rayleigh faz hızını gösterir. Amaç, yinelemeli bir düzende ortalama görelî hata yüzdesini en küçükleme. Bu çalışmada, katmanlı yer modelinin kuramsal dispersiyon eğrisine ve öz fonksiyonlarına ulaşmak için; artan frekans ile genliği büyüyen terimlerin yok edildiği Chen (1993) ve Hisada (1994) tarafından önerilen ‘Genelleştirilmiş yansıma ve iletim katsayıları yöntemi, Generalized Reflection and Transmission Coefficients Method’ kullanılmıştır. Katmanların makaslama dalgası hızlarına göre dispersiyon fonksiyonunun kısmi türevlerini elde etmek için; Lai ve Rix (1998) tarafından önerilen yaklaşım uygulanmıştır. Yinelemeli yaklaşımla hesaplanan katmanlara ait Vs kullanılarak; P dalgası hızı, yoğunluğu, rijidite modülü ve Lamé sabitleri arasındaki ilişkiler (4) bağıntılarıyla verilir (Cordier, 1985).

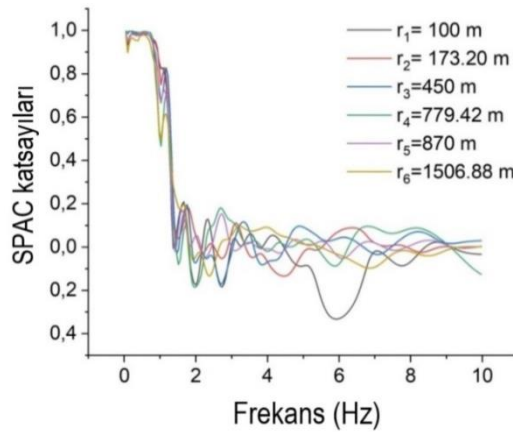
$$\begin{aligned} V_p &= V_s \sqrt{3} \\ \rho &= 0.31(V_s)^{0.25} \\ \mu &= \rho V_s^2 \\ \lambda &= \rho(V_p^2 - 2V_s^2) \end{aligned} \quad (4)$$

Burada hız m/s, yoğunluk g/cm³, rijidite modülü ve Lamé sabiti N/m² birimlidir. Şekil 6'da 4 nolu ölçü konumunda merkez algılayıcı tarafından ölçülen mikro titreşim verisi örnek olarak gösterilmiştir. Şekil 6'daki veri içerisinde pencere seçiminde Vaezi ve Van der Baan (2015) tarafından önerilen STA/LTA algoritması kullanılmıştır. Kurulan 3 eşkenar üçgenin her birinde 4 algılayıcı ile eş zamanlı alınan üç-bileşenli mikro titreşim kaydının düşey bileşenlerinin veri işleminde koşulları sağlayan farklı sayıda pencere olmasına karşın, yalnızca aynı başlangıç zamanlarına karşılık gelen pencereler analize dâhil edilmiştir.

Bölgede Kuvaterner birimin taban derinliğini belirlemek amacıyla, dairesel dizilimde kullanılan yarıçaplar özellikle son iki dış daire (Şekil 5'teki 1, 7, 8,, 10, 11, 12, 14, 17, 18 nolu eşkenar üçgenler) yarıçapları büyük tutulmuştur. Şekil 7'de 4 nolu merkezdeki mikro titreşim kaydından farklı uzaklıklar için hesaplanan ilişki katsayıları verilmiştir. (2) nolu bağıntı kullanılarak farklı frekans değerleri için hesaplanan faz hızı frekans haritası (dispersiyon haritası) üzerinde her bir frekans için en büyük enerjiye karşılık gelen faz hızı değeri Rayleigh dalgası temel kip hızı olarak kabul edilir.



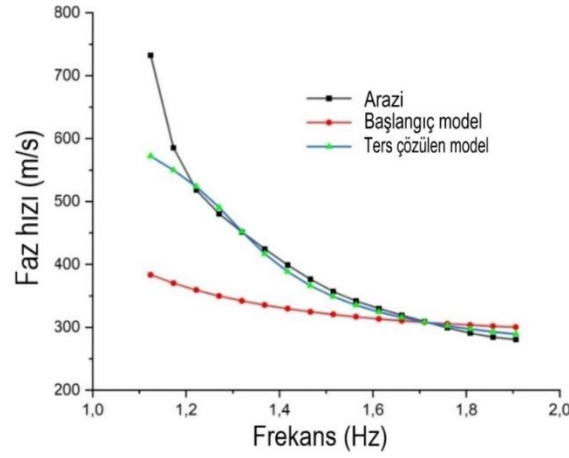
Şekil 6. r=100 m için 4 Sismometre Tarafından Ölçülen Düşey Bileşen Mikro Titreşim Kaydı (Tablo 1'de Verilen 4 Numaralı Ölçüm)



Şekil 7. Farklı Çevrel Uzaklıklar İçin Hesaplanan İlişki Katsayıları (Tablo 1'de Verilen 4 Numaralı Ölçüm Verisine Ait)

Şekil 8'de türdeş ve yön bağımsız 8 yatay tabakadan oluşturulan yer modelinden hesaplanan kuramsal dispersiyon eğrisi ile arazi dispersiyon eğrisinin tabakalı yer modeli için terslenen temel kip dispersiyon eğrisi gösterilmiştir. Başlangıç modeli arazi dispersiyon eğrisinden elde edilen faz hızı - frekans çiftleri kullanılarak elde edilmiştir. Arazi dispersion eğrisinde frekans-faz hızı çifti sayısının (<7) olması durumunda, tabakalı yer modeli için terslenmeden önce spline

interpolasyon yöntemi ile ara değer bulma işlemi uygulanmış ve frekans faz hızı çifti sayısı arttırılmıştır. 4 numaralı mikro titreşim kaydı için izlenen veri-işlem aşamaları Şekil 5' te verilen tüm ölçüm noktalarında elde edilen mikro titreşim kayıtları için uygulanmıştır.



Şekil 8. Tabakalı Yer Modelinden Hesaplanan Ve Ters Çözülen Dispersiyon Eğrileri (Tablo 1'de Verilen 4 Numaralı Ölçüm Verisine Ait)

5. BULGULAR

Şekil 5'de verilen ölçüm geometrisine göre; M1, M2, M3, M4 M7, M8, M9, M10, M11, M12, M14, M16 ve M17 noktaları Ankara Çayı ve onun yaklaşık K-G gidişli kollarına yatak oluşturan Kuvaterner yaşlı tortul üzerindedir. M18 noktası Yenikent İlçesine zemin teşkil eden Ova Çayı'nın Kuvaterner yaşlı tortulundadır. Uzamsal Öz İlişki Yöntemi uygulanarak tüm noktalar için Vs-derinlik değişimi hesaplanmış ve farklı derinlik seviyeleri için Vs dağılım haritaları elde edilmiştir. 30 m, 50 m, 75 m ve 100 m derinlikte Vs'nin konuma göre değişimi Şekil 9'da; 125 m, 150 m, 175 m ve 200 m derinlikteki hız dağılımı Şekil 10'da ve 250 m, 300 m, 400 m ve 600 m'deki dağılımı ise Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 9'da görüldüğü gibi 30 m ile 75 m seviye haritalarında bölgedeki ortalama Vs ~280 m/s'dir. Bununla birlikte, M5, M6, M13 ve M15 noktalarında hız nispeten daha yüksektir (~600 m/s). Şekil 5'te verilen jeoloji haritasına göre SPAC uygulama noktalarından bazıları Kuvaterner yaşlı alüvyonun dışındadır; M6 noktası Miyosen yaşlı gölsel kireçtaşı, marn ve şeyl tortulları üzerinde; M5, M13 ve M15 noktaları ise Pliyosen yaşlı karasal kırıntılılar üzerindedir. Bölgede sığ derinlikte sondaj loğlarını, SPT deneylerini, düşey elektrik sondajlarını, sığ sismik kırılma ve bazı yüzey dalgası araştırma yöntemlerini içeren çalışmalar literatürde mevcuttur. Aydın (2010)'da Ankara metrosu güzergâhlarında sismik kırılma yöntemiyle ilk 30 m derinliğe kadar ortalama Vs hızı ölçülmüştür.

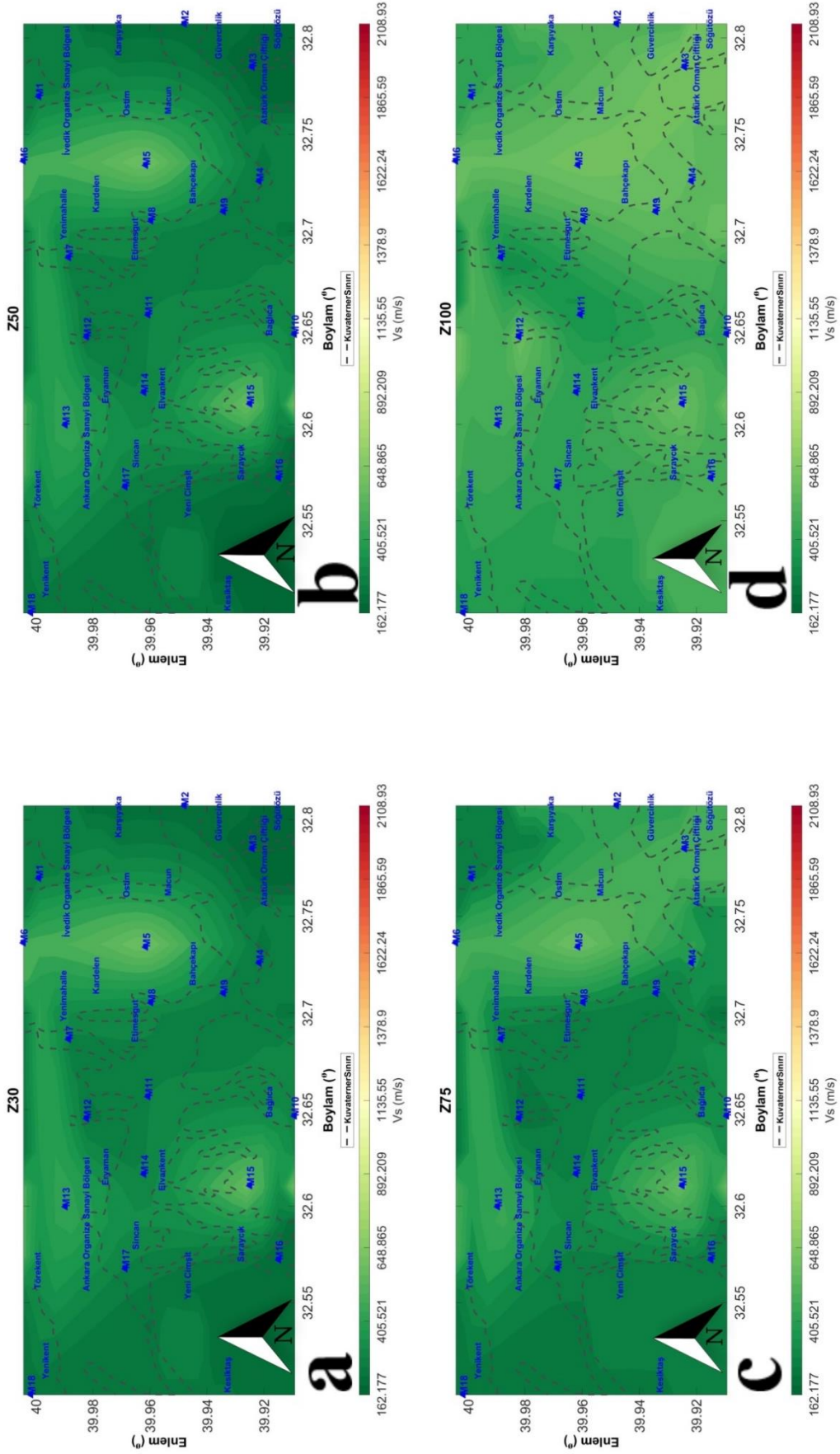
Söz konusu çalışmada Ankara Organize Sanayi Bölgesi'nde 260 m/s; 5. Etap İstasyonunda 227.5 m/s ve Etimesgut İlçesinde İstanbul Yolu'nun güney kenarında 195 m/s olarak belirlenmiştir. Bu makalede sunulan çalışmada söz konusu konumlara sırasıyla denk gelen M17 noktasında ilk 30 m derinliğe kadar ortalama Vs hızı 289.2 m/s, M14 noktasında 276.2 m/s ve M11 noktasında da 298.5 m/s değerleri ölçülmüştür. Sırasıyla M11 ve M18 olarak isimlendirilen noktaların yakınında Başokur (2010)'da alınan sondaj loğlarına dayanarak, Kuvaterner yaşlı alüvyonun kalınlığının 6.5 m – 18 m ve 6.5 m – 8.0 m aralıklarında değiştiği bildirilmiştir. Aynı çalışmada ilk 30 m derinliğe kadar ortalama Vs hızının M11 noktası yakınında 264 m/s ve M18 noktası yakınıdaysa 303 m/s olduğu belirtilmiştir. Tabban (1976)'da bölgede D.S.İ 5. Bölge Baş Mühendisliği'nin yaptığı sondaj loğlarını kullanarak Ankara İlinin arazisinde birçok noktada tortul istifi derlenmiştir. Bu makalede SPAC yönteminin uygulandığı M8 ve M11 noktaları arasında kalan Etimesgut Subay Evleri'nde yüzeyden 3 m derinliğe kadar kum katmanının altında sırasıyla 2 m kalınlığında

volkanik çakılın, 80 m kalınlığında kil, killi kum, kil ve kum katman paketlerinin sıralanmasından oluşan istifin, 15 m kalınlığında killi kalkerin bulunduğu belirtilmiştir. Doğuda M2 noktası yakınında, Yenimahalle Hayvanat Bahçesi arazisinde, yaklaşık 3 m kalınlığında toprak örtüsünün altında 12 m derinliğe kadar Kuvaterner yaşlı alüvyon, çakıl ve kum içeren bir katmanın ve onun da altında yeryüzünden 18 m derindeki Pliyosen sınırına kadar kil katmanının bulunduğu Tabban (1976)'da bildirilmiştir. M3 noktası yakınındaki Ankara Çimento Fabrikası arazisinde 3 m kalınlığında dolgu malzemesinin altında sırasıyla; 4 m kalınlığında siltli çakıllı kil, 3 m kalınlığında iri kum, 16 m kalınlığında kalker, 3 m kalınlığında killi kalker ve 12 m kalınlığında kil ve 69 m kalınlığında ince kumtaşı bantlı marnın gözleendiği aynı çalışmada belirtilmiştir. Farklı disiplinlerde çalışmalar mevcut olsa da, çoğunluğu 100 m derinliği aşmamaktadır. Şekil 9c'de görülen 75 m seviye haritasında çalışma alanının güney doğu köşesinde Atatürk Orman Çiftliği dolayında hızın yükseldiği gözlenmektedir. M4 noktasında 50 m derinde 281 m/s olan Vs 75 m derinde 363 m/s'ye yükselmesinin Kuvaterner yaşlı alüvyonun altındaki Orta Jura – Kretase yaşlı pelajik kireçtaşından kaynaklanabileceğini düşündürmektedir. M2 ve M3 noktalarında bu derinlik artışı ile hız 210 m/s'den 410 m/s'ye yükselmektedir. Çalışma alanının genelinde 100 m seviye haritasında makaslama dalgası hız değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Kuzey doğuda, İvedik Organize Sanayi Bölgesi dolayında Vs ~600 m/s'ye ulaşmaktadır. Ayrıca Yenimahalle, Sincan ve Etimesgut İlçelerinde kalan M14, M12, M7, M8, M9 ve M11 noktaları dolayında daha sığ seviyelere göre hızın yükselerek 400 – 500 m/s değerine ulaşmaktadır. 125 m, 150 m, 175 m ve 200 m seviye haritalarında Vs'nin dağılımı ise Şekil 10'da verilmiştir. 125 m seviye haritasında en düşük hız Etimesgut İlçesinin batısında M11 ve M7 noktalarını kapsayan bölgede 365 – 395 m/s aralığındadır. Çalışma alanının güney doğusunda Atatürk Orman Çiftliği ve kuzey batısında Yenikent İlçesi dolayında hız 740 m/s'ye ulaşmaktadır. Etimesgut İlçesine bağlı Elvankent Mahallesi'nin kuzeyindeki M14 noktası dolayında ise Vs 770 m/s olarak hesaplanmıştır. 150 m seviye haritasında çalışma alanındaki en yüksek hız Miyosen volkanikleri üzerinde bulunan M6 noktasında 1203 m/s olarak elde edilmiştir. En düşük hız M13 ve M7 noktaları dolayında sırasıyla 488 m/s ve 483 m/s olarak hesaplanmıştır.

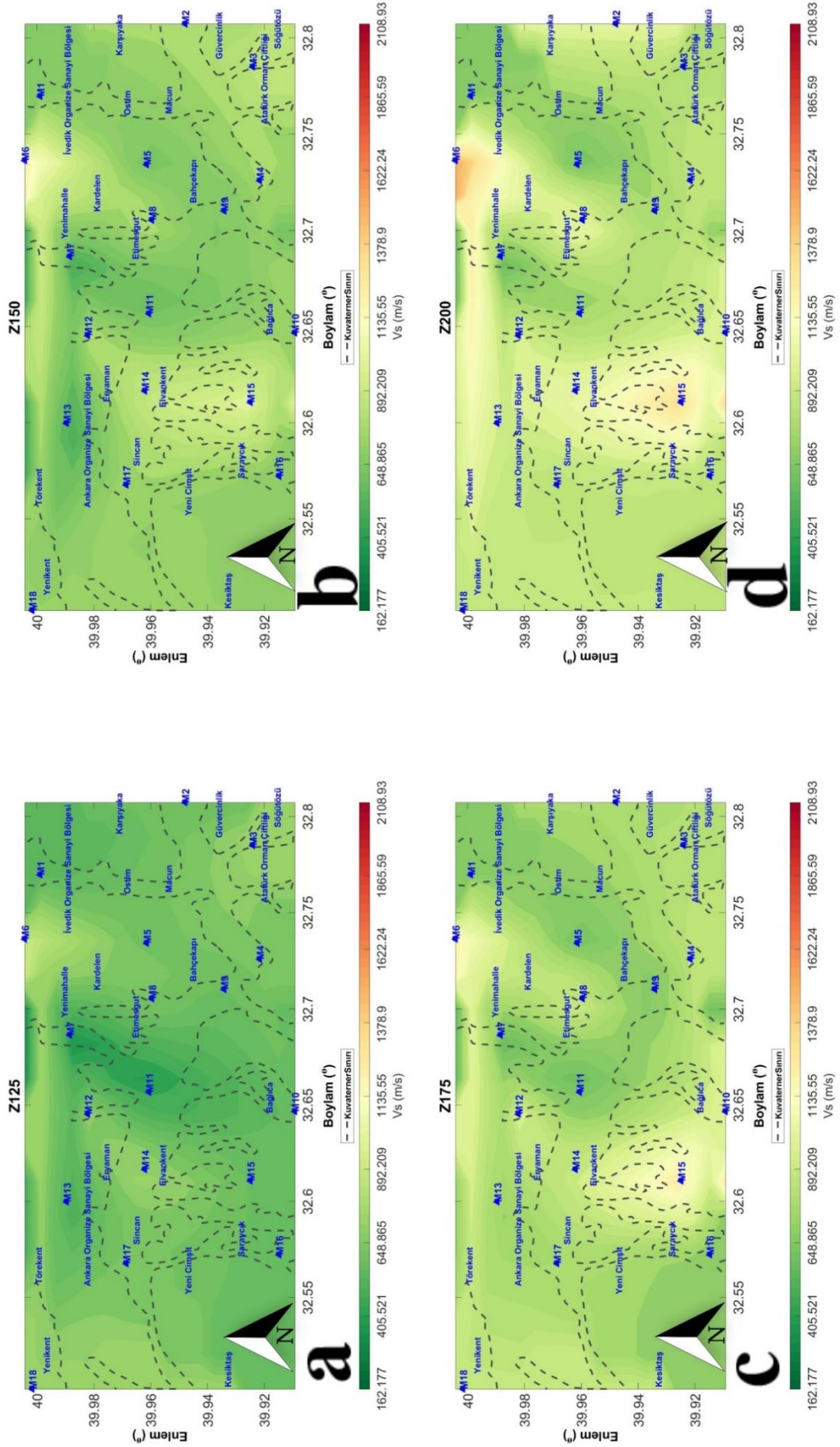
Etimesgut İlçesinin Elvankent ve Eryaman Mahallelerini içeren M15 ve M14 arasında kalan bölge araştırma sahasının geneline göre nispeten yüksek hız (920 - 1028 m/s) göstermektedir. Şekil 10c'de görülen 175 m seviyesindeki hız dağılımına göre M1, M5, M9, M11 ve M7 noktalarından geçerek Etimesgut İlçesini, Kardelen Mahallesi'ni ve Yenimahalle İlçesini doğu, güney ve batıdan saracak şekilde nispeten düşük hızlı (550 – 680 m/s) bir bölge söz konusudur. Bu seviyede hızın en yüksek değeri M6 ve M15 noktalarında sırasıyla 1203 ve 1286 m/s dir. 175 m seviyesi için düşük hızlı bölge 200 m seviyesinde M1- M5 ve M7- M11 arasında iki parçaya ayrılmaktadır. Bu seviyede de en yüksek hız M6 ve M15 noktalarında sırasıyla 1533 m/s ve 1367 m/s olarak elde edilmiştir. Şekil 11'de 250 m, 300 m, 400 m ve 600 m seviyelerindeki hız dağılımı verilmiştir. Şekil 11a'da verilen 250 m seviye haritasında en yüksek hız değeri M6 noktasında 1906 m/s' dir. Bağlıca Mahallesi'nin güneyindeki M10 noktasında hız 1100 m/s'den daha büyüktür. Bu seviyede en düşük hız Yenimahalle İlçesinin batısındaki M7 noktasında 636 m/s olup, çalışma alanının kuzey doğu ve güney doğusunda hız değeri 830 m/s dolayındadır. Kuzey batıda Yenikent İlçesi civarında ise hız 1046 m/s olarak elde edilmiştir. Şekil 11a'da verilen 250 m derinlik seviyesindeki hız dağılımı ile Şekil 11b'de verilen 300 m derinlik seviyesindeki hız dağılımı uyumludur. 300 m derinlik seviyesinde M4 noktasının güneyinde hız 1390 m/s üzerine çıkmaktadır ve M6 noktasında ise 1905 m/s ile bu seviye için en yüksek değeri almaktadır. Şekil 11c'de verilen 400 m seviye haritasında M4, M5, M6 noktalarını içeren K – G yönelimli ve M14, M15 ve M13 noktalarını içeren K- G yönelimli yüksek hız kuşakları daha belirgin hale gelmiştir. Bu seviyede en yüksek hız M6 – M5 noktalarında sırasıyla 1905 ve 1920 m/s olarak elde edilmiştir. Şekil 11d'de verilen 600 m derinlik seviyesindeki Vs dağılımında Yenimahalle İlçesinin batısındaki M7 numaralı noktada en düşük hız yaklaşık 712 m/s olarak hesaplanmıştır. Bu seviyede göreceli yüksek hızlı (1600 - 2100 m/s) yapının geometrisi daha belirgin hale gelmiştir.

Etimesgut ve Yenikent dolayında sırasıyla 11 ve 18 numaralı SPAC ölçüm noktalarına yakın konumlarda Başokur (2010) tarafından aktif kaynaklı yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (Multi Chanel analysis of Surface Waves - MASW) ve pasif kaynaklı doğrusal dizilim kırılma mikro titreşimi (Refraction Microtremor - ReMi) yöntemleri uygulanmıştır. Bu uygulamaların Başokur (2010)'da verilen birleşik ters çözümünün sonucu ve bu çalışmada uygulanan SPAC yöntemi ile elde edilen V_s 'nin derinliğe bağlı değişimi Şekil 12'de verilmiştir. Bu makalede uygulanan SPAC yöntemiyle Başokur (2010)'da verilen birleşik ters çözüm arasındaki farkın sebebi; SPAC yönteminin uygulanması sırasında geniş bant modunda ve daha derinden bilgi almak için daha düşük frekans bandında doğal kaynaklı mikro titreşimlerin değerlendirilmesi nedenleriyle sığ derinlikte çözünürlüğün düşük olmasıdır. Gerek aktif gerekse pasif kaynaklı sismik araştırma yöntemlerinde frekans bant genişliği ve kalitesi, kullanılan kaynağın gücü ile kullanılan algılayıcının kesme frekansına doğrudan bağlı olmakla birlikte; nokta kaynaktan oluşturulan yüzey dalgalarının analizine dayanan MASW yöntemi doğal yer titreşimlerini kaynak olarak kullanan SPAC yöntemine göre daha yüksek frekans bandı (4 Hz - 40 Hz) içerisinde çözümlenebilir. MASW yöntemi SPAC yöntemine göre daha sığ derinliğe ait bilgi içerirken, SPAC yöntemi ile çözülen frekans bandı 0.1 Hz - 5 Hz olup daha derinden bilgi elde edilebilmektedir. Dolayısıyla, Şekil 12'de verilen ve SPAC yöntemi ile elde edilen V_s 'nin derinliğe bağlı değişiminde sığ kesimdeki çözünürlük MASW yöntemine göre daha düşük olmasına karşın, V_s 'nin derinlikle değişimi her iki ölçüm noktası için uyumludur.

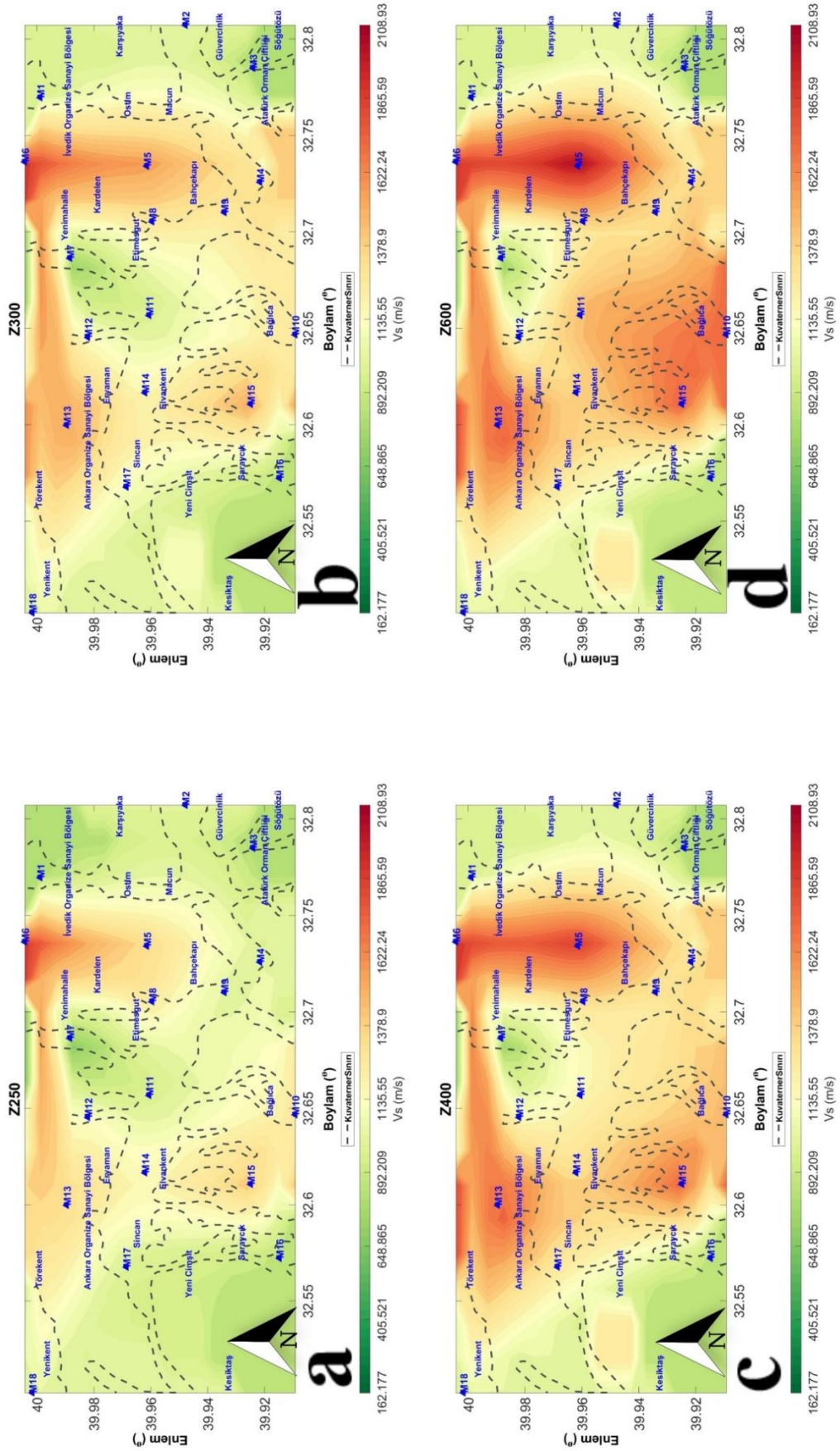
Araştırma bölgesinde 18 farklı merkez noktasında ölçülen mikro titreşim kayıtları üzerinde HVSR yöntemi (Nakamura, 1989, 2000) kullanılarak ölçüm noktalarına ait rezonans periyodu ve sismik genlik büyütme çarpanı değerleri haritalanmıştır. Haritalama işleminde nearest neighbour algoritması (en yakın komşuluk metodu) (Friedman, 1977) kullanılmıştır. Şekil 13'de 4 numaralı ölçüm noktasında merkez istasyonu mikro titreşim kaydı kullanarak hesaplanan transfer fonksiyonu (H/V spektrumu) analizde kullanılan 30 s uzunluğundaki pencereler ile birlikte örnek olarak gösterilmiştir. Şekil 14'de verilen rezonans periyodu haritasında, araştırma bölgesinin kuzey kesiminde Sincan - Eryaman - Yenimahalle doğrultusunda bulunan kuşak boyunca yer rezonans periyodu 0.5 s - 0.76 s aralığında (1.3 Hz - 2.0 Hz frekans bandında), doğu kesiminde Karşıyaka - Güvercinlik bölgesinde ise 0.4 s - 0.5 s aralığında (2.0 Hz - 2.5 Hz frekans bandında) değişmektedir. Yenikent - Saraycık - Bağlıca - Bahcekapı ve İvedik Organize Sanayi Bölgesi (OSB)'ni içeren ve bölgenin batı - güneybatısından kuzeydoğu doğrultusunda oluşan kuşakta 1 s - 1.7 s aralığında (0.58 Hz - 1.0 Hz frekans bandında) değişmektedir. Söz konusu bu bölge yoğun olarak Kuvaterner alüvyon üzerinde bulunmaktadır.



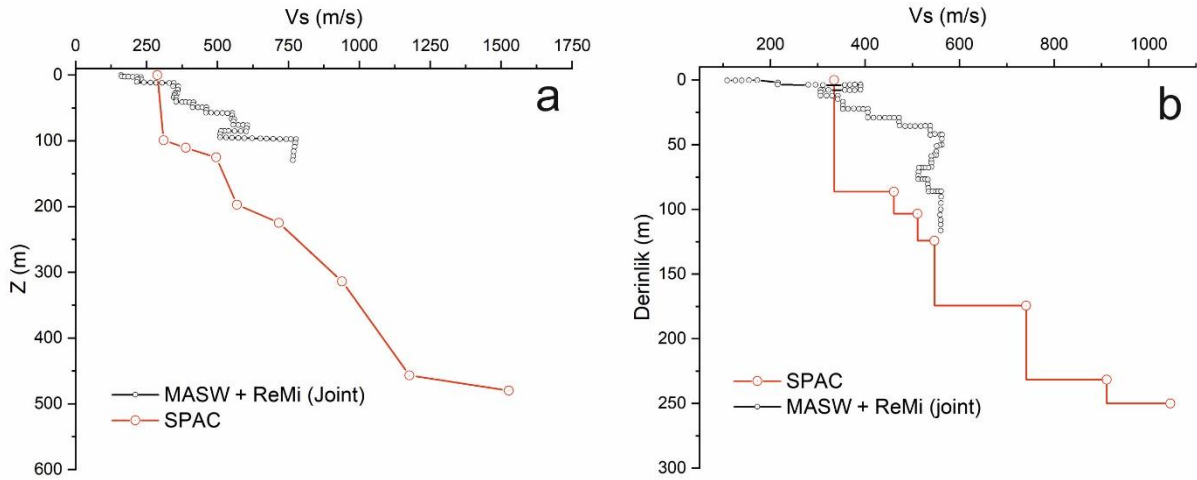
Şekil 9. V_s Derinlik Seviyesi a) 30 m, b) 50 m, c) 75 m, d) 100 m



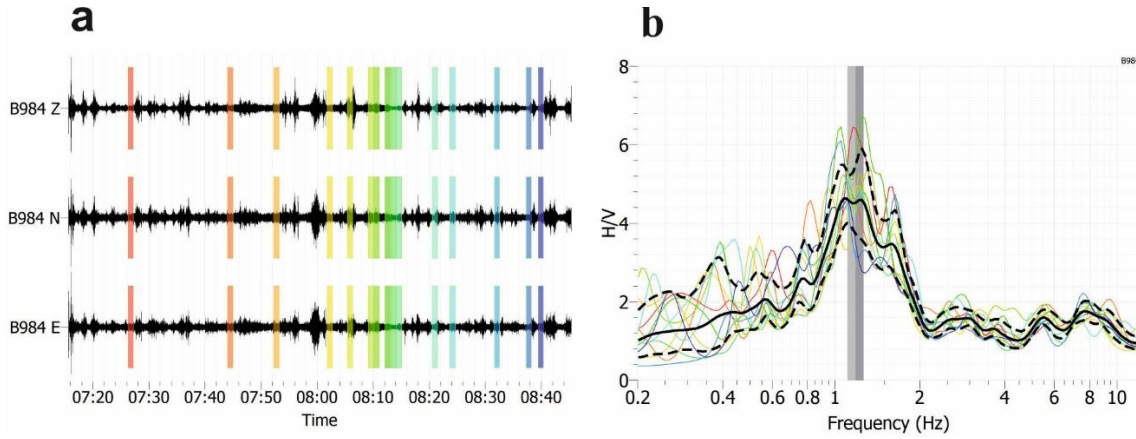
Şekil 10. Vs Derinlik Seviyesi a) 125 m, b) 150 m, c) 175 m, d) 200 m



Şekil 11. Vs Derinlik Seviyesi a) 250 m, b) 300 m, c) 400 m, d) 600 m.



Şekil 12. a) 11 (Etimesgut) ve b) 18 (Yenikent) SPAC ölçüm Noktalarına Yakın Alanda Başokur vd. (2010) Tarafından Yapılan MASW-Remi Birleşik Çözüm Sonuçları ile Karşılaştırılması

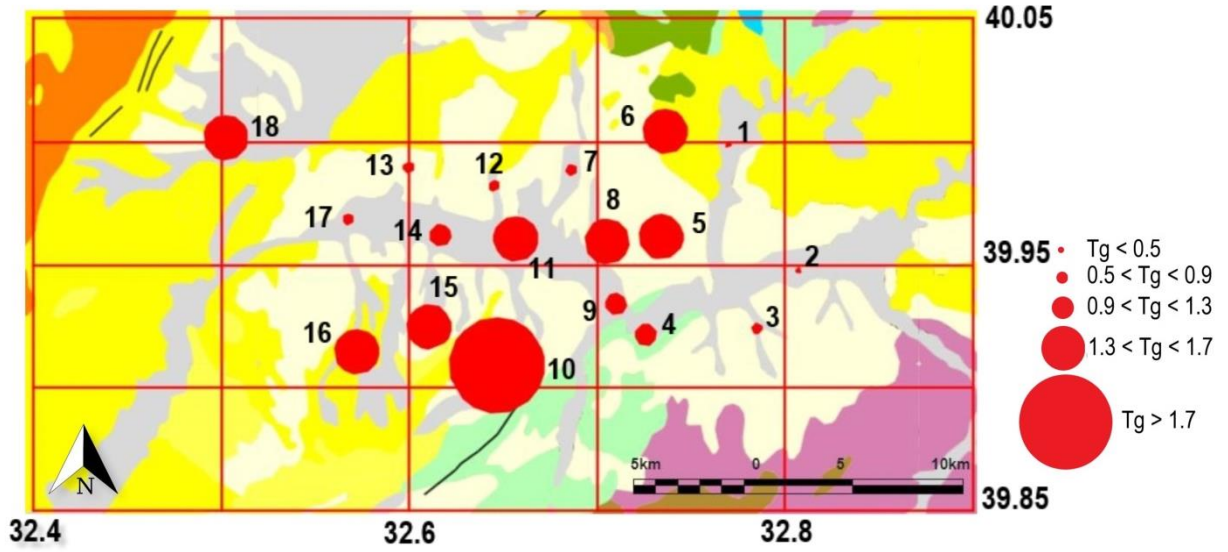
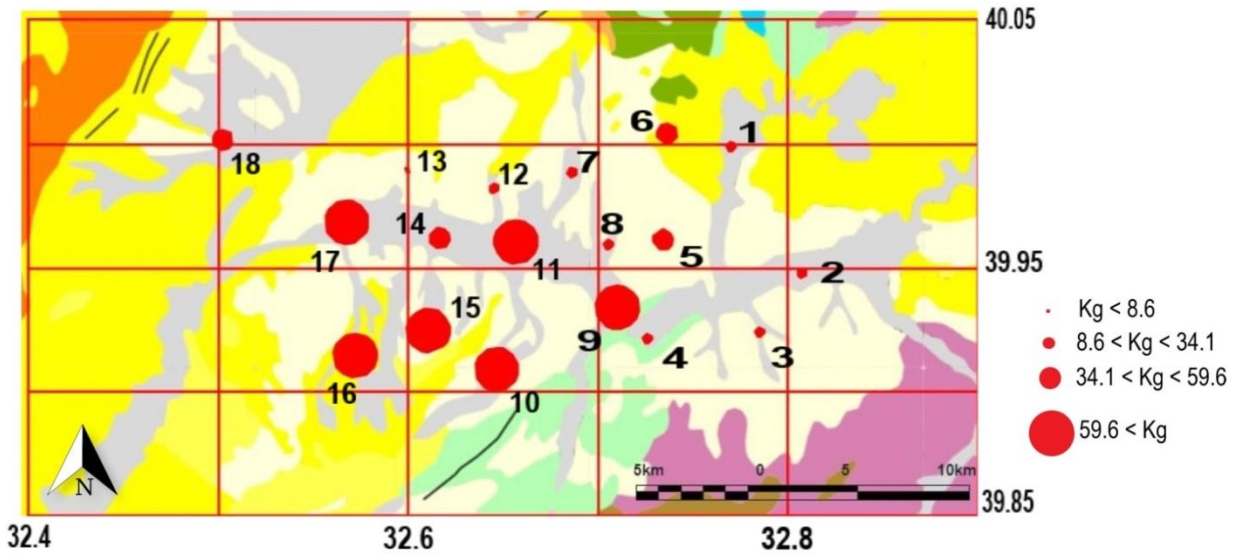


Şekil 13. a) 4 Numaralı Mikro Titreşim Kaydı ve B) HVSR Yöntemi ile Hesaplanan Transfer Fonksiyonu

Nakamura (1997)'a göre yer zayıflık göstergesi K_g , (vulnerability index) (5) bağıntısı ile hesaplanır ve 20 ve üzeri değerlerini gösteren bölgeleri zayıf olarak tanımlanır.

$$K_g = \frac{A_g^2}{f_g} \quad (5)$$

Şekil 15'te verilen araştırma bölgesi zayıflık göstergesi K_g haritasına göre; bölgenin güney batısını oluşturan Bağlıca, Saraycık ve Kesiktaş bölgesi ($K_g > 50$) ile kuzey doğu alanını oluşturan İvedik OSB - Bahçekapı ($K_g > 25$) bölgesinin deprem gibi dinamik kuvvete maruz kalması durumunda oldukça zayıf davranış gösterebileceğine (büyük makaslama deformasyonlarının gelişebileceği) işaret etmektedir. Yer sismik dalga genliği büyütme çarpanı üzerinde sığ birimin kalınlığının yanında yüzey ve temel kaya topoğrafyasının da etkin olduğu literatürden bilinmektedir (Athanasopoulos vd, 1999; Dikmen ve Mirzaoğlu, 2005; Garcia-Perez vd. , 2021). Şekil 15'te verilen yer zayıflık göstergesi haritasında yüksek K_g değerleri ($K_g > 25$) gösteren bölgenin hemen hemen tamamı Kuvaterner alüvyon üzerinde bulunmaktadır. Bu nedenle, sismik genlik büyütme çarpanının bu alanda büyük değerleri almasında zemin tabakasının kalınlığının yanında yüzey ve mühendislik temel kaya topoğrafyasının da etkin olduğunu göstermektedir.

Şekil 14. Araştırma Bölgesi Rezonans Periyod (T_g) HaritasıŞekil 15. Araştırma Bölgesi Zayıflık İndeks (K_g) Haritası

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, günümüzde hızlı yapılaşmanın devam ettiği ve Ankara nüfusunun üçte birinin yaşam alanı olan Sincan, Eryaman, Etimesgut bölgelerini kapsayan alanda Kuvaterner yaşlı alüvyon birimin derinliğinin ve makaslama dalgası hızının derinlikle değişiminin belirlenmesi amacıyla 18 farklı noktada dairesel dizilimle mikro titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mikro titreşim kayıtları SPAC yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve V_s - derinlik değişimi belirlenmiştir. Ayrıca, mikro titreşim kayıtları üzerinde rezonans periyotları ve yer zayıflık göstergesi olarak bilinen K_g değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıda verilen dört madde ile özetlenebilir;

1. Bölgede Kuvaterner yaşlı birimin geçmiş çalışmalarında tahmin edilenden daha kalın olduğunu ve yer yer 300m'ye kadar ulaştığını,
2. Rezonans periyotlarının Ankara Çayı yatağının üzerindeki kesimde 1.5 s'e kadar çıktığını; Karşıyaka, Güvercinlik ile Sincan ve Eryaman'ın kuzey kesimlerinde ise 0.4 s - 0.76 s aralığında olduğunu,
3. Çalışma bölgesinin özellikle Bağlıca, Saraycık, Sincan ve Kesiktaş bölgesini kapsayan güneybatı kesiminde yer zayıflık göstergesi (Kg)'nin yüksek olduğunu ve yıkıcı deprem durumunda bu bölge zeminlerinin yüksek makaslama deformasyonları gösterebileceğini,
4. Makaslama dalgası hızının 760 m/s ve üzeri değerleri gösterdiği topoğrafya derinliği (mühendislik temel seviyesi), yüzeyden itibaren ilk 30 m'den başlayarak, yaklaşık 200m derinliğe kadar değişebilmektedir. Rezonans periyotlarının ve mühendislik temel topoğrafyasında büyük değişimlerin görüldüğü bölgede, üst yapı özellikleri (kat sayısı, türü, yüksekliği vb.) dikkate alındığında, yakın sismik kaynaklarda oluşabilecek olası yıkıcı bir depremde yer-yapı uyumuna aykırı davranışların görülebilecektir.

NOT: Bu çalışma, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 19L0443013 nolu "Ankara İlinin Batısı (Etimesgut-Sincan-Eryaman) Zeminlerinin Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 35, 415 – 457.
- Aki, K. (1965). A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the Earth's crust. *Geophysics*, 30, 665 – 666.
- Ankara Kalkınma Ajansı, İstatistiklerle Ankara, (2016) Raporu, Ankara.
- Athanasopoulos, G. A. Pelekis, P. C. Leonidou, E. A. (1999). Effects of surface topography on seismic ground response in the Egeion (Greece) 15 June 1995 earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 18, 135-149.
- Aydın, K. (2010). *Ankara metro güzergâhlarında SPT – Vs korelasyonu üzerine bir çalışma*, (Yayımlanmamış Y. Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Başokur, A. T. (Ed.) (2010). Ankara Kenti Batısındaki Zeminlerin Jeolojik-Jeofizik-Jeoteknik Özellikleri ve Dinamik Davranışı, Ankara Üniversitesi Yayınları No:270, ISBN 978-975-482-886-3.
- Chávez-García, F. J. Rodríguez, M. Stephenson, W. R. (2005). An alternative approach to the SPAC Analysis of Microtremors: Exploiting stationarity of Noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95:1, 277 - 293.
- Chen, X. (1993). A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space., *Geophys. J. Int.*, 115, 391 - 409.
- Cordier, J. P. (1985). Velocity of Seismic Waves, Relationships with the Theory of Elasticity, Variation Factors. In: *Velocities in Reflection Seismology*. Seismology and Exploration Geophysics, vol 3. Springer.
- Dikmen, Ü. Mirzaoğlu, M. (2005). The seismic microzonation map of Yenisehir-Bursa, NW of Turkey by means of ambient noise measurements. *Journal of The Balkan Geophysical Society*, 8 (2), 53 – 62.
- Dimri, V. (1992). Deconvolution and inverse theory. Application to geophysical problems. *Methods in geochemistry and geophysics.*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Vol. 29

Erol, O. (1961). Ankara bölgesinin tektonik gelişmesi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bult.*, 7, 57 – 85.

D. S. İ 5. Bölge Baş Mühendisliği'nin Sondaj logları.

Friedman, J. H. Bentley, J. Finkel, R. A. (1977). An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 3(3), 209–226.

Garcia-Perez, T. Ferreira, A. M. G. Yanez, G. Iturrieta, P. Cembrano, J. (2021). Effects of topography and basins on seismic wave amplification: the Northern Chile coastal cliff and intramountainous basins, *Geophys. J. Int.*, 227, 1143–1167.

Gökten, E. Baran, B. (1999). Earthquake risks of the neotectonic structures in the surrounding regions of Ankara. *International Conference on Earthquake Hazard and Risk in the Mediterranean Region*, p. 134.

Hidaka, E. (1985). *Phase velocity of Rayleigh waves and S-wave velocity distribution estimated from long-period microtremors*, (Unpublished M. Sc. Dissertation), Hokkaido University (in Japanese).

Hisada, Y. (1994). An efficient method for computing Green's functions for a layered Half-space with sources and receivers at close depths. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol: 84 (5), pp: 1456 – 1472.

Koçkar, M. K. (2006). *Engineering Geological and Geotechnical Site Characterization and Determination of the Seismic Hazards of Upper Pliocene and Quaternary Deposits Situated Towards the West of Ankara*, (Unpublished Ph. D. Dissertation), Middle East Technical University/The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Ankara, Turkey.

Koçyiğit, A. (1991). Changing stress orientation in progressive intercontinental deformation as indicated by the neotectonics of Ankara Region. NW Central Anatolia. *TAPG Bulletin*, 31, 43 - 55, Ankara.

Koçyiğit, A. (2008a). Ankara'nın depremselliği ve 2005-2007 Afşar (Bala-Ankara) Depremlerinin Kaynağı. *M.T.A Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, s.1 - 7.

Koçyiğit, A. (2008b). Ankara Orogenic phase, its age and Transition From Thrusting-dominated Paleotectonic Period to the strike-slip Neotectonic Period, Ankara (Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, p.433 - 459.

Lai, C. G. Rix, G. J. (1998). *Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization*. (Unpublished Ph. D Dissertation), Georgia Institute of Technology/School of Civil and Environmental Engineering, Georgia.

Ling, S. Okada, H. (1993). An extended use of the spatial autocorrelation method for the estimation of geological structure using microtremors. *Proc. 89th Conf. SEGJ*. 44 – 48 (in Japanese).

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly. Report of RailwayTech. Res. Inst.* 30, No. 1, 25 – 33.

Nakamura, Y. (1997). Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures using Microtremor, *World Congress on Railway Research*, Florence, Extended Abstract Book, 1-7.

Nakamura, Y. (2000). Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Application. *World Conference of Earthquake Engineering*, Auckland.

Okada, H. Sakajiri, N. (1983). Estimates of an S-wave velocity distribution using long-period microtremors. *Geophys. Bull., Hokkaido University*, 42, pp: 119 - 143 (in Japanese).

Okada, H. (2003). *The Microtremor Survey Method*, Geophysical Monograph Series no. 12, SEG, Tulsa.

Pampal, S. Özmen, B. Koçkar M. (2008). Ankara'nın depremselliği. Ankara'nın Deprem Tehlikesi ve Riski Çalışmayı Bildiriler Kitabı (Eds: S. Pampal ve B. Özmen), 55 – 74.

Tabban, A. (1976). Ankara'nın deprem bölgesinde bulunmasının nedenleri, *Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni*, 14, 1-34.

TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği: Deprem Etkisi Altında Bina Tasarımı için Esaslar, Türkiye Cumhuriyeti, Ankara.

Vaezi, Y. Van der Baan, M. (2015). Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection, *Geophysical Journal International*, 203,3, pp. 1896-1908.

URL 1, Yerbilimleri Harita Görüntüleyici (mta.gov.tr) (Son Erişim: 01.04.2022)

URL2, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/> (Son Erişim: 13.11.2021)