

Bir Boyutlu Dinamik Analiz ve Mikrotremor Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Ozan SUBAŞI¹

M. Emre HAŞAL²

Bilal ÖZASLAN³

Recep İYİSAN⁴

Hiroaki YAMANAKA⁵

Kosuke CHIMOTO⁶

ÖZ

Depremler sırasında zemin tabakalarında oluşan deformasyon seviyeleri, yapı-zemin etkileşiminde önemli rol oynamaktadır. Kuvvetli yer hareketi kayıtları kullanılarak yapılan bir boyutlu (1D) dinamik analizlerle yüzeye yakın zemin tabakaları için hesaplanan kayma şekil değiştirmeleri; küçük genlikli titreşimler-mikrotremor verisi analiz sonuçlarının, tasarım yer hareketine ait en büyük yatay ivme değeriyle birlikte değerlendirilmesiyle de tahmin edilebilmektedir. Bu çalışmada, Kuzey Anadolu Fay Hattına yakın bir bölgede zemin tabakalarının deprem hareketi karşısındaki davranışı; hem 14 farklı anakaya ivme kaydı kullanılarak yapılan 1D eşdeğer lineer dinamik analizlerle hem de mikrotremor ölçümlerinin analizi yardımıyla elde edilmiştir. Verilerin değerlendirilmesi sonucunda, kuvvetli yer hareketi sırasında yüzeye yakın zemin tabakalarında oluşacak kayma birim şekil değiştirmesinin belirlenebilmesi amacıyla; elastik ve elasto-plastik deformasyon seviyelerini kapsayan bir bağıntı önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 1D dinamik analiz, mikrotremor, kayma birim şekil değiştirmesi.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 28 Şubat 2018 günü ulaşmıştır. 01 Şubat 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.399710>

1 Türk-Alman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ozansb@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0001-6931-0590>

2 Bursa Büyükşehir Belediyesi, Fen İşleri Dairesi Bşk., Bursa - murat.hasal@bursa.bel.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3466-7885>

3 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ozaslan@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-7951-1759>

4 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - iyisan@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-0887-9983>

5 Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japonya - yamanaka@depe.titech.ac.jp - <https://orcid.org/0000-0002-5937-4707>

6 Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japonya - chimoto.k.aa@m.titech.ac.jp - <https://orcid.org/0000-0003-0117-5868>

ABSTRACT

Comparison of One Dimensional Dynamic Analysis and Microtremor Measurement Results

The deformation level of the surface soil layer due to strong ground motion has a considerable effect in soil-structure interaction problems. The shear strain values of the near surface soil deposits which are calculated by one dimensional (1D) seismic site response analyses can also be estimated by incorporating the results obtained from Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) analysis of microtremor data and peak horizontal acceleration value of design ground motion. In this study, the seismic behaviors of soil layers at a site located in the vicinity of North Anatolian Fault were estimated by using the results of both 1D equivalent linear seismic site response analyses for 14 different seismic excitation records and HVSr analyses of ground ambient noise-microtremor measurement data. A correlation is proposed for elastic and elasto-plastic deformation levels of surface soil layers in order to estimate the value of shear strain due to strong ground motion.

Keywords: 1D seismic site response analysis, microtremor, shear strain.

1. GİRİŞ

Depremler sırasında oluşan kuvvetli yer hareketinin mühendislik yapılarında meydana getirdiği hasarı etkileyen faktörler, deprem kaynak özellikleri, yerel zemin koşulları ve üstyapı özellikleridir. Yerel zemin koşulları ve deprem kaynak özellikleri, zemin yüzeyinde oluşan kuvvetli yer hareketinin özelliklerini, bu özelliklerin yerel değişimi ise yapısal hasar dağılımını etkilemektedir. Bu nedenle depreme dayanıklı yapı tasarımında; deprem kaynak özellikleri, yerel zemin koşulları ve yapıların mühendislik özellikleri birlikte dikkate alınmalıdır. Deprem hareketi nedeniyle yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelen kayma deformasyonlarının seviyesi, yapılarda oluşan hasar dağılımının sahadaki değişiminde etkili olmaktadır. Kuvvetli yer hareketi sırasında yüzeye yakın zemin tabakalarında oluşacak kayma birim şekil değiştirmesinin sismik anakayadaki tasarım hareketinin şiddetine bağlı olarak doğru biçimde öngörülebilmesi, zemin yapılarında ve üstyapılarda deprem sırasında oluşacak olumsuz etkileri en aza indirecek mühendislik çözümlerinin geliştirilmesinde önemli katkı sağlayacaktır. Tasarım yer hareketi karşısında yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelecek kayma deformasyonu değerlerinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi amacıyla, farklı malzeme modellerinin ve hesap yöntemlerinin kullanıldığı bir, iki ve üç boyutlu sayısal dinamik analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bir boyutlu analiz yöntemlerinde, zemin kesitindeki tabakaların dinamik özellikleri, kalınlıkları, sismik anakaya derinliği yeterli olmakta, iki ve üç boyutlu analiz yöntemlerinde ise tabakaların iki veya üç boyutlu geometrisi ve sınır şartlarına da ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca analizlerde kullanılan sismik anakaya hareketinin karakteristiklerinin depremin kaynak özelliklerini doğru biçimde yansıtması gerekmektedir. Kuvvetli yer hareketi sırasında yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelecek kayma şekil değiştirmesi değerlerinin; basit ve uygulama kolaylığına sahip yöntemlerle yaklaşık olarak elde edilmesi, deprem hareketinin yüzeyde oluşturacağı etkilerin belirlenmesinde önemli rol oynayacaktır [1]. Bununla birlikte yüzeye yakın zemin tabakalarında kuvvetli yer hareketine bağlı oluşacak kayma deformasyonlarının belirlenmesinde; mikrotremor ölçümleri de alternatif bir tahmin yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Mikrotremor ölçümleri;

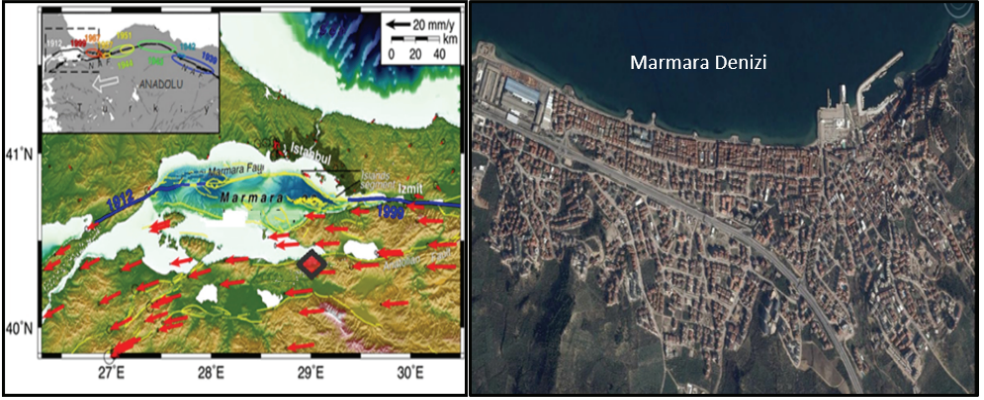
uygulama kolaylığı, düşük maliyeti, veri kayıt ve analiz sürelerinin görece kısıllığı sebebiyle tercih edilmektedir. Mikron mertebesindeki (10^{-2} ~ 10^{-3} mm) çok küçük genlikli yer hareketinden oluşan mikrotremorlar, zemin tabakaları arasındaki rijitlik farklılığının meydana getirdiği empedans (özgül direnç) oranına bağlı büyütme dışında; tabakalara ait Poisson Oranı, titreşim kaynaklarının karakteri, derinliği ve uzaklığı vb. parametrelerden büyük oranda etkilenmektedir. Zemin yüzeyinde alınan üç bileşenli tekil mikrotremor kayıtlarının H/V (yatay/düşey) Spektral Oran yöntemiyle analizi yapılarak, sahaya ait hakim periyot ve spektral büyütme değerleri elde edilebilmektedir [2]. Kuvvetli yer hareketi özellikleri ile arasında kuramsal farklılık olmasına rağmen, mikrotremor ve zayıf yer hareketi ölçümleri; geoteknik deprem mühendisliğinde kuvvetli yer hareketi karşısında zemin tabakalarının gösterdiği dinamik davranışı tahmin etmekte, yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde, mikrotremor ölçümlerinin H/V Spektral Oran yöntemiyle analizi esasına dayanan ve mikrotremor kayıtlarından elde edilen büyütme değerleriyle kuvvetli yer hareketinin analizi veya zemin tabakalarının bir boyutlu dinamik analizi sonucunda hesaplanan büyütme değerlerini karşılaştıran birçok çalışma mevcuttur [3, 4].

Bu çalışmada küçük genlikli titreşimler olarak bilinen mikrotremor ölçümlerinin Nakamura (2008) tarafından önerilen yöntemle elde edilen kayma şekil değiştirmeleri, sismik anakaya mostrasında kaydedilmiş farklı ivme-zaman geçmişleri kullanılarak yapılan bir boyutlu-1D dinamik analizlerden hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. İnceleme bölgesinde daha önce zemin etüdü sondajlarının yapıldığı noktalarda 6 adet eş zamanlı çoklu (Array) ve 15 adet tekil mikrotremor kayıtları alınmıştır. Eş zamanlı mikrotremor ölçüm kayıtları SPAC (Uzamsal Özilişki) yöntemi ile analiz edilerek kayma dalgası hızının derinlikle değişimi belirlenmiştir. Ayrıca, inceleme sahalarında daha önce yapılan zemin etüdü sondajı verileri, Standart Penetrasyon Deneyi darbe sayısı (SPT-N) ve laboratuvar deneyi sonuçları derlenmiş; bu veriler, eş zamanlı mikrotremor ölçümlerinden elde edilen kayma dalgası hızının derinlikle değişimi ile birlikte değerlendirilerek ölçüm yapılan sahalarda zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu zemin modelleri üzerinde en büyük mutlak ivme değerleri (a_{maks_kaya}) 0.3 g, 0.4 g ve 0.5 g olan 14 farklı anakaya mostrası ivme zaman geçmişi kullanılarak, bir boyutlu (1D) eşdeğer lineer dinamik analizler yapılmış ve yüzeye yakın zemin tabakaları için kayma şekil değiştirmeleri elde edilmiştir. Yapılan tekil mikrotremor ölçümleri; H/V Spektral Oran yöntemine göre analiz edilmiş, zemin büyütmesi ile hakim periyot değerleri ve bunlara bağlı Nakamura İndisi (K_g) değerleri hesaplanmıştır. Nakamura İndisi değerlerinin sahadaki sismik anakaya için öngörülen en büyük mutlak ivme değerleriyle birlikte ele alınması sonucunda yüzeye yakın zemin tabakaları için efektif kayma şekil değiştirmesi değerleri (γ_e) hesaplanmıştır [4]. Tekil mikrotremor ölçümlerinden elde edilen efektif kayma şekil değiştirmesi değerleri 1D analizlerden bulunanlarla (γ_{1D}) karşılaştırılmış ve aralarındaki ilişki araştırılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE YEREL ZEMİN KOŞULLARI

İnceleme bölgesi Marmara Denizi'nin güneydoğusunda, Gemlik Fayı yakınında yer almakta ve deniz kıyısından yaklaşık 500 m içeriye uzanan, 2 km uzunluğunda sahil şeridi içinde bulunmaktadır. Söz konusu bölgede yer alan düzlükler, kıyı çökelleri ve alüvyonlar ile kaplı olup kıyı şeridine paralel bir şekilde uzanmaktadır. Sahil şeridinin güneyinde yer alan alüvyon tabakası doğu-batı doğrultusunda uzanmaktadır. Neojen döneme ait konglomera, kumtaşı, kiltası, marn ve kireçtaşı aralanması, alüvyon ve sahil çökelinin güneyindeki

tepelik alanlarda gözlenmektedir. İnceleme bölgesinin güneydoğusunda Eosen döneme ait andezitlerden oluşan volkanik birimler yer almaktadır. Triyas yaşlı kaya mostraları bölgenin doğusunda gözlenmektedir. Kuvaterner yaşlı alüvyonlar, bataklık çökelleri ve kıyı çökelleri ile Neojen yaşlı konglomera, kumtaşı, kiltası, kireçtaşı ve marndan oluşan çökeller bölgenin esas jeolojisini oluşturmaktadır [5]. Bölgedeki alüvyonlar genellikle çakıllı kumlu kil ve siltli kil şeklinde ince taneli çökellerden, kıyı çökelleri ise genellikle çakıllı siltli kum zeminden oluşmaktadır. Marmara Bölgesi sınırlarında bulunan çalışma sahasının yeri ve uydu görünümü Şekil 1’de verilmiştir.



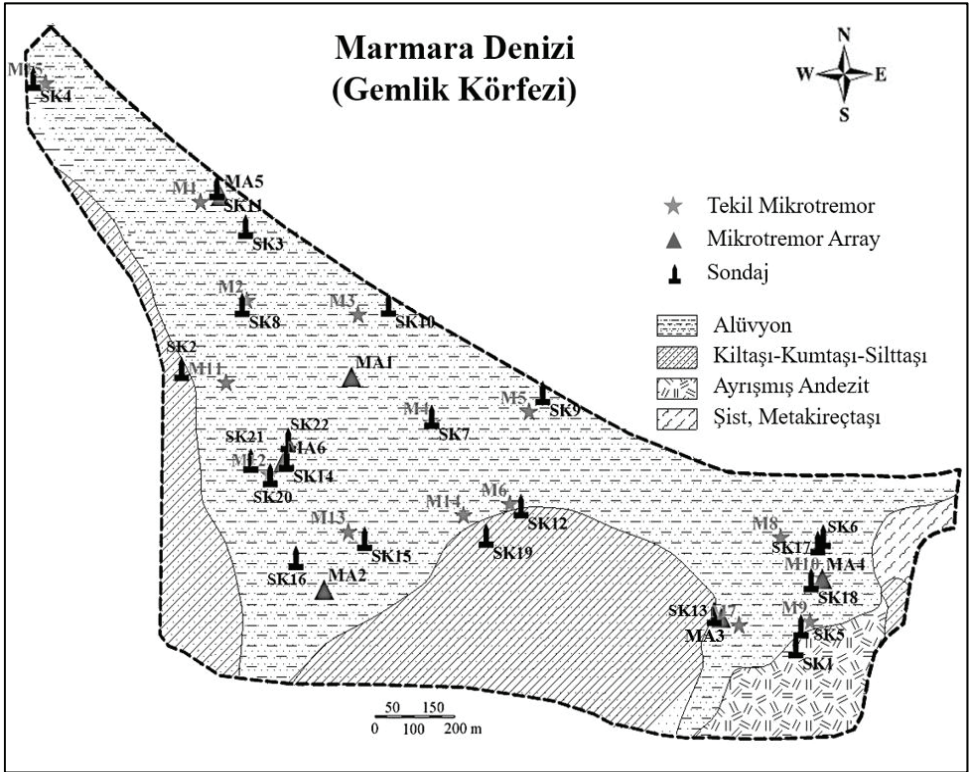
Şekil 1 - Çalışma Sahasının Yeri ve Uydu Görünümü

İnceleme bölgesinde yapılan ve derinlikleri yaklaşık 15~35 m olan sondaj çalışmalarının sonucunda, zemin kesitinin yer yer çakıl içeriği yüksek kumlu kil-killi siltli kum tabakalarından meydana gelmiş alüvyondan, siltli kum-siltli çakıl içerikli deniz çökeline ve ayrılmış Neojen çökellerinden oluştuğu belirlenmiştir. İnceleme sahasının büyük bir bölümünde zemin yüzeyinden itibaren 30 m derinlikte, orta katı-katı siltli kil ve yer yer çakıl bantı içerikli orta sıkı siltli kum tabakalarının araldanmasından oluşan alüvyon yer almaktadır (Şekil 2). İnceleme sahasının güneyinde ve batısında, zemin yüzeyinde çok katı-katı kumlu kil tabakası ve altında ise Neojen yaşlı ayrılmış kumtaşı-kiltası-silttaşı-marn araldanması yer almaktadır. Sahanın doğusunda ise zemin yüzeyinden itibaren ilk 20 m derinlikte; yer yer orta sıkı siltli kum tabakaları içeren orta katı-katı kumlu kilden meydana gelmiş alüvyon mevcut olup, altında ise ayrılmış andezit, şist ve meta-kireçtaşı birimleri mevcuttur [6].

3. ARAZİ DENEYLERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada; inceleme sahasında daha önce yapılmış olan derinlikleri 15 m ile 35 m arasında değişen 22 adet sondaj noktasının yakınılarında 15 adet tekil ve 6 adet çoklu eş zamanlı olmak üzere toplamda 21 adet mikrotremor ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bölgede önceden yapılan sondajların ve bu çalışma kapsamında yapılan mikrotremor ölçüm noktalarının yerleşim planı Şekil 2’de gösterilmiştir. Sondajlar sırasında uygulanmış penetrasyon deneylerinden

elde edilen SPT-N sayıları, alınan numuneler üzerinde uygulanan laboratuvar deney sonuçları, eş zamanlı mikrotremor ölçümlerinin SPAC analizinden elde edilen kayma dalgası hızının derinlikle değişimi birlikte değerlendirilerek her sondaj noktasında bir boyutlu dinamik analizler için serbest zemin modelleri oluşturulmuştur. Aynı noktalarda yapılan tekil mikrotremor ölçüm sonuçlarından H/V Spektral Oranı yöntemi kullanılarak, zemin hakim periyodu (T_0) ile zemin büyütmesi (A_g) değerleri elde edilmiş ve bunlara bağlı olarak hasar görebilirlik indisi değerleri hesaplanmıştır. Tekil mikrotremor kayıtlarının analiz sonuçları, sismik anakaya için öngörülen yer hareketinin en büyük ivme değeriyle birlikte ele alınarak kayma birim şekil değiştirmeleri belirlenmiştir.



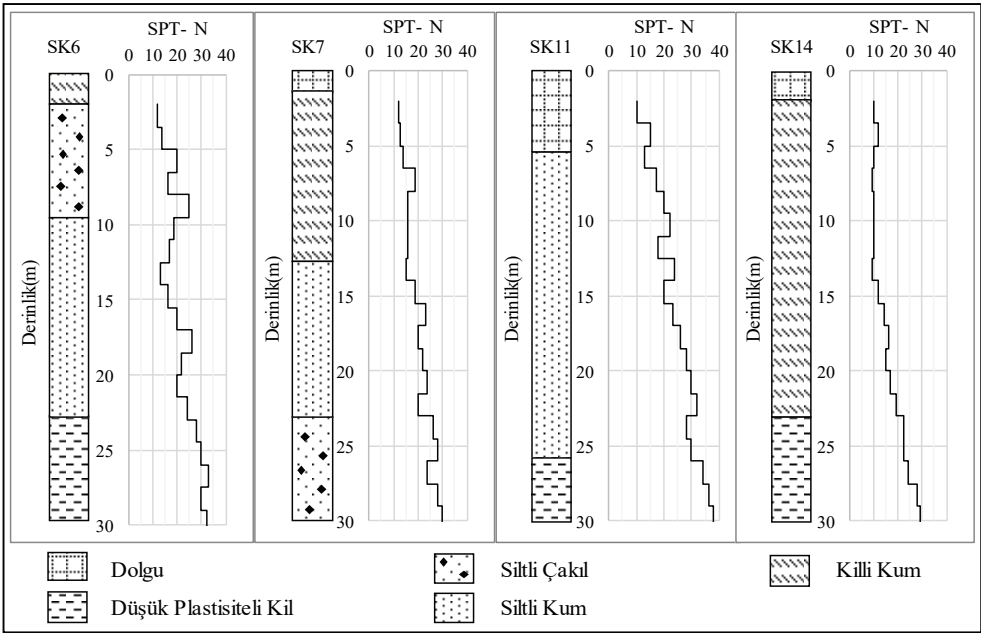
Şekil 2 - İnceleme Sahası Genel Zemin Koşulları, Sondaj ve Mikrotremor Ölçüm Noktaları Yerleşim Planı

3.1. Sondajlar ve Penetrasyon Deneyleri

İnceleme bölgesinde geoteknik incelemeler kapsamında zemin kesitinde yer alan tabakaların cinslerini, kalınlıklarını ve özelliklerini belirlemek amacıyla önceden yapılmış 22 adet zemin araştırma sondajına ait veriler derlenmiştir. Çalışma sahasında yapılmış sondaj kuyularına ait

örnek kesitler ile bu kuyular içinde yapılmış arazi penetrasyon deneylerinden elde edilen SPT-N sayılarının derinlikle değişimi Şekil 3'te verilmiştir.

Yapılan sondajlardan, zemin kesitinde üstte kalınlığı 1~5 m olan dolgu tabakası altında kalınlığı yer yer 20 m'ye ulaşan killi veya siltli kum birimler ile siltli çakıl tabakasının yer aldığı anlaşılmaktadır. Kum tabakası içinde SPT-N sayıları 10~20 arasında değişmekte, daha sonra derinlikle artarak 20~40 arasında değerler almaktadır. Sondajlarda yer altı su seviyesinin zemin yüzeyinden itibaren ortalama 5 m derinlikte ölçüldüğü belirtilmektedir. Sondajlar, arazi penetrasyon deneyleri, tekil ve eş zamanlı mikrotremor ölçümlerinden bulunan sonuçlar birlikte değerlendirilerek bir boyutlu dinamik analizlerde kullanılacak zemin modelleri oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında yapılmış olan bir boyutlu dinamik analizlerde kullanılmak üzere, oluşturulan zemin modellerinde yüze yakın zemin tabakalarının kayma dalgası hızının derinlikle değişimi SPT-N sayısına bağlı olarak belirlenmiştir [7].



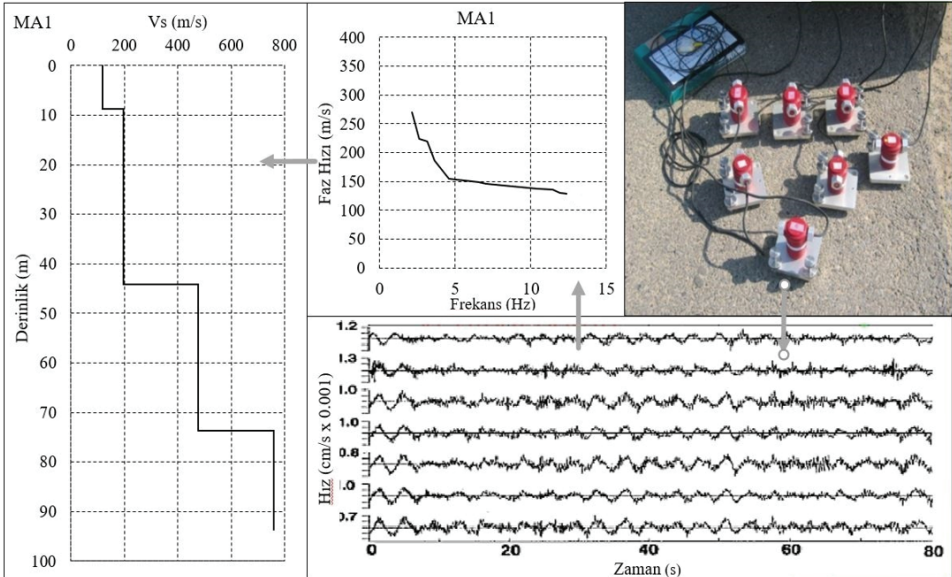
Şekil 3 - Sondajlardan Elde Edilen Zemin Kesiti ve SPT-N Sayılarının Derinlikle Değişimi

3.2. Eş Zamanlı Çoklu Mikrotremor Ölçümleri ve Kayma Dalgası Hızı

Mikrotremorlar 0.01~20 saniye arasında değişen periyotlara ve 10^{-2} - 10^{-3} mm arasında değişen genliklere sahip doğal ve yapay kaynak etkisindeki titreşimlerdir. Geoteknik mühendisliğinde tekil mikrotremor ölçümleri, hakim periyot ve büyütme gibi zemin tabakalarının dinamik davranış özelliklerini belirlemede kullanılırken, eş zamanlı mikrotremor ölçümleriyle de kayma dalgası hızının derinlikle değişimi ve sismik anakaya

derinliği belirlenebilmektedir [8, 9]. Ölçüm süresinin görece kısıtlılığı, uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti; mikrotremor ölçümlerinin geoteknik deprem mühendisliğindeki kullanılabilirliğini arttırmıştır. Derin alüvyonda kayma dalgası hızının (V_s) derinlikle değişimini belirlemek için; mikro titreşimlerin çoklu alıcılara yapılan dizi ölçümüne dayanan pasif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri tercih edilmektedir. Mikrotremorların oluşturduğu yüzey dalgalarının farklı frekanslarda farklı faz hızlarında harmonik dalgalardan meydana geldiği bilinmektedir. Yüzey-Rayleigh dalgası ölçümlerine dayalı yöntemlerin temelini dalga boylarının frekansa veya periyoda bağımlı olması oluşturmaktadır [10]. Diğer bir deyişle periyodu yüksek dalga bileşenlerinin derinde yer alan zemin tabakalarının, düşük periyotlu dalgaların ise yüzey yakın zemin tabakalarının dinamik davranışı hakkında bilgi sağladığı bilinmektedir. Zemin tabakalarının kayma dalgası hızının derinlikle değişimi, uygun frekans davranışına sahip alıcıların 5~50 m arasında değişen açıklıklarda yerleştirilmesiyle oluşturulan çoklu mikrotremor ölçüm ağları kullanılarak eş zamanlı olarak alınan yaklaşık 10~20 dakika uzunluğundaki kayıtların analizi ile belirlenebilmektedir [11]. Eş zamanlı çoklu mikrotremor ağ ölçüm yönteminde, mikrotremorların düşey bileşenleri kullanılarak, ağ içerisindeki her iki alıcı arasında ikili korelasyonlar oluşturularak spektral analizler yapılmaktadır.

Bu çalışmada, bir eşkenar üçgenin köşe noktaları ile kenarlarının orta noktalarına ve merkeze yerleştirilen toplam 7 adet alıcı ile oluşturulan düzende, 15 dakika süre ile eş zamanlı kayıtlar alınmıştır. İncelenen bölgede ölçüm yapılan her nokta için zemin tabakalarına ait faz hızlarının değişimini gösteren dispersiyon eğrileri elde edilmiştir. Sonrasında, dispersiyon eğrilerinin ters dönüşümüyle kayma dalgası hızlarının derinlikle değişimleri belirlenmiştir. Ölçümlerde kullanılan alıcılar, kayıt örneği, analizler sonucunda elde edilen dispersiyon eğrisi ve kayma dalgası hızının derinlikle değişimi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4 - Araziye Yapılan Eş Zamanlı Mikrotremor Ölçümleri

Arazi çalışmaları sonucunda elde edilen kayıtların analiz edilmesi sonucunda; zemin tabakalarına ait Rayleigh dalgası faz hızları elde edilmiştir. İkili korelasyon katsayılarından ters çözüm yapılarak kayma dalgası faz hızlarının belirlenmesi üzerine Aki (1957) tarafından geliştirilen yöntemde; ikili korelasyon katsayılarının elde edilmesi için oluşturulan bağıntı, Denklem 1’de verilmiştir.

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi\varphi(r=0, \omega)} \int_0^{2\pi} \varphi(r, \theta, \omega) d\theta \quad (1)$$

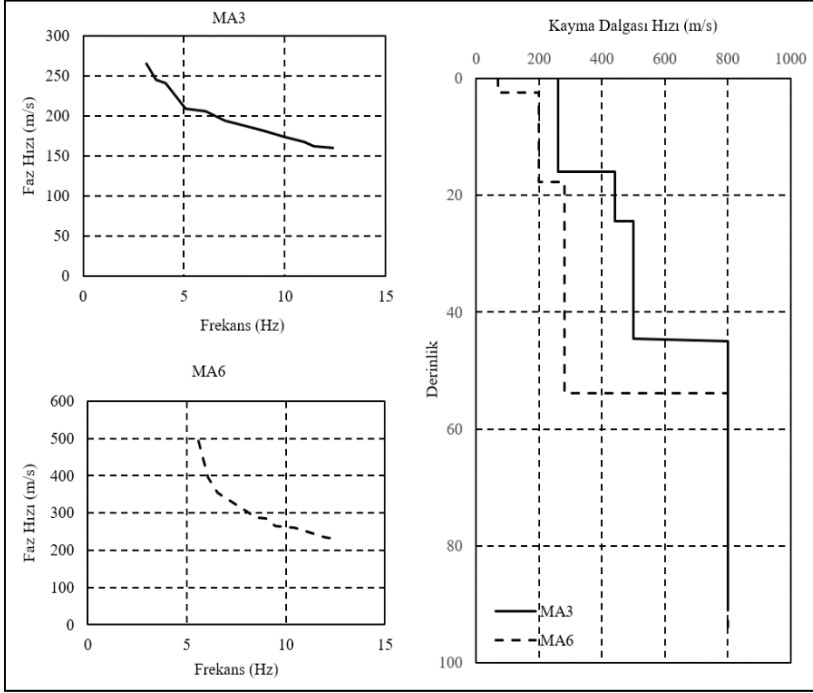
Denklemde; $\varphi(r=0, \omega)$, ortadaki ortalama otokorelasyonu ve $\varphi(r, \theta, \omega)$, iki alıcı arasındaki çapraz korelasyonu ifade eder. Bu yöntemde faz hızları, ikili korelasyon katsayıları $\rho(r, \omega)$ kullanılarak hesaplanmakta; farklı frekans (ω) değerlerinde, aralarında r kadar mesafe ve ortalama azimuth açısı (θ) bulunan bütün alıcı çiftleri arasında işlem yapılmaktadır.

Eşzamanlı mikrotremor ağ ölçümünden elde edilen gözlemsel dispersiyon eğrisindeki faz hızları ve eğer varsa sahada yapılmış zemin etüdü sondajlarından elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi yardımıyla teorik dispersiyon eğrisine altlık teşkil edecek bir boyutlu tabaka modeli oluşturulmaktadır. Bu modelde zemin tabakalarının homojen ortamda yatayda sonsuza uzandığı kabul edilmektedir. En uygun kayma dalgası hızının derinlikle değişiminin belirlenebilmesi amacıyla kullanılan ters çözüm yöntemi; gözlenen faz hızları ve tabakalı zemin modeli kullanılarak hesaplanan faz hızları arasındaki karesel farkların toplamı olan Misfit fonksiyonunun (E_i) en aza indirgenmesi esasına dayanır. Misfit fonksiyonu (E_i) Denklem 2 ile gösterildiği gibidir.

$$E_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [v_i^o - v_i^c]^2 \quad (2)$$

Bağıntıda N veri sayısını v_i^o ve v_i^c gözlenen ve hesaplanan Rayleigh dalgası faz hızlarını göstermektedir. İkili korelasyon katsayılarından faz hızı dispersiyon eğrilerinin elde edilmesi ve Genetik Algoritma yöntemiyle yapılan optimizasyona bağlı ters çözümle kayma dalgası hızının derinlikle değişiminin bulunmasıyla analiz tamamlanmaktadır [12]. Analizler sırasında elde edilen dispersiyon eğrisi ve kayma dalgası hızının derinlikle değişimi 3 ve 6 nolu eş zamanlı mikrotremor kayıtları için Şekil 5’te gösterilmiştir.

Yapılan çalışma kapsamında belirlenen ve yerleri Şekil 2’de gösterilen 6 ayrı ölçüm alanında 7 alıcı ile eş zamanlı mikrotremor ölçümler yapılmıştır. Her bir yerleşimde alınan kayıtlar analiz edilerek dispersiyon eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler; aynı sahalar için üç bileşenli tekil mikrotremor ölçümleri sonucunda elde edilen H/V Spektral Oran eğrileri ile birlikte değerlendirilmiş, daha sonra ters çözüm yöntemiyle, zemin tabakalarına ait kayma dalgası hızı profilleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında mühendislik anakayasası olarak, Eurocode 8’de tanımlanan kayma dalgası hızının $V_s=800$ m/s olduğu B sınıfı zemin referans alınmıştır [13]. Eş zamanlı mikrotremor ölçümlerinden elde edilen kayma dalgası hızının derinlikle değişimi incelendiğinde bir boyutlu dinamik analizlerde hassasiyetin artması amacıyla kullanılan SPT-N vuruş sayıları ile belirlenen kayma dalgası hızının derinlikle değişimi ile uyum gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 5 - Eşzamanlı Mikrotremor Ölçümlerinden Elde Edilen Dispersiyon Eğrileri ve Kayma Dalgası Hızının Derinlikle Değişimi

3.3. Tekil Mikrotremor Ölçümleri

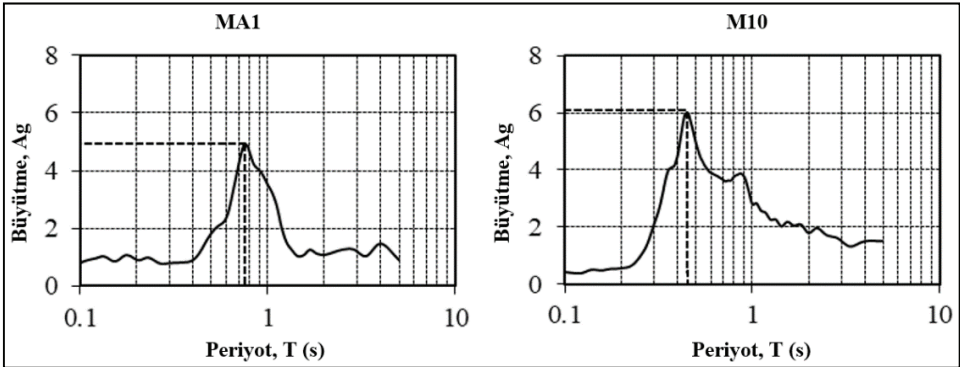
Mikrotremorlar ile kuvvetli yer hareketinin özellikleri arasında kuramsal farklılık olmasına rağmen, tekil mikrotremor ölçümlerinden ve kuvvetli yer hareketinin sayısal analizinden elde edilen hakim periyot değerleri birbirleriyle uyum göstermektedir [14]. Çalışma kapsamında belirlenen sahalarda yapılan tekil mikrotremor ölçümlerinde üç bileşenli Guralp CMG-40T alıcı ve Guralp CMG-DM24 sayısallaştırıcısından oluşan taşınabilir hızölçer seti kullanılmıştır. Mikrotremor ölçümlerine ait kayıtlar, H/V Spektral Oran yöntemine göre analiz edilerek hakim periyot ve zemin büyütmesi değerleri belirlenmiştir [15].

Yöntemin uygulanması için öncelikle sahada belirlenen 15 ayrı noktada tekil mikrotremor ölçümleri yapılmış üç bileşenli kayıtlar alınmıştır. Alınan kayıtlar; gürültüden arındırılabilmesi amacıyla alt pencerelere ayrılmış, 0.20 Hz ile 25 Hz aralığında bant geçiren filtre uygulanmış ve her bir pencere için Fourier genlik spektrumu belirlenmiştir. Kaydı oluşturan iki yatay bileşenin kuadratik ortalaması alınarak her bir pencere için yatay/düşey (H/V) Spektral Oran eğrisi elde edilmiştir. Bu oranın en büyük olduğu değer zemin büyütmesini (A_g), bu değere karşılık gelen periyot değeri ise hakim periyot değerine (T_0) karşılık gelmektedir [16]. Geopsy (2005) yazılımı kullanılarak yapılan H/V Spektral Oran analizlerinden elde edilen sonuçlar her bir ölçüm noktası için Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 - Mikrotremor Ölçümlerinde Elde Edilen Hakim Periyot ve Büyütme Değerleri

| Ölçüm No | Hakim Periyot (T_0) | Zemin Büyütmesi (A_g) | Ölçüm No | Hakim Periyot (T_0) | Zemin Büyütmesi (A_g) |
|----------|-------------------------|---------------------------|----------|-------------------------|---------------------------|
| MA1 | 0.77 | 4.8 | M05 | 0.63 | 3.4 |
| MA2 | 0.44 | 4.9 | M06 | 0.23 | 5.5 |
| MA3 | 0.38 | 3.9 | M07 | 0.37 | 3.9 |
| MA4 | 0.44 | 6.2 | M08 | 0.51 | 4.6 |
| MA5 | 0.71 | 3.9 | M09 | 0.10 | 4.9 |
| MA6 | 0.64 | 3.6 | M10 | 0.44 | 6.0 |
| M01 | 0.60 | 5.2 | M11 | 0.24 | 4.5 |
| M02 | 0.65 | 4.0 | M12 | 0.44 | 3.9 |
| M03 | 0.90 | 4.1 | M13 | 0.67 | 4.3 |
| M04 | 0.65 | 2.9 | M14 | 0.41 | 4.0 |
| M05 | 0.63 | 3.4 | M15 | 0.66 | 4.0 |

Bölgede alınan mikrotremor kayıtlarının analizleri sonucunda hakim periyot değerlerinin 0.24~0.90 sn ve zemin büyütmesi değerlerinin ise 2.9~6.2 arasında değiştiği belirlenmiştir. Çalışma sahasında yapılan mikrotremor ölçümlerine ait H/V Spektral Oran analizlerine örnek teşkil etmesi açısından; MA1 ve M10 kayıtlarına ait sonuçlar, düşey ekseninde zemin büyütmesi değeri (A_g), yatay ekseninde ise periyot değerleri olmak üzere Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6 - MA1 ve M10 Ölçümlerine Ait H/V Spektral Oran Analizi Sonuçları

3.4. Nakamura İndisi ve Yüzeydeki Efektif Kayma Şekil Değiştirmesi Değerleri

Nakamura (2008) tarafından önerilmiş olan sismik hasar görülebilirlik indisi (K_g), mikrotremor ölçümlerinin analizi sonucunda belirlenen zemin büyütmesi (A_g) ve hakim periyot (T_0)

değerleri kullanılarak Denklem 3 ile belirlenmektedir. Yüzeğe yakın zemin tabakalarında kuvvetli yer hareketi sırasında oluşacak kayma şekil değiştirmeleri (γ_e), hasar görebilirlik indisi ve taban sismik anakayası en büyük yatay ivme değerine bağlı olarak Denklem 4'te verildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$K_g = A_g^2 T_0 \quad (3)$$

$$\gamma_e = K_g C a_b \quad (4)$$

Nakamura tarafından önerilen bu yöntemde; efektif kayma şekil değiştirmesi değeri (γ_e), tekil mikrotremor ölçümünden elde edilen K_g değerinin taban sismik anakayası en büyük yatay ivme değeri (a_b) ve C katsayısı ile çarpılması ile elde edilmektedir. Bağlıntıdaki C katsayısı ise kuvvetli yer hareketinin verimliliğini tanımlayan (e) katsayısı ile taban sismik anakayasındaki kayma dalgası hızına (V_b) bağlı olarak Denklem 5'e göre hesaplanmaktadır. Bağlıntılarda ivme değeri (a_b) gal, V_b ise cm/s birimindedir. Verimlilik katsayısı e , deprem sırasında oluşan dinamik kuvvetin statik kuvvete oranı olarak tanımlanmış olup, $e=0.60$ olarak verilmektedir [4].

$$C = \frac{e}{\pi^2 V_b} \quad (5)$$

Bu çalışmada zemin dinamik davranış analizleri, yatay tabakalı serbest zemin modeli çerçevesinde taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketi altında doğrusal olmayan dinamik zemin özellikleri esas alınarak yapılmıştır. Serbest zemin modeline ait taban sismik anakayasında giriş hareketi olarak kullanılan ivme değerleri, anakaya mostrasında kaydedilip ölçeklendirilen gerçek deprem kayıtlarından oluşmaktadır [17,18,19,20]. Taban sismik anakayası kayma dalgası hızı (V_b), Eurocode 8'de önerildiği gibi 800 m/s alınmıştır. Yukarıdaki bağlantıda $e=0.60$ için $C=7.60 \times 10^{-5}$ s/m elde edilmektedir. Mikrotremor ölçüm noktalarında H/V Spektral Oran yöntemine göre hesaplanan K_g değerleri, C katsayısı ile birlikte değerlendirilerek, taban sismik anakaya ivmesinin (a_b) 0.15 g, 0.20 g ve 0.25 g değerleri için yüzeğe yakın zemin tabakalarındaki kayma birim şekil değiştirmeleri (γ_e) hesaplanmış ve sonuçlar K_g değerleri ile birlikte Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 - Mikrotremor Analiz Sonuçları

| Ölçüm No | Hasar Görebilirlik (K_g) | Kayma Birim Şekil Değiştirmesi (γ_e) (%) | | |
|----------|------------------------------|---|-------|-------|
| | | 0.15g | 0.20g | 0.25g |
| MA1 | 17.7 | 0.198 | 0.264 | 0.33 |
| MA2 | 10.5 | 0.118 | 0.157 | 0.197 |
| MA3 | 5.7 | 0.064 | 0.085 | 0.106 |
| MA4 | 17.3 | 0.194 | 0.258 | 0.323 |
| MA5 | 11.1 | 0.124 | 0.165 | 0.206 |
| MA6 | 8.5 | 0.096 | 0.127 | 0.159 |

Tablo 2 - Mikrotremor Analiz Sonuçları (devam)

| Ölçüm No | Hasar Görebilirlik (K_g) | Kayma Birim Şekil Değişirmesi (γ_e) (%) | | |
|----------|------------------------------|--|-------|-------|
| | | 0.15g | 0.20g | 0.25g |
| M01 | 16.6 | 0.185 | 0.247 | 0.309 |
| M02 | 10.4 | 0.116 | 0.154 | 0.193 |
| M03 | 14.8 | 0.166 | 0.221 | 0.276 |
| M04 | 5.3 | 0.059 | 0.079 | 0.099 |
| M05 | 7.5 | 0.083 | 0.111 | 0.139 |
| M06 | 6.8 | 0.076 | 0.101 | 0.126 |
| M07 | 5.7 | 0.063 | 0.085 | 0.106 |
| M08 | 10.7 | 0.120 | 0.160 | 0.200 |
| M09 | 2.5 | 0.028 | 0.037 | 0.046 |
| M10 | 15.8 | 0.177 | 0.236 | 0.294 |
| M11 | 5.0 | 0.056 | 0.075 | 0.093 |
| M12 | 6.6 | 0.073 | 0.098 | 0.122 |
| M13 | 12.2 | 0.137 | 0.182 | 0.228 |
| M14 | 6.5 | 0.073 | 0.097 | 0.121 |
| M15 | 10.7 | 0.120 | 0.160 | 0.200 |

Mikrotremor ölçümleri sonrasında yapılan analizler sonucunda çalışma sahaları için Hasar Görebilirlik İndisi (K_g) değerleri 2.5~17.7 arasında değiştiği hesaplanmıştır. Kayma birim şekil değiştirmelerin (γ_e) ise en büyük taban sismik anakaya ivmesine bağlı olarak %0.059 ile %0.330 arasında değiştiği belirlenmiştir.

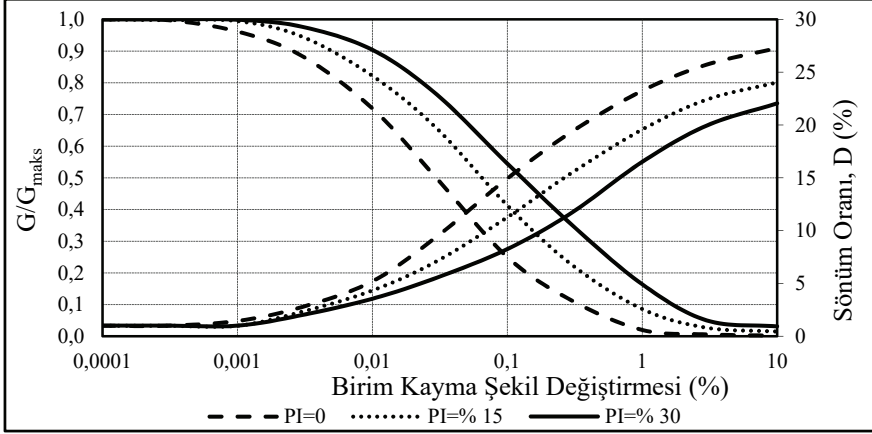
4. ZEMİN TABAKALARININ BİR BOYUTLU DİNAMİK ANALİZİ

Çalışma bölgesindeki önceden yapılan zemin araştırmalarından derlenen sondaj verilerinin arazide yapılan ölçümlerden elde edilen kayma dalgası hızı profilleriyle birlikte değerlendirilmesi sonucunda zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu zemin modellerinin farklı anakaya mostrası ivme değerlerine sahip kuvvetli yer hareketi karşısındaki davranışı, bir boyutlu (1D) dinamik analizler yardımıyla belirlenmiştir. 1D dinamik analizler, eşdeğer doğrusal yöntem kullanılarak DeepSoil V6.1 yazılımıyla yapılmıştır [21].

4.1. Malzeme Modeli

Yapılan eşdeğer doğrusal analizlerde kullanılan birim kayma şekil değiştirmesi seviyesine bağlı normalize kayma modülü (G/G_{maks}) ve sönüm oranı (D) değişim eğrileri, ince daneli zeminler için Vucetic ve Dobry (1991), kaba daneli zeminler içinse Seed ve Idriss (1970)

tarafından önerilen bağıntıların ortalama değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Analizlerde kullanılan rijitlik azalım ve sönüm oranı eğrileri plastisite indisleri farklı zeminler için Şekil 7’de gösterilmiştir [22, 23].



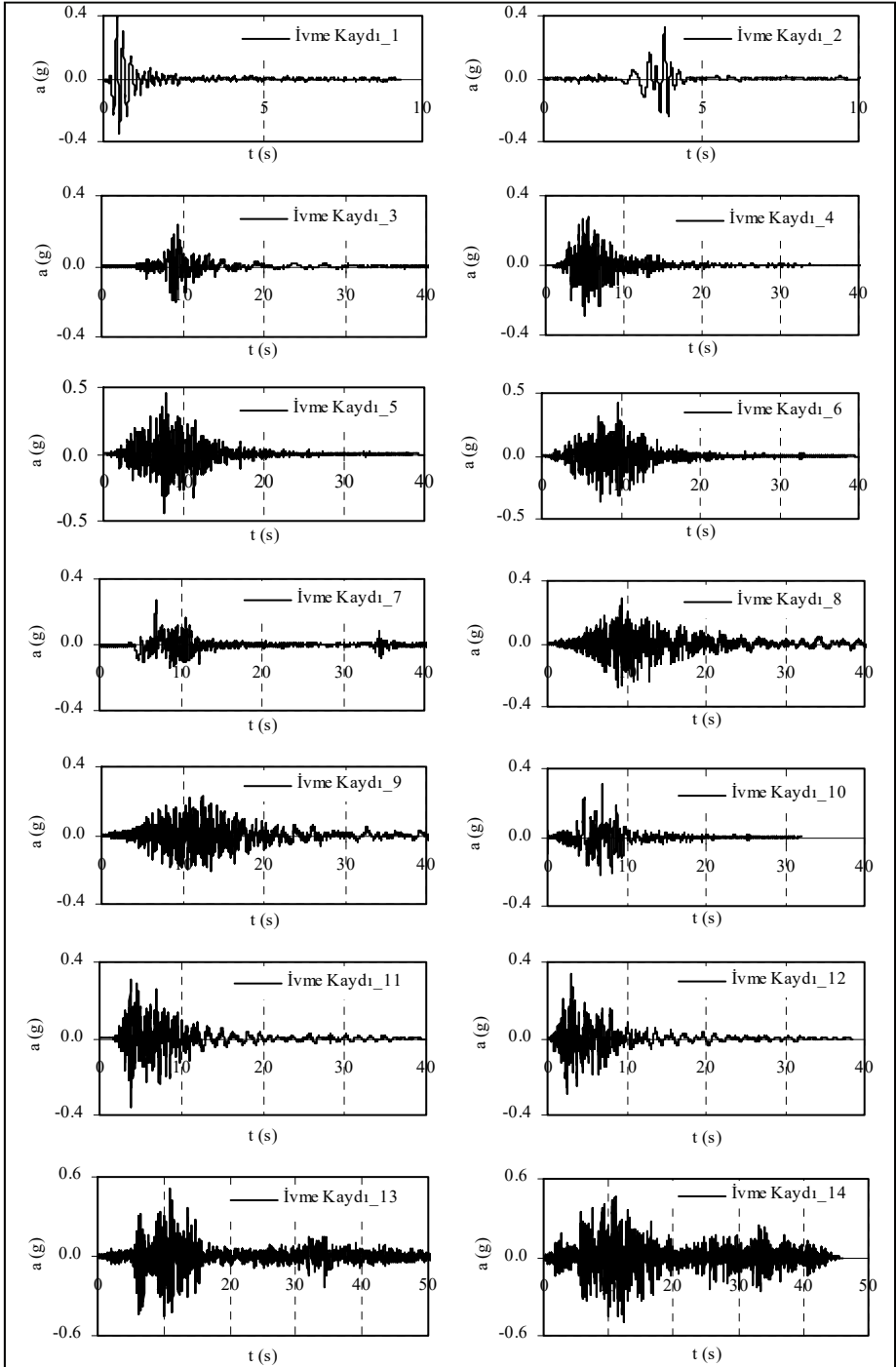
Şekil 7 - 1D Dinamik Analizlerde Kullanılan Rijitlik Azalımı (G/G_{maks}) ve Sönüm Oranı (D) Değişim Eğrileri

4.2. Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları

Deprem hareketine bağlı risk seviyesinin yüksek olduğu çalışma sahasında sismik anakayadaki deprem hareketinin şiddetinde meydana gelecek değişimin zemin tabakalarının dinamik davranışına etkisinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan bir boyutlu dinamik analizlerde; ölçeklendirilmiş en büyük mutlak ivme değerleri (a_{maks_kaya}) 0.3 g ile 0.5 g arasında değişen, 14 farklı anakaya mostrası ivme kaydı kullanılmıştır [24].

Vanmarcke (1979), ölçeklendirme faktörünün; doğrusal elastik yapısal problemlerin analizinde Krinitszky ve Chang (1979) tarafından önerilen 0.25 ile 4 sınır değerleri arasında seçilebileceğini, bununla birlikte zemin tabakalarında kuvvetli yer hareketine bağlı taşıma gücü kaybı, şev duraylılığı problemi ve sıvılaşma olgusunun incelendiği kayma birim şekil değiştirmesi seviyelerinin yüksek olduğu dinamik analizlerde 0.5 ile 2 değerleri arasında kalması gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışmada yapılan 1D dinamik analizlerde Vanmarcke (1979) tarafından sunulan öneri dikkate alınmıştır [25, 26].

Seçilen deprem hareketi kayıtlarına ait ölçeklendirilmemiş ivme zaman geçmişleri Şekil 8’de ve bunlara ait özellikler ise Tablo 3’te verilmiştir. Seçilen ivme kaydının ait olduğu deprem, kayıt bileşeni, büyüklüğü, şiddet parametreleri ve diğer karakteristik özellikler Tablo 3’te detaylı bir şekilde belirtilmiştir. 0.4 g değerine ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarına ait normalize edilmiş ivme spektrumları Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 8 - Bir Boyutlu Dinamik Analizlerde Kullanılan Anakaya Mostrası İvme Kayıtları

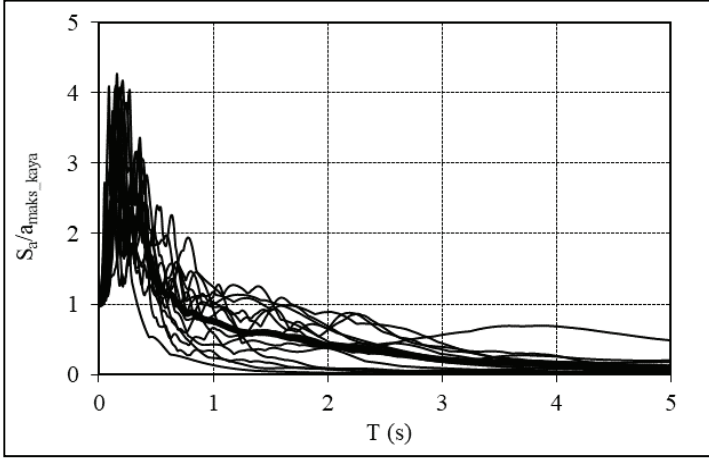
Tablo 3 - Analizlerde Kullanılan Deprem Hareketlerinin Özellikleri

| Deprem | İzmir, 1977 | Kocaeli, 13/09/1999 | Tottori, 2000 | Northridge, 1994 | Loma Prieta, 1989 |
|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| İvme Kaydı No | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Bileşen | K-G | D-B | D-B | 90 | 0 |
| V _{s30} (m/s) | 771 | 826 | 967 | 715 | 714 |
| Büyükklük | M _w =5.6 | M _d =5.7 | M _w =6.6 | M _w =6.7 | M _w =6.9 |
| Δ (km) | 9.5 | 10.5 | 31.4 | 14.7 | 16.3 |
| a _{maks} (g) | 0.39 | 0.32 | 0.25 | 0.29 | 0.45 |
| ASI (cm/s) | 260.5 | 261.2 | 263.7 | 278.8 | 438.3 |
| VSI (cm) | 39.8 | 54.1 | 73.1 | 81.7 | 91.1 |
| SMA (g) | 0.09 | 0.10 | 0.19 | 0.23 | 0.38 |
| T _m (s) | 0.22 | 0.32 | 0.50 | 0.33 | 0.28 |

| Deprem | Loma Prieta, 1989 | Kocaeli, 17/08/1999 | Iwate, 2008 | Iwate, 2008 | Kobe, 1995 |
|------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| İvme Kaydı No | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Bileşen | 90 | K-G | K-G | D-B | 90 |
| V _{s30} (m/s) | 714 | 701 | 826 | 826 | 1043 |
| Büyükklük | M _w =6.9 | M _d =7.4 | M _w =6.9 | M _w =6.9 | M _w =6.9 |
| Δ (km) | 16.3 | 40.0 | 23.2 | 23.2 | 25.4 |
| a _{maks} (g) | 0.40 | 0.23 | 0.23 | 0.28 | 0.31 |
| ASI (cm/s) | 348.9 | 187.0 | 219.6 | 217.8 | 241.5 |
| VSI (cm) | 63.1 | 73.6 | 101.5 | 117.2 | 141.7 |
| SMA (g) | 0.33 | 0.17 | 0.21 | 0.24 | 0.20 |
| T _m (s) | 0.22 | 0.67 | 0.52 | 0.57 | 0.70 |

| Deprem | Laquila, 2009 | Laquila, 2009 | Manjil, 1990 | Manjil, 1990 |
|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| İvme Kaydı No | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Bileşen | K-G | D-B | 0 | 90 |
| V _{s30} (m/s) | 717 | 717 | 724 | 724 |
| Büyükklük | M _w =6.3 | M _d =6.3 | M _w =7.4 | M _w =7.4 |
| Δ (km) | 1.8 | 1.8 | 40.4 | 40.4 |
| a _{maks} (g) | 0.34 | 0.34 | 0.51 | 0.49 |
| ASI (cm/s) | 242.6 | 219.6 | 492.9 | 486.6 |
| VSI (cm) | 151.4 | 140.2 | 155.8 | 216.6 |
| SMA (g) | 0.25 | 0.25 | 0.44 | 0.46 |
| T _m (s) | 0.66 | 0.69 | 0.32 | 0.32 |

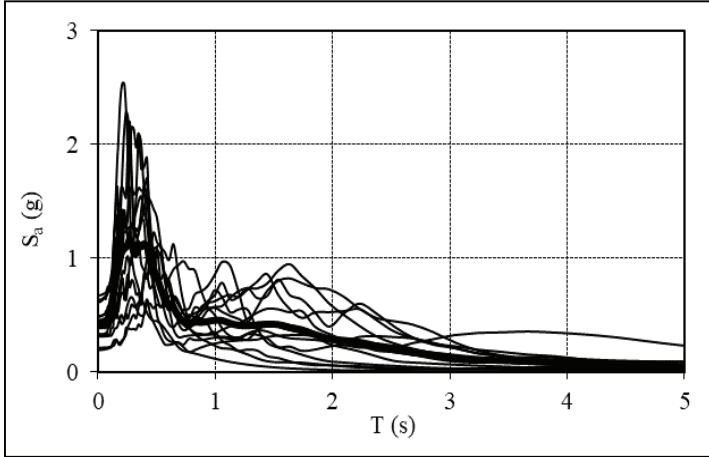
V_{s30}: İstasyon Ortalama Kayma Dalgası Hızı, Δ: Merkez Üssü Uzaklığı, M_w: Moment Büyükklüğü, M_d: Süre Büyükklüğü, a_{maks}: En Büyük İvme, ASI: İvme Spektrumu Şiddeti, VSI: Hız Spektrumu Şiddeti (Von Thun vd., 1988), SMA: En Büyük Sürekli İvme (Nuttli, 1979), T_m: Ortalama Periyot (Rathje vd., 1998) [27, 28, 29].



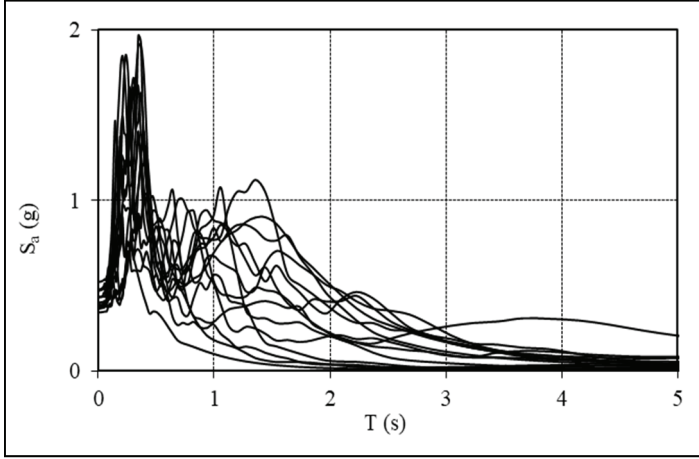
Şekil 9 - 0.4 g En Büyük İvme Değerine Ölçeklendirilmiş Anakaya Mostrası İvme Kayıtlarına Ait Normalize Edilmiş İvme Spektrumları

4.3. Analiz Sonuçları

Zemin etüdü sondajlarından elde edilen verilerin ve eş zamanlı mikrotremor ölçümlerinden belirlenen kayma dalgası hızı profillerinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulan 22 ayrı zemin modeli üzerinde, farklı şiddetlere sahip olacak biçimde ölçeklendirilmiş 14 farklı anakaya mostrası ivme-zaman geçmişi kullanılarak ($a_{maks_kaya}=0.3\sim 0.5$ g) bir boyutlu dinamik analizler düzenlenmiş ve zemin tabakalarının dinamik davranışı belirlenmiştir. En büyük ivme değeri 0.4 g olacak biçimde ölçeklendirilmiş sismik anakaya mostrası kayıtlarının kullanılmasıyla elde edilen elastik ivme spektrumları MA1 ve SK15 sahaları için sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir.



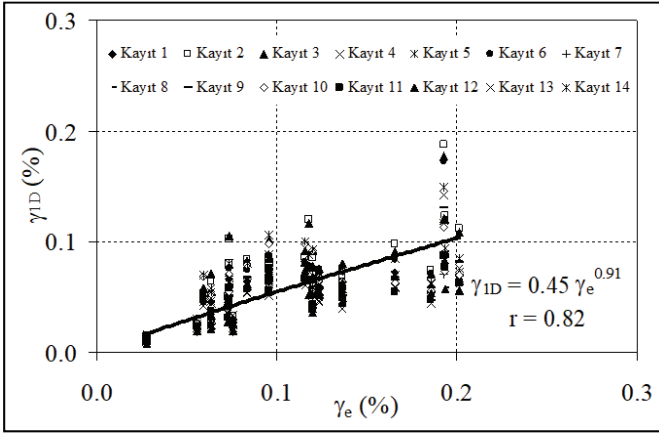
Şekil 10 - 0.4 g En Büyük İvme Değerine Ölçeklendirilmiş Anakaya Mostrası Kayıtlarının Kullanılmasıyla MA1 Sahası İçin Elde Edilen Elastik İvme Spektrumları



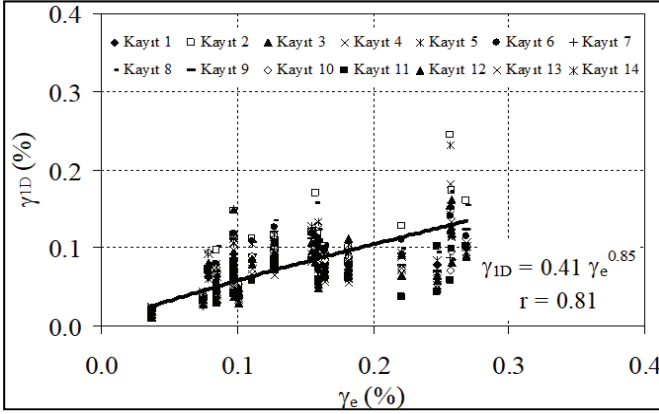
Şekil 11 - 0.4 g En Büyük İvme Değerine Ölçeklendirilmiş Anakaya Mostrası Kayıtlarının Kullanılmasıyla SK15 Sahası için Elde Edilen Elastik İvme Spektrumları

5. KAYMA ŞEKİL DEĞİŞTİRMELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

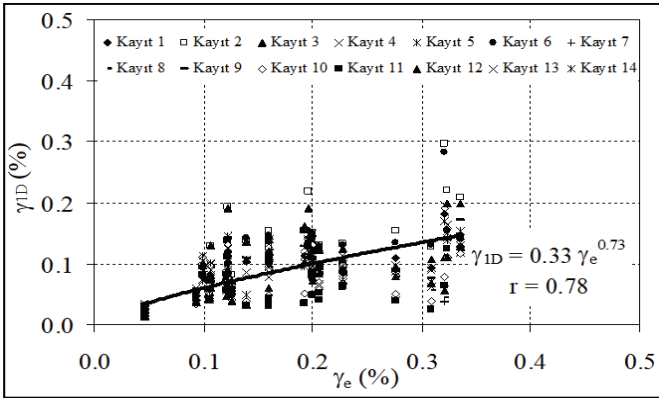
Çalışma sahasında farklı noktalar için elde edilen üç bileşenli tekil mikrotremor kayıtlarının analizi sonrasında Nakamura yönteminin kullanılmasıyla farklı şiddetteki sismik anakaya ivme değerleri için yüzeye yakın zemin tabakalarındaki kayma şekil değiştirmeleri (γ_e) elde edilmiştir. Yine aynı ölçüm noktalarını temsil eden zemin kesitleri için farklı şiddetteki anakaya mostrası ivme zaman geçmişi kayıtları kullanılarak 1D eşdeğer lineer analizler düzenlenmiş ve zemin yüzeyinden 5 m derinlikteki en büyük kayma şekil değiştirmesi değerleri (γ_{1D}) elde edilmiştir. İzotropik, elastik ortamda düşey olarak ilerleyen kayma dalgaları serbest yüzeye ulaştıklarında kayma gerilmesi ve dolayısıyla kayma şekil değiştirmesinin yok olması, çalışma sahasındaki altyapı hatlarının zemin yüzeyinden 3~5 m derinlikte yer alması ve bölgedeki yapıların genelde tek tam bodrumlu sığ temellere sahip olması gibi nedenlerden dolayı; en büyük kayma birim şekil değiştirmesi değerlerinin (γ_{1D}), zemin yüzeyinden itibaren 5 m derinlik için hesaplananları seçilmiştir. Tekil mikrotremor ölçümleri ve 1D dinamik analizlerden aynı inceleme sahası için elde edilen kayma şekil değiştirmesi değerleri arasındaki ilişki belirlenirken; eşleştirilen kayma deformasyonu değerlerinin, eşdeğer şiddetteki anakaya deprem hareketi kullanılarak hesaplanmış olmasına dikkat edilmiştir. Bir boyutlu eşdeğer doğrusal dinamik analizlerden elde edilen kayma birim şekil değiştirmeleri ile tekil mikrotremor ölçümlerinden elde edilen kayma birim şekil değiştirmeleri arasındaki ilişki, ölçeklendirilmiş en büyük taban sismik anakaya ivmesinin (a_b) farklı değerleri için sırasıyla Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te gösterilmiştir. Daha sonra ivme-zaman geçmişleri Şekil 8'de ve kuvvetli yer hareketi özellikleri Tablo 3'te verilen anakaya mostrasına ait ölçeklendirilmemiş ivme kayıtlarının kullanılmasıyla düzenlenen bir boyutlu eşdeğer doğrusal dinamik analizlerden elde edilen kayma birim şekil değiştirmeleri (γ_{1D}) ile mikrotremor ölçümlerinin Nakamura yöntemine göre analiziyle hesaplanan kayma birim şekil değiştirmeleri (γ_e) arasındaki ilişki Şekil 15'te gösterilmiş ve ilgili regresyon bağıntısı yardımıyla bu çalışmada ulaşılan sonuçlar genelleştirilmiştir.



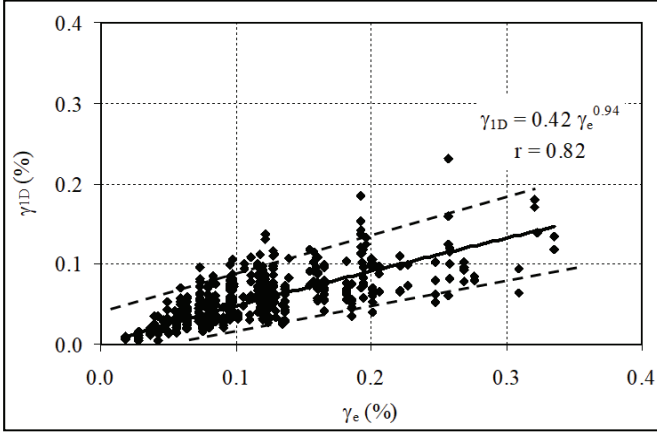
Şekil 12 - $a_b=0.15$ g için Kayma Birim Şekil Değiştirmeleri



Şekil 13 - $a_b=0.20$ g için Kayma Birim Şekil Değiştirmeleri



Şekil 14 - $a_b=0.25$ g için Kayma Birim Şekil Değiştirmeleri



Şekil 15 - Ölçeklendirilmemiş Anakaya Mostrası İvme Kayıtları ile Elde Edilen Kayma Birim Şekil Değiştirmeleri

Çalışma sahalarına ait kayma dalgası hızı profilleri için 14 farklı ölçeklendirilmemiş anakaya mostrası ivme kaydının kullanılmasıyla yapılan bir boyutlu dinamik analizler sonucunda zemin yüzeyinden 5 m derinlik için elde edilen kayma birim şekil değiştirmeleri (γ_{1D}) ile mikrotremor ölçümlerinin Nakamura Yöntemine göre analiziyle hesaplanan kayma birim şekil değiştirmeleri (γ_e) arasında regresyon analizi yapılarak elde edilen bağıntı Denklem 6'da verilmiştir.

$$\gamma_{1D} = 5.5 \times 10^{-5} (a_b A_g^2 T_0)^{0.94} \quad (6)$$

Bağıntıda, a_b g cinsinden taban sismik anakayasındaki en büyük yatay ivme, A_g ve T_0 mikrotremor kayıtlarının H/V Spektral Oran yöntemine göre analiziyle elde edilen zemin büyümesi ve hakim periyot değerlerini göstermektedir.

Tablo 4 - Zemin davranışının kayma deformasyonu seviyesine bağlı değişimi [30].

| Deformasyon Seviyesi, γ (%) | 10^{-4} | 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1} | 1 | 10 |
|------------------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|---------------------------------|----|
| Olgu | Dalga yayılımı, titreşim | | Çatlaklar, farklı oturma | | Şev kayması, sıkışma, sıvılaşma | |
| Mekanik Davranış | Elastik | | Elasto-plastik | | Göçme | |

Bağıntının korelasyon katsayısı $r=0.82$ olarak hesaplanmıştır. Kullanılan en büyük anakaya mostrası ivme değerinin 0.3 g ile 0.5 g arasında değiştiği bu çalışmada elde edilen kayma deformasyonu seviyeleri %0.02~0.35 aralığında değerlere sahiptir ve Tablo 4'ten de görülebileceği gibi kuvvetli yer hareketi sırasında yüzeye yakın zemin tabakasında elasto-

plastik davranışın hakim olacağı anlaşılmaktadır. Verilen bağıntının, zeminde plastik davranış ve göçme durumunun oluşacağı daha yüksek kayma deformasyonu seviyelerini meydana getirecek daha şiddetli yer hareketi ve daha yumuşak veya gevşek zemin koşulları için geçerliliğinin araştırılması gerekmektedir.

6. SONUÇLAR

Depremler nedeniyle yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelen kayma şekil değiştirmelerinin seviyesi, zemin yapılarında oluşabilecek yatay yer değiştirme ve oturma miktarları ile yapılarda oluşan hasar dağılımının yerel değişiminde etkili olmaktadır. Bu çalışmada; küçük genlikli titreşimler olarak bilinen mikrotremor ölçümlerinin Nakamura Yöntemiyle analiz edilmesiyle elde edilen kayma birim şekil değiştirmesi değerleri, kuvvetli yer hareketi karşısında zemin tabakalarının davranışının belirlenmesi amacıyla kullanılan 1D eşdeğer doğrusal dinamik analiz yöntemiyle hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır.

Bu amaçla çalışma alanında daha önce zemin araştırma sondajlarının yapıldığı bölgelerde tekil ve eş zamanlı çoklu mikrotremor kayıtları alınmış, eş zamanlı kayıtlar SPAC yöntemi ile analiz edilerek kayma dalgası hızının derinlikle değişimi belirlenmiştir. İnceleme sahası için oluşturulan 22 adet zemin modeli üzerinde 14 farklı anakaya mostrası deprem ivme kaydı kullanılarak bir boyutlu (1D) eşdeğer doğrusal dinamik analizler yapılmış ve yüzey tabakaları için kayma birim şekil değiştirmeleri elde edilmiştir. Yapılan tekil mikrotremor ölçümleri H/V (yatay/düşey) Spektral Oran yöntemine göre analiz edilmiş; zemin büyütmesi ile hakim periyot değerleri, bunlara bağlı hasar görülebilirlik indisi değerleri ve taban sismik anakaya ivmesinin farklı değerleri için yüzeye yakın zemin tabakalarındaki kayma birim şekil değiştirmeleri (γ_e) hesaplanmıştır.

Mikrotremor ölçümüne dayalı kayma şekil değiştirmesi değerleri (γ_e) ile kuvvetli yer hareketine dayalı 1D dinamik analizlerden elde edilen kayma şekil değiştirmesi değerleri (γ_{1D}) arasındaki ilişki, zemin tabakasında elastik ve elasto-plastik davranışın meydana geldiği kayma birim şekil değiştirme seviyeleri için $\gamma_{1D}=5.5 \times 10^{-5}(a_b A_g^2 T_0)^{0.94}$ şeklinde üstel bir fonksiyonla ifade edilmiştir. Burada a_b g cinsinden taban sismik anakaya ivmesi ve A_g, T_0 sırasıyla mikrotremor ölçümlerinden elde edilen zemin büyütmesi ve hakim periyot değerleridir. Elde edilen bağıntı, bir sahada tasarım yer hareketi özelliklerinin bulunması amacıyla yapılacak bir boyutlu dinamik analizlerde yüzey tabakaları için hesaplanan kayma şekil değiştirmelerinin, hakim periyot ve zemin büyütmesi belirlenerek pratik amaçlar doğrultusunda tahmin edilebilmesinde yararlı görülmektedir. Belli bir bölgede sınırlı sayıda veri kullanılarak elde edilen bağıntının, veri sayısındaki artışla yerel zemin koşullarına bağlı olarak değiştirilmesi ve geliştirilmesi mümkün olacaktır.

Teşekkür

Yapılan bilimsel çalışmalara desteğinden dolayı Bursa Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Dairesi Başkanlığı Etüd Proje Şube Müdürlüğü'ne ve Jeoloji Mühendisi Ömer GÜLENÇ'e teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Saita, J., Nakamura, Y. and Sato, T., Liquefaction caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and the Result of the Prior Microtremor Measurement, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, 2012.
- [2] Atakan, K., Duval, A-M., Theodulidis, N., Guillier B., Chatelain L., Bard, P-Y. and the SESAME team., The H/V Spectral Ratio Technique: Experimental Conditions, Data Processing and Empirical Reliability Assessment, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [3] Chávez-García F. J. and Tejeda-Jácome J., Site response in Tecoman, Colima, Mexico – II Determination of subsoil structure and comparison with observations; J. Soil Dyn. Earthq. Eng. 30(8) 717–723, 2010.
- [4] Nakamura, Y., On the H/V Spectrum, The 14th World Conference on Earthquake Engineering in Beijing, China, 2008.
- [5] Akyürek, B., 1/500000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası: İstanbul Paftası ve Açıklamaları, MTA Gn. Md. Yayını, Ankara, 1987.
- [6] Kiper, B., Güzelyalı (Bursa) Yerleşim Amaçlı Temel Sondajları ve Jeolojik ve Jeoteknik İnceleme Raporu, Ankara, 2002.
- [7] İyisan, R., Zeminlerde Kayma Dalgası Hızı ile Penetrasyon Denei Sonuçları Arasındaki Bağıntılar, İMO Teknik Dergi, Cilt 7, Sayı 2, ss.1187-1199, 1996.
- [8] Leyton, F., Montalva, G. and Ramirez P., Towards a Seismic Microzonation of Concepcion Urban area based on Microtremors, Surface Geology and Damage observed after the Maule 2010 earthquake. First Results, 4th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, University of California, Santa Barbara, 2011.
- [9] Burjanek, J., Gassner-Stamm, G., Poggi, V. and Fah D., Estimation of Local Site Effects in the Upper Valais (Switzerland), 4th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion,, University of California, Santa Barbara, 2011.
- [10] Grutas, R. and Yamanaka, H., Deep Sedimentary Layers in Metro Manila, Philippines Estimated with the Joint Inversion of Receiver Function and Surface Wave Dispersion, 4th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, University of California, Santa Barbara, 2011.
- [11] Okada, H., Microtremor Survey Method: SEG Geophysical Monograph Series No. 12, (translated by Koya Suto), Society of Exploration Geophysicists, 2003.
- [12] Karagoz O., Chimoto, K., Citak, S., Ozel, O., Yamanaka, H., Hatayama, K., Estimation of shallow S-wave velocity structure and site response characteristics by microtremor array measurements in Tekirdag region, NW Turkey, Earth, Planets and Space, 67:176, 2015.
- [13] Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, 2001.

- [14] İyisan, R., Haşal, M.E., Çekmeceli, M., Bayın, A., Mikrotremor Ölçümlerine Dayalı Bir Mikrobölgeleme Örneği, 5. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2013.
- [15] Mokhberi, M., Tadayon, A. and Rahnama, H., Using the H/V Spectral Ratio of Microtremor for Identification of the Vulnerability of Buildings, Based on Dynamic Site Characteristics of the Shiraz City, 15th World Conf. on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, 2012.
- [16] Okada, H., Theory of Efficient Array Observations of Microtremors with Special Reference to the SPAC Method, *Explore Geophys.*, vol. 37, 73-85, 2006.
- [17] Siddiqi, J., and G., Atkinson Ground motion amplification at rock sites across Canada, as determined from the horizontal-to-vertical component ratio, *Bull. Seism. Soc. Am.* 92, 877-884, (2002).
- [18] Ordonez, G.A., SHAKE 2000 – A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems, GeoMotions, LLC:Lacey, Washington, USA, 2012.
- [19] Bardet, J.P., Ichii, K. and Lin, C.H., 2000. EERA a Computer Program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits, Univ. of Southern California, Dep. of Civil Eng., US.
- [20] Yoshida, N., *Seismic Ground Response Analysis*, Springer, 1st ed., 2015.
- [21] Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C. and Park, D., DEEPSOIL 6.1, User Manual, 2016.
- [22] Vucetic, M. and Dobry, R., Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117:1, 87-107, 1991.
- [23] Seed, H.B. and Idriss, I.M., *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses*, Report EERC, Berkeley CA, USA, University of California, 1970.
- [24] Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası, İndeks Yerleşim Birimleri ve Deprem Bölgeleri Raporu, Ankara, 1996.
- [25] Krinitszky, E.L. and Chang, F.K., State-of-the-art for assessing earthquake hazards in the United States: Specifying peak motions for design earthquakes, *Miscellaneous Paper S-73-1, Report 7*, U.S Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1979.
- [26] Vanmarcke, E.H., State of the art for assessing earthquake hazards in the United States: Representation of earthquake ground motion: Scaled accelerograms and equivalent response spectra, *Miscellaneous Paper S-73-1, Report 14*, U.S Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1979.
- [27] Von Thun, J.L., Rochim, L.H., Scott, G.A and Wilson, J.A., Earthquake ground motions for design and analysis of dams, *Earthq. Engineering and Soil Dynamics II, Recent Advance in Ground-Motion Evaluation*, Geotec. Special Publication 20, ASCE, New York, 463-481, 1988.

- [28] Nuttli, O.W., The relation of sustained maximum ground acceleration and velocity to earthquake intensity and magnitude, Miscellaneous Paper S-71-1, Report 16, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1979.
- [29] Rathje, E.M., Abrahamson, N.A. and Bray J.D., Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 150-159, 1998.
- [30] Ishihara, K., *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford Engineering Science Series, Oxford University Press, U.K., 1996.

