BÖLÜM 5

MİKROTREMOR VERİLERİNDEN GÜVENİLİRLİK VE NİTELİK ANALİZİ*

Denizhan KOÇAK[1]
Emre TİMUR[2]

5.1. GİRİŞ

Mikrotremor ölçümleri, doğal kaynaklı bir yöntemdir. Mikrotremor ve yeraltı yapıları arasındaki ilişkiye ve mikrotremorları oluşturan dalgaların neler olduğuna dair birçok çalışma yapılmış ve detaylı şekilde incelenmiştir. Aki (1957) ve Toksöz (1964) yeraltı yapısının ortaya çıkarılmasında mikrotremorların güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini gösteren ilk araştırmacılardır.

Mikrotremorların dinamik zemin özelliklerinin belirlenmesinde kullanımı oldukça yaygındır; en fazla avantaj sunduğu çalışmalar mikrobölgeleme araştırmalarıdır ve kısa ölçüm süresi nedeniyle bu yönteme olan ilgi ve ihtiyaç sürekli artmaktadır (Omori 1895, Ishiyama 1982). 1950 yılı ve sonrasından itibaren mikrotremor spektrumlarından hareketle zemin özelliğini belirlemek için çok sayıda çalışmalar yapılmış, mühendislikte ilk mikrotremor uygulaması ise 1961 yılında gerçekleştirilmiştir (Kanai ve Tanaka 1961). Daha sonraki uygulama ise Hachinohe (Japonya)'da yürütülen derin çökel basen oluşumu nedeniyle bölgede zemin baskın periyodunun 2.5 sn olarak gözlendiği çalışmadır (Ohta ve diğ. 1978). Uzun süreli mikrotremor ölçümlerinin kaydedilmesi durumunda, derin

* Bu çalışma, D.Koçak'ın (Bolbol) Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir

1 Jeofizik Y. Mühendisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, denizhanbolbol@gmail.com
2 Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, emre.timur@deu.edu.tr

alüvyal havzalarda büyütme değerlerinin saptanabildiğine yönelik çalışmalar da mevcuttur (Kagami ve diğ. 1986, Yamanaka ve diğ. 1994). Seht ve Wohlenberg (1999) tarafından yapılan bir araştırmada ise, mikrotremorların kaydedilmesi ve değerlendirilmesi sonucunda zemin parametresine ek olarak alüvyal çökel kalınlıklarının da ortaya konabileceği ilk defa önerilmiş, Nakamura (HVSR- Horizontal to Vertical Spectral Ratio, H/V) tekniğinin (Nakamura, 1989) bu kapsamda uygun olduğu rapor edilmiştir.

Yapı zemin ilişkisinin tespitinde zemin hakim titreşim periyodu önem taşıyan bir parametredir. Bu parametre her ne kadar deprem esnasında oluşan hasar ile zemin arasında doğrudan ilişkili olmasa da, rezonans etkisiyle meydana gelen hasarın artması nedeniyle önemli bir teknik parametredir (Gülerce 2002). Rezonans, deprem anında belirli bir frekansla salınmaya başlayan zemin ile farklı bir frekansta salınım yapan bina arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir terimdir. Bu ilişkide eğer zeminin hakim frekansı, binanın hakim frekansı ile aynı ise, binaya uygulanan kuvvet artacaktır. Buna bağlı olarak binanın göreceği hasar da artacaktır. Diğer bir deyişle rezonans, belirli bir frekansta titreşen yapının, aynı frekanstaki zemin titreşiminin etkisinde kalarak yüksek genlikle titreşmesi olayıdır. Bu nedenle binanın hakim titreşim periyodunun zemine göre daha küçük olması gerekmektedir. Bunun amacı binanın zeminle rezonansa girerek daha büyük hasar görmesinin engellenmesidir.

5.1.1) Araştırmanın Amacı

İzmir İli Türkiye'nin büyükşehirleri arasında yer almaktadır. Büyüyen nüfusu ve gelişen iş olanakları bu şehri günden güne daha da popüler yapmaktadır. Bu doğrultuda şehir merkezinin kalabalıklaşması ve yapılaşmanın artması sürmektedir. Birinci derece deprem bölgesi olan İzmir'in yoğun yapılaşma altında olması ve zeminin deprem anında bu duruma nasıl bir tepki vereceğini çözümlemek için İzmir İli Bornova İlçesinde yerleşimin en yoğun olduğu Kazım Dirik, Erzene ve Ergene mahallerinde mikrotremor ölçümleri yapılarak zemin hakim titreşim periyodunun belirlenmesi ve H/V eğrilerinin güvenilirliğinin ve niteliğinin irdelenmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda bu araştırmanın temel hedefi, sığ katmanların dinamik özelliklerinin belirlenmesidir. Modelleme amaçlı gerçekleştirilecek deprem senaryolarının doğruluğunun arttırılması noktasında söz konusu parametreler önemlidir.

5.1.2) Araştırmanın Önemi

Dünyada olduğu gibi Türkiye'de de deprem kaynaklı hasarların (can-mal kaybı) önlenmesi ya da en aza indirilmesi amacıyla yürütülen araştırmalar gittikçe önem kazanmaya başlamaktadır. Düşük maliyetli oluşu, arazide ve sahada kolay uygulanması, kısa sürede ölçüm alınabilmesi nedeniyle mikrotremorların kaydedildiği ve değerlendirildiği teknikler büyük avantaja sahiptir.

Deprem sırasında yapılarda meydana gelebilecek rezonans riskinin mikrotremor yöntemi ile araştırılması da son yıllarda sıkça başvurulan bir yöntem haline gelmiştir. Bu nedenlerden dolayı mikrotremor ölçümleri zemin çalışmalarının olmazsa olmazları arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda 1.Derece deprem bölgesi olan ve yoğun yapılaşma altında olan İzmir'in Bornova ilçesinde zeminin deprem anında nasıl tepki vereceğini çözümlemek, zemin hakim titreşim periyodunu belirlemek ve H/V eğrilerinin güvenilirliğini ve niteliğini irdelemek önemlidir. İzmir Metro ağının Bornova'ya uzanması, İzmir Otogarı'nın Bornova ilçesinde bulunması, birçok organize sanayi bölgelerini bünyesinde barındırması ve ilçe genelindeki hareketli nüfusu 1 milyonun üzerinde olması, Bornova ilçesi örneğinde yerleşim yoğun bölgelerin araştırılmasını değerli kılmaktadır.

5.2.JEOLOJİ VE TEKTONİK

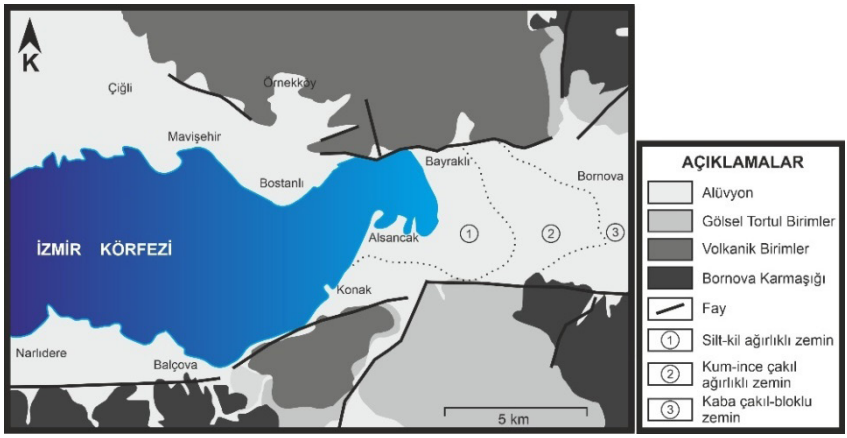
Bu bölümde İzmir İlinin jeolojisi ve depremselliği hakkında genel bilgilere yer verilmiştir.

5.2.1) İzmir İli ve Çevresinin Genel Jeolojisi

Tektonik bir çöküntü sahası olan İzmir Körfezinin kenarında bulunan şehrin içinde ve çevresinde yükselen tepeler volkanik kayaçlardan oluşmuştur. Volkaniklerin tabanında Mesozoyik yaşlı şistler ve Neojen yaşlı kireçtaşları bulunur. Tepeler ve sahil arasındaki düzlükler, deniz ve dere birikintilerinden ibarettir. Şehrin yerleşme alanının düz kısımlarını genç Kuvaterner çökeller oluşturur. Bölgedeki istiflenmeyi Üst Kretase yaşlı Bornova flişi, neojen yaşlı Altındağ formasyonu, Buca kireçtaşı ve Yamanlar volkanikleri ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar oluşturmaktadır (Şekil 64). Ayrıca Melez vadisinin doğusunda bulunan yüksek arazi Neojen yaşlı marn ve killi kireçtaşlarından; Güzelyalı Agamemnon Hamamı ve Ballıkuyu'daki tepeler Mesozoik yaşlı kireçtaşlı şistlerden; Tepecik'teki tepe aglomeradan ibarettir. Eşrefpaşa'nın üst kısmındaki andazitler eski göller ile, Kadife kalesinden şehrin düz kısmına yamaç, kalın bir enkaz örtüsü ile kaplıdır.

İnciraltı ve Narlıdere'ye doğru batıdaki sahil şeridinde geniş bir alüvyon örtüsü görülür (Erdoğan 1990).

İzmir İli ve çevresinde 3 farklı tektonik kuşak gözlenmektedir. Kalınlığı fazla olan ve tabanda yer alan mikaşist formasyonları (Doğu kuşağı) doğu kesimlerde yer alır. Bu birimlerin üzerine Menderes Masifi yer alır. Bu birim mermer istifi ile temsil edilir ve istif, platform türü karbonat metamorfizmasının sonucu olarak oluşmuştur. Daha batıda "İzmir-Ankara Sütur Zonu" yer alır (Batı kuşağı). Bu zon Kampaniyen-Daniyen yaş aralığında olup, Manisa'dan Seferihisar'a kadar genişçe bir alana yayılmıştır. İkinci kuşak olarak da adlandırılan bu zon, il genelinde yaygın filiş özelliği gösterir. Batı kuşağının daha da batısında Karaburun olarak adlandırılan bir başka yerel kuşak mevcuttur ve kalın Mesozoik karbonat istifi ile temsil edilir. Bu istif de platform koşullarında sedimentasyon halinde çökelmiştir (Koca 1995).



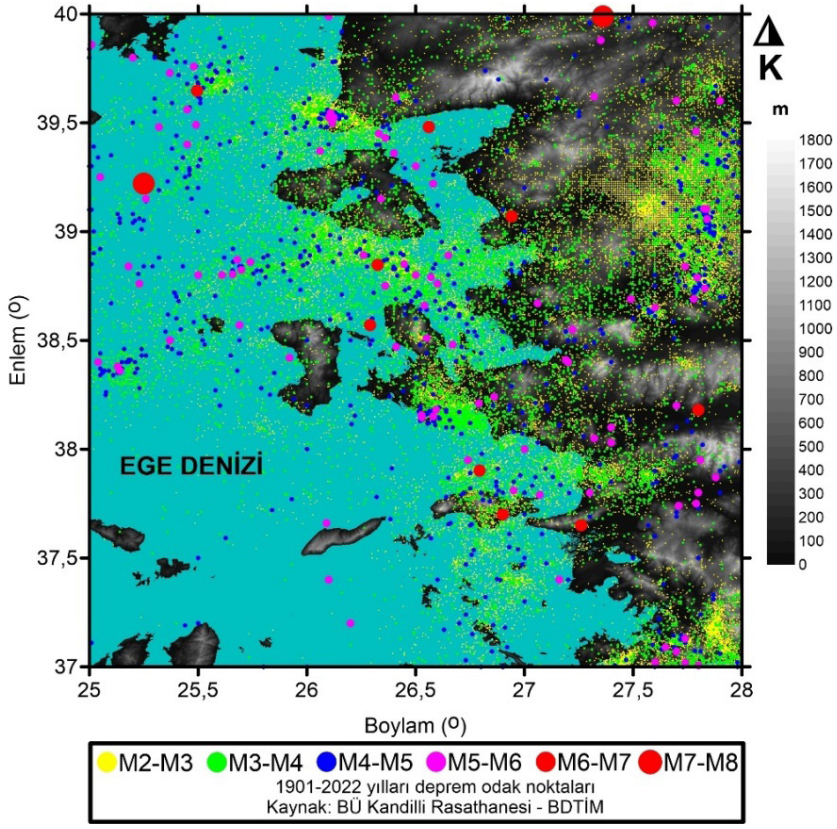
Şekil 64: İzmir kent merkezinin sadeleştirilmiş jeoloji haritası (Kıncal 2005'ten değiştirilmiştir).

Araştırma alanının da yer aldığı bölgenin temelinde Bornova Melanjı yer alır. Bu birim Üst Kretase yaşlıdır. İçinde filiş matrisi, platform türü kireçtaşı blokları bulunur. Filiş, Kampaniyen-Daniyen yaşlıdır. Bornova Melanjı, Menderes Masifi metamorfiği üzerinde bulunur ve olasılıkla Geç Eosen (Daniyen sonrası)'de metamorfizmasını tamamlayarak masifin üzerine itilmiştir. Bu alanda temel olarak yer alan tüm formasyonlar, volkanik kayaçlar ve Neojen tortullar ile uyumsuz şekilde örtülüdür.

5.2.2) İzmir İlinin Depremselliği

Tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen depremler İzmir İli tarihi açısından önemlidir ve önceki dönemlerde oluşan depremlere ait izler il içinde yer almaktadır. Depremlerin merkez üslerinin (episantırları) deniz içerisinde ağırlıklı olarak güneyde Sığacık Körfezinde, İzmir kıyılarına yakın olacak şekilde Sisam Adası Kuzeyinde (Doğanbey Burnu civarlarında) yoğunlaştığı gözlenmektedir. Batıda Sakız Adasının doğusunda (Karaburun civarlarında) ve kuzeyde ise Midilli Adasının doğusunda (Aliağa, Çandarlı Körfezinde) kümelenmeler gözlenmektedir. Karasal kesimlerde ise Gediz Grabeni boyunca Manisa, Soma, Akhisar civarlarında deprem aktivitesi mevcuttur. MS 17 depremi, sadece İzmir'de değil Manisa ve Aydın'da, Büyük Menderes havzası boyunca sağ ve sol kenar vadilerde yer alan yerleşimlerde de önemli can ve mal kaybına neden olan tarihsel depremlerdendir. Bir başka önemli tarihsel deprem ise 10 Temmuz 1688 İzmir depremidir. Bu depremde 19.000 kişi hayatını kaybetmiş, ilde önemli oranda hasar meydana gelmiştir. Benzer şekilde 1739 depremi, bir başka önemli can kaybına ve ekonomik hasara yol açan tarihsel depremlerdendir ve özellikle Foça yarımadasında ağır hasar oluşturmuştur. Bu depremde İzmir'deki ölü sayısı 80'dir ve Eski Foça yerleşim alanının önemli bir kesimi büyük oranda tahrip olmuştur. 1778'de Urla ve 1881'de Çeşme kıyılarında etkili olan tarihsel depremlerde de önemli oranda hasar oluşmuş, toplamda 200'ü aşkın can kaybı yaşanmıştır. 12.06.2017 (Mw=6.2) Karaburun-Midilli, 21.07.2017 (Mw=6.5) Bodrum-Kos depremlerinde yerel ölçekte tsunamiler oluşmuş, can kaybına yol açmamakla birlikte maddi hasarlar meydana gelmiştir. 30.10.2020 (Mw=6.9) Sisam Adası-İzmir Depremi, Bornova'da alüvyal birimler üzerindeki birçok binanın yıkılmasına neden olmuş, biri tsunami nedenli olmak üzere toplam 117 kişi hayatını kaybetmiş, 1000'den fazla kişi yaralanmıştır (Doğan ve diğ. 2021).

İzmir İli ve yakın çevresinde kümelenme karakterine sahip depremsellik ve yüksek sismolojik aktivite gözlenmektedir. Özellikle Sığacık körfezi çevresinde sismik aktivite yüksektir (Şekil 65).



Şekil 65: İzmir İli ve çevresi deprem etkinliği (KRDAE 2022).

5.3.YÖNTEM

Mikrotremor yöntemi jeolojik birimlerin ve mühendislik yapılarının hakim periyotlarını, deprem şiddeti artırmalarını saptamak ve yeraltı katmanlarının kayma dalgası (S dalgası) hızlarını (Vs) ve derinliklerini tahmin etmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir (Keçeli 2009). Bu yöntem, sığ katmanların dinamik özelliklerinin tayininde sondaj ile birlikte en çok kullanılan tekniklerden biridir.

5.3.1) Yöntemin Özellikleri

Mikrotremor yöntemi, doğal kaynaklı bir yöntemdir. Balyoz, dinamit vb. yapay bir kaynağa ihtiyaç yoktur. Doğrudan gürültü ölçülür (doğanın sesini dinleyebilme, doğayı algılayabilme amacıyla). Oldukça hızlı, ucuz, güvenilir oluşu ve ölçü alım süresinin kısalığı (ortalama 15 dk.) diğer yöntemlere göre tercih nedenidir.

Sinyal/Gürültü oranının düzeyi gibi bir sorun yoktur. Yapının deprem sırasındaki davranış formunun yorumlanabilmesi için deprem olmasının beklenmesine gerek yoktur.

5.3.2) Ölçümler

Mikrotremor ölçümleri, zemin cinsleri ve tabakalarının belirlenmesi, yer hareketinin yerel zemin koşulları etkisiyle oluşturabileceği büyütme özelliklerinin tayini ve zemin hakim (baskın) periyodunun bulunması amacıyla yapılmaktadır. Özellikle mikrobölgeleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan mikrotremor sayesinde sismik bölgelendirme yapılabilmektedir. Ölçümlerden elde edilen bilgiler, bölgelerin potansiyel jeoteknik risklere karşı farklı risk derecelerinde tanımlanabilmesini sağlamaktadır. Mikrotremor ölçümlerinin alınmasında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda özetlenmiştir:

- Kaydın her noktada anlamlı bir süre için alınması yerinde olur.
- Yerleşimin ve endüstriyel faaliyetlerin yoğun olduğu yerlerden kaçınılmalıdır.
- Ölçümler gece saatlerinde alınmalı; gürültüsüz (rüzgâr ve meteorolojik etkenler dâhil olmak üzere) ve uygun alanlar (asfalt ve kaya olmayan) seçilmelidir.
- İvmeölçerler yerine hızölçerler (3-bileşenli sismometreler) tercih edilmelidir. Çünkü ivmeölçerlerin tüm bileşenleri geniş frekans bandında gürültü çözümlemesinde, yeterli çözünürlük gücüne sahip değildir.
- 1 sn'den daha uzun periyotlu titreşimlerin analizi yapılacaksa 5 sn veya 10 sn'lik hızölçerler tercih edilmelidir.
- Mekanik ve elektronik gürültüye neden olabilecek uzun, dış donanımlardan kaçınılmalıdır.
- Ölçümler sırasında hava koşulları önemlidir. Yağmurlu ve rüzgârlı günlerde ölçüm alınmamalıdır. Rüzgâr düşük frekanslarda büyük sapmalara neden olmaktadır.

5.3.3) Güvenilirlik Analizleri

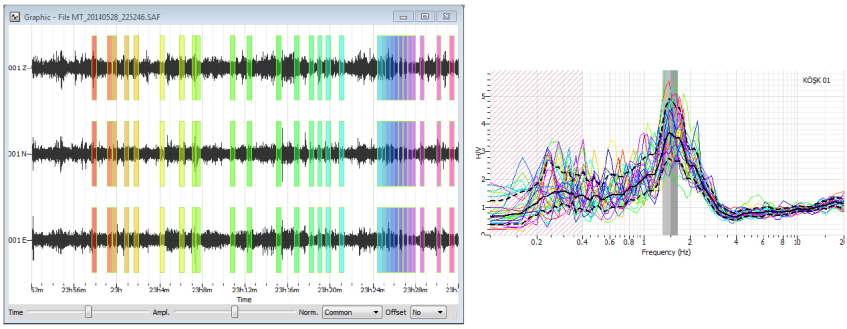
Bu araştırmada elde edilen verilerin analizi Nakamura (1989) tarafından tanımlanan Nakamura (HVSR- Horizontal to Vertical Spectral Ratio, H/V) tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, yatay-düşey genlik oranının S dalgası transfer fonksiyonu ile doğrudan ilgili olan yüzey dalgasının ihmal edilmesi veya giderilmesi varsayımına dayanır. Bu teknik ana kayada ölçülen hareket ile düşey bile-

şenin eşit olduğunu, yatay bileşenlerin ise zemin özelliklerinin niteliğini ortaya koyduğunu varsayar.

Mikrotremor yöntemi ana kaya üzerinde bulunan sedimanların temel titreşim frekanslarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmasına karşın arazide ölçümler esnasında dikkat edilmeyen bazı hususlar toplanan kayıtların güvenilirliğine zarar verebilmektedir. Çevresel koşulların (rüzgâr, trafik, zemin türü vb.) H/V eğrileri üzerindeki etkileri çeşitli araştırmacılar tarafından detaylı şekilde incelenmiştir (Chatelain ve diğ. 2008, Mucciarelli 1998). Verilerin toplanması esnasında ortaya koyulan titizlik veri işlem aşamalarında da devam ederse, yöntemin güvenilirliğini doğrulayan sonuçların ortaya çıkması kaçınılmazdır. SESAME Projesi kapsamında H/V eğrisi hesaplaması için güvenilirlik koşulları ortaya konulmaktadır. Ayrıca H/V eğrilerinde görülen dorukların zemin hakim frekansını işaret edecek derecede belirgin olup olmadığı da belirgin doruk koşulları olarak maddeler halinde incelenmektedir (SESAME 2004). Güvenilir bir H/V eğrisi için koşullar aşağıda verilmiştir:

1. Veri işlem aşamasında seçilen pencere sayısı, pencere uzunluğu gibi parametreleri, tahmin edilen hakim frekansa bağlı denetleyen koşullardır. Güvenilirlik koşullarından birincisinde tahmin edilen hakim frekans (f_0) ile seçilen pencere uzunluğu (Lw) arasında $f_0 > 10/L_W$ şeklinde bir bağıntı mevcuttur. Bu koşulu sağlamayan değerlerde zemin hakim frekansını tespit etmek güvenilir değildir.
2. Seçilen pencere sayısı gözlenen hakim frekansı tespit etmeye yeterli olmalıdır.
3. H/V eğrisi elde edildikten sonra standart sapma değerleri (σA(f)), hakim frekans (f_0) üzerinden denetlenmelidir.

Kaydedilen mikrotremor verileri GEOPSY yazılımı 3.3.1 sürümü kullanılarak değerlendirilmiştir (Wathelet ve diğ. 2020). Bu yazılımda öncelikle üç bileşende toplanan veriler bilgisayara okutulmuş, ardından aritmetik ortalamaları alınarak tüm bileşenler sıfır ortalamaya indirgenmiştir. Spektrum ortamındaki verilere Band-geçişli filtre uygulanmış, 0.1-20 Hz arasındaki sinyaller değerlendirmeye alınmıştır. Verilere Konno-Ohmachi yuvarlatma tekniği uygulanmış, yuvarlatma bant girişi 40 olarak seçilmiştir (Konno ve Ohmachi 1998). Burada verilere Kosinüs penceresi uygulanarak verilerin köşeleri %5 oranında yuvarlatılmıştır. Pencere boyu tüm veriler için 40 sn olarak seçilmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda uygulanan Hızlı Fourier dönüşümü ile veriler frekans ortamına geçirilerek, H/V oranları elde edilmiştir. Bir ölçüm noktasına ait örnek H/V eğrisi Şekil 66'da verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 66: Çalışma alanındaki bir ölçüm noktasına ait mikrotremor verilerinin GEOPSY (2005) yazılımı ile değerlendirmesi, **a)** Seçilen Pencereler, **b)** H/V eğrisi

5.4. BULGULAR VE TARTIŞMA

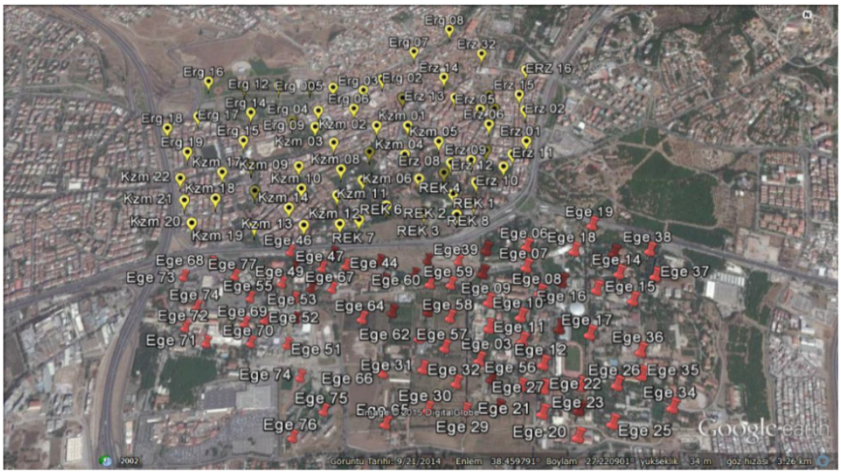
Bu araştırma İzmir İli Bornova ilçesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanındaki ölçümlere ait bilgilere ve elde edilen bulgulara bu başlık altında değinilmiştir.

5.4.1) Araştırma Alanı

Bornova, İzmir İlinin en büyük ilçelerinden biridir. İzmir körfezine 3 km uzaklıktadır. İlçe 205 km^2 alanı kapsamaktadır. Yüzölçümü 224 km^2'dir. Türkiye'nin en büyük üniversitelerinden Ege Üniversitesi'nin ana kampüsü, yine Türkiye'nin en büyük hastanelerinden Ege Üniversitesi Hastanesi ve Yaşar Üniversitesi'nin Selçuk Yaşar kampüsü bu ilçe sınırlarında yer almaktadır. Bu alanda, yerleşimin en yoğun olduğu 3 farklı mahallede (Kazımdirik, Ergene, Erzene) mikrotremor ölçümleri alınmıştır.

5.4.2) Mikrotremor Ölçümleri

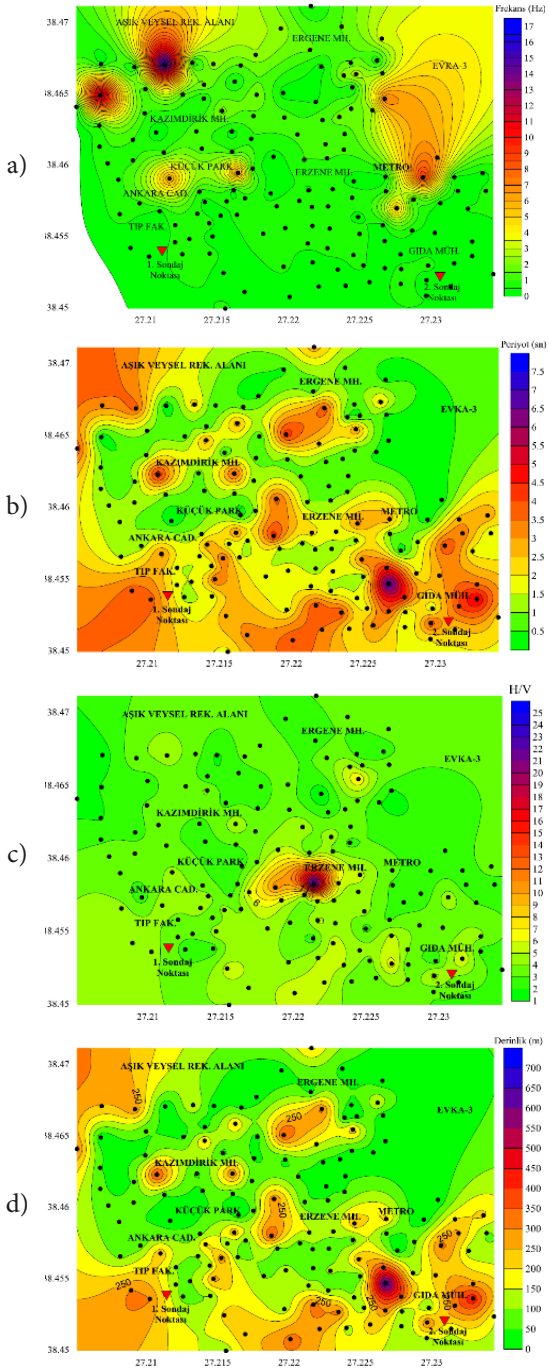
Araştırma kapsamında söz konusu mahallelerde 140 adet lokasyonda mikrotremor ölçümleri yapılmıştır (Şekil 67). Ölçümler, SARA-SR04 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kazımdirik, Ergene, Erzene mahallelerinde 63 ve Ege Üniversitesi kampüsünde 77 noktada mikrotremor ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçüm noktaları genelde 200 m aralıklı olup, bazı lokasyonlarda 50 m'dir. Ölçümlerin tamamı gece saatlerinde, gürültünün en az olduğu zamanlarda alınmıştır. Ölçüm süresi her bir nokta için en az 40 dk'dır.



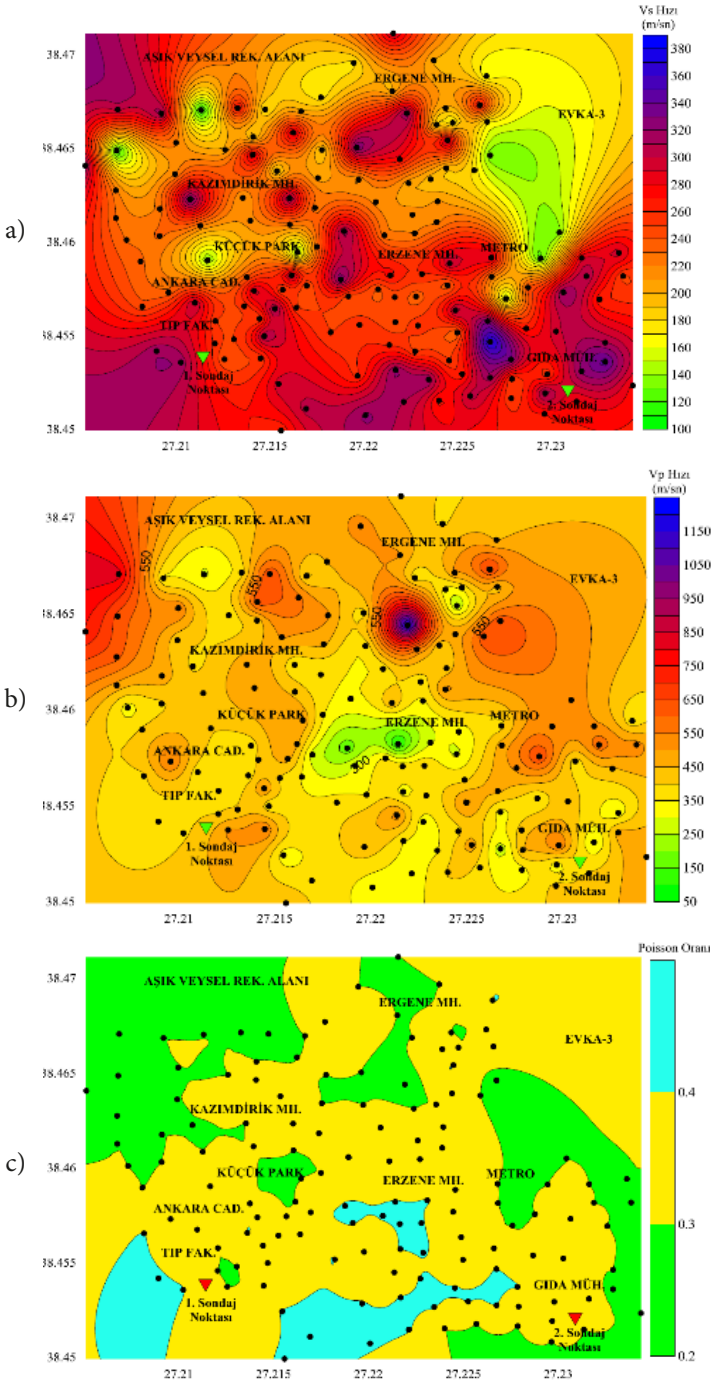
Şekil 67: İzmir İli Bornova ilçesi Kazımdirik, Ergene, Erzene mahallelerinde yapılan mikrotremor ölçümlerinin lokasyonlarını gösteren haritası.

5.4.3) Bulgular

Mikrotremor verilerinin analizi sonucu; zemin hakim periyodu (T_0), yerin sarsıntı büyütmesi (b), sismik hız oranı (Vp/Vs), Poisson oranı (σ), yapı periyotları büyütme aralığı, dayanıklı ana birim üzerindeki gevşek katmanın kalınlığı (Z), S (makaslama/kayma) dalgası hızı (Vs), P (sıkıştırma) dalgası hızı (Vp) hesaplanmış, yerin davranış türü ile sınıflandırılması yapılmıştır. Mikrotremor verilerinden hesaplanan yüzeydeki gevşek katman kalınlık değerleri, İzmir DSİ'den alınan sondaj verileri ile karşılaştırılmıştır. Zemin hakim frekansı 0.1-2.0 Hz arasında değişmektedir. KB'daki iki noktada yüksek frekans değerleri (13-17 Hz) mevcuttur. Bu durum dere yatağı ve yer altında zemin sağlamlaştırmayla ilişkilidir. Hakim periyot değerleri 1-4 sn arasında değişmektedir. Alüvyon birimin hakim olduğu alanlarda periyot değerleri yüksektir. Burada yerel zemin özellikleri genel olarak ZE sınıflamasında olup bazı yerlerde ZF özellikleri de göstermektedir (TBDY, 2019). Bu durum hakim periyodun bölgenin jeolojisi ile uyumlu olduğunu göstermektedir (Şekil 68a,b).



Şekil 68: Kazımdirik, Ergene ve Erzene mahallelerine ait; **a)** zemin hakim frekans, **b)** zemin baskın periyot, **c)** H/V, **d)** Delgado ve diğ. (2000) derinlik haritaları.



Şekil 69: Kazımdirik, Ergene ve Erzene mahallelerine ait; **a)** Delgado ve diğ. (2000) bağıntısından elde edilen Vs, **b)** Vp, **c)** Poisson oranı (σ) haritaları.

H/V değerlerinin noktasal dağılımına bakıldığında bölgede hakim H/V değerlerinin 1 ile 6 arasında değiştiği görülmektedir. Bazı alanlarda H/V değerlerinin yüksek çıkmasının nedeni ya zemin yapısının aşırı yumuşak olması (bataklık) ya da zeminin boşluklu olmasıdır (Şekil 68c). Delgado ve diğ. (2000)'nin bağıntısı kullanılarak elde edilen derinlik haritasında, orta sağlam olarak tanımlanan alanlarda gevşek katman kalınlığı 0 ile 150 m arasında değişim göstermektedir. Bazı lokasyonlarda derinlik değerleri 200-300 m arasında değişmektedir (Şekil 68d). Bölgede en yüksek derinlik değerini veren frekans aralıkları 0.14-0.19 Hz'dir. Bu durumda zemin hakim frekansına göre elde edilen derinlik değerleri uyumludur. Delgado ve diğ. (2000) bağıntısından elde edilen S dalgası (Vs) en düşük hız değeri 100 m/sn iken en yüksek hız değeri 380 m/sn'dir. Bulgular jeoloji ile uyumludur (Şekil 69a).

P dalgası hız (Vp) dağılımı 300-550 m/sn arasındadır ve genel olarak jeoloji ile uyumludur (Şekil 69b). Çalışma alanında Poisson oranı (σ) genelde 0.3 değerine sahipken, bazı alanlarda 0.2 değerindedir (Şekil 69c). Bu da çalışma alanının yoğun olarak gevşek zemin ve bozuşmuş kaya/sıkı toprak olduğunu göstermektedir.

5.5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İzmir İlinin Bornova ilçesinde yerleşimin en yoğun olduğu merkez 3 mahallede (Kazımdirik, Ergene, Erzene) 140 noktada 100 Hz örnekleme aralığı ile mikrotremor ölçümleri alınmıştır. Bulgular, büyük oranda çalışma alanının jeolojisi ile uyumludur. Araştırma kapsamında elde edilen çıktılara ait sonuçlar ve tartışma aşağıda verilmiştir.

5.5.1) Sonuçlar

Ergene, Kazımdirik mahallesi kuzeyi ve Erzene mahallesinin KB bölgelerinde zemin hakim frekans değerleri yüksek, hakim periyot değerleri ise düşük elde edilmiştir. Bu durum kireçtaşının yüzeye yakın olduğu ya da yüzeylendiğini, bölgede az altere olmuş birimlerin varlığını destekleyerek; bölgenin sağlam zemin özelliği gösterdiğini belirtmektedir. Çalışma alanının güneyine inildikçe, Ege Üniversitesi Kampüsü bölgesinde (Kazımdirik ve Erzene mahallelerinin güney kısmı) alüvyon ve yamaç molozunun hakim olduğu görülmektedir. Bölgede elde edilen hakim frekans değerleri düşük, buna karşın hakim periyot değerleri yüksektir. Bu durum bu bölgenin zayıf zemin özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.

H/V oranında etkili olan en önemli faktör jeolojik birimin gelen sismik dalgaya nasıl tepki verdiğidir. Bu nedenle; bazı noktalarda (25, 10) H/V oran değerinin 4'ün üzerine çıkması o noktalardaki zemin yapısının daha yumuşak ya da boşluklu olduğunu göstermektedir. Ege Üniversitesi Metro İstasyonu yakınında alınan ölçümlerde bu boşluklu yapının etkisi H/V oranına yansımıştır ve değeri yükseltmiştir.

Delgado ve diğ. (2000)'den elde edilen gevşek katman kalınlığı haritalarında derinlik değerleri yüksek çıkmaktadır.

Sağlam olarak nitelendirilebilecek zeminler için (Ergene, Kazımdirik mahallesinin kuzeyi, Erzene mahallesinin KB'sı) elde edilen gevşek katman kalınlık değerleri 10-40 m arasında değişirken, zayıf zemin için elde edilen gevşek katman kalınlık değerleri 50-120 m arasında değişmektedir.

Vs hız dağılımları, çalışma alanının sağlam olarak nitelendirilen bölgelerinde yüksek (700-450 m/sn), zayıf zeminde ise düşük (200 m/sn) değerdedir.

Kazımdirik, Ergene ve Erzene mahalleleri için Vp hız dağılımı 300-550 m/sn arasındadır. Çalışma alanının hakim Poisson oranı 0.3 olup; KD ve KB kesimlerde (Ergene ve Erzene mahallesi üst kısımları ile Kazımdirik mahallesinin kuzey kısımları) 0.2 Poisson oranına sahiptir. Çalışma alanında yoğun olarak C (orta sıkı-bozuşmuş kaya) ve D (derin sıkı- gevşek toprak) zemin sınıf türlerine hakimdir. Bu da Vp hız dağılımının genel olarak jeoloji ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

5.5.2) Tartışma

Mikrotremor verilerinden elde edilen hakim frekans, hakim periyot ve H/V oranı kullanılarak elde edilen dinamik zemin parametrelerinin sonuçlarının daha gerçekçi olması için bölgede yapılan sondajlardan faydalanmalı, sismik kırılma ve yansıma ölçümleri sonucunda elde edilen Vp ve Vs hızları ile mikrotremordan elde edilen periyot değerleri desteklenmelidir. Çalışma alanları için elde edilen dinamik zemin parametre değerleri genel jeolojiyi yansıtsa da gerçek değerleri vermemektedir. Çalışmanın bir diğer amacı da mikrotremor verilerinden elde edilen zemin hakim frekans ve periyodunu güvenli bir şekilde elde etmek olduğundan, verilerin deprem mühendisliği açısından da incelenmesi gerekmektedir. Olası bir deprem anında yerleşimi yoğun bu bölgelerin rezonans davranışlarının kestirimleri incelenmelidir.

Bu doğrultuda; Kazımdirik, Ergene, Erzene mahallelerinin genelinde 5-7

katlı binalar bulunmaktadır ve Navarro (2002) bağıntısına göre genel olarak binaların periyotları 0.25-0.35 sn arasında değişim göstermektedir. Çalışma alanının elde edilen hakim periyot haritasına göre Ergene mahallesinde yer alan bazı lokasyonlar (alanın KB'sı), Kazımdirik mahallesinin batısında yer alan bölge, Erzene mahallesi, Bornova ilçe meydanı bölgesi, Erzene Mahallesinin Kuzey kesimleri yapılaşma açısından riskli bölge olarak görülmektedir. Ayrıca, Kazımdirik Mahallesi içinde yer alan Ege Üniversitesi Kampüsü, Tıp Fakültesi, Erzene mahallesi içinde yer alan bazı üniversite binaları ve çevresi de yapılaşma adına risk oluşturmaktadır. Bu bölgelerde detaylı risk çalışmaları yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Aki A.M., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic wave with special reference to microtremors, Bulletin of Earthquake Research Institute, 415-457.

Bolbol D., 2016. Mikrotemor Verilerinden Elde Edilen H/V Eğrilerinin Güvenirliğinin ve Zemin Hakim Titreşim Periyodunun Nitelenmesi: Bornova (İzmir) Kent Merkezi Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 175 s.

Chatelain J-L., Guillier B., Cara F. ve diğ., 2008. Evaluation of the experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings, Bulletin of the Seismological Society America, 6, 33-74.

Delgado J., Lopez C.C., Estevez A. ve diğ., 2000. Microtremors as a geophysical exploration tool: Applications and limitations, Pure and Applied Geophysics, 157, 1445-1462.

Doğan G.G., Yalçıner A.C., Yüksel Y., Ulutaş E., Polat O., Güler I., Şahin C., Tarih A., Kanoğlu U., 2021. The 30 October 2020 Aegean Sea Tsunami: Post-Event Field Survey Along Turkish Coast, Pure and Applied Geophysics 178, 785-812.

Erdoğan B., 1990. İzmir–Ankara Zonu'nun İzmir ile Seferihisar arasındaki bölgede stratigrafik özellikleri ve tektonik evrimi. TPJD Bülteni, 2, 1–20.

GEOPSY (2005) Geophysical signal database for noise array processing. Erişim adresi: www.geopsy.org

Gülerce Ü., 2002. İzmir ilindeki zemin hâkim titreşim periyodu ve zemin büyütmesi değişiminin mikrotremor ölçümleri ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 180 s.

Ishiyama Y., 1982. Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 10, 635-650.

Kagami H., Okada S., Shino K. ve diğ., 1986. Observation of 1 to 5 second microtremors and their application to earthquake engineering. Part III. A two dimensional study of site effects in S. Fernando valley, Bulletin of the Seismological Society of America 76, 1801-1812.

Kanai K., Tanaka T., 1961. On microtremors, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 39, 97-114.

Keçeli A., 2009. Uygulamalı jeofizik. Ankara: TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları No:9.

Kıncal C., 2005. İzmir İç Körfezi Çevresinde Yer Alan Birimlerin Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Teknikleri Kullanılarak Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 342 s.

Koca M.Y., 1995. Slope Stability Assessment of the Abandoned Andesite Quarries in and around the Izmit City Centre, PhD Thesis, Dokuz Eylul University, The Graduate School of Natural

and Applied Sciences, Izmir, 430 p.
Konno K., Ohmachi T., 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components. Bull. Seismol. Soc. Am., 88(1), 228–241.
KRDAE, 2022. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM), İstanbul, Erişim adresi: www.koeri.boun.edu.tr
Mucciarelli M., 1998. Reliability and applicability of Nakamura's Technique using microtremors: An experimental approach, Journal of Earthquake Engineering, 625-638.
Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of Railway Technology Research Institute, 30, 25-33.
Navarro M., Sanchez F.J., Fetiche M., Vidal F., Enomoto T., Iwatate T., Matsuda I., Maeda T., 2002. Statistical estimation for dynamic characteristics of existing buildings in Granada, Spain using microtremors. (In: Structural Dynamics, Eurodyn 2022, vol.1, Editors: Grundmann H., Schueller G.I, Balkema Publishers, Rotterdam-Holland, 853, 807-812.
Ohta Y., Kagami H., Goto N., Kudo K., 1978. Observation of 1- to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. Part I: Comparison with long-period accelerations at the Tokachi-oki earthquake of 1968, Bulletin of the Seismological Society of America June 68, 767-779.
Omori F., 1895. On the aftershocks of earthquakes, J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo 7, 111–200.
Seht M.I., Wohlenberg J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, Bulletin of the Seismological Society of America 89(1), 250-259.
SESAME, 2004. Site effects assessment using ambient Excitations, guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations-measurements, processing and interpretation. SESAME European Research Project Technical Report, European Commission Research General Directorate Project No: EVG1-CT-2000-00026. Erişim adresi: sesame.geopsy.org
TBDY, 2019. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ek: Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
Toksöz M.N., 1964. Microseisms and an attempted application to exploration, Geophysics, 29, 154-177.
Wathelet M., Chatelain J.-L., Cornou C., Di Giulio G., Guillier B., Ohrnberger M. ve Savvaidis A., 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. Seismological Research Letters, 91(3), 1878--1889, doi: 10.1785/0220190360.
Yamanaka H., Takemura M., Ishida H. ve diğ., 1994. Characteristics of long-period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers, Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 1831-1841.