

Mikrobölgeleme ve Mikrotremor Ölçümü

Muammer Tün¹

Özet

Doğa ve insan kaynaklı tehlikelere maruz kalan yerleşim alanları ve sistemlerde, zarar görülebilirlik koşullarına bağlı olarak öngörülebilen veya öngörülemeyen kayıplar gerçekleşebilmektedir. Bu kayıpların miktarı, meydana gelen olayın afet olarak tanımlanmasında doğrudan etkili bir değişkendir. Bir bölgenin yerleşime uygunluk değerlendirmeleri kapsamında, özellikle afet risk yönetimi çalışmaları çerçevesinde mikrobölgeleme araştırmaları yürütülür. Yerbilimsel verilerin, araştırma sahasını temsil edebilecek dağılımda toplanması için araştırma alanının eşit hücrelere bölünmesi, karelaçlama olarak ifade edilir.

Geoteknik zemin araştırmalarında, sondaj çalışmaları ile sığ zemin özellikleri belirlenirken anakaya derinliğinin 800-1000 m derinliğine ulaştığı basen yapılarında risk analizinde geoteknik araştırmaları tamamlayıcı jeofizik yöntemlerden yararlanır. Mikrotremor ölçümleri kullanılarak zemin hakim frekansı, anakaya derinlik geometrisi, sismik hız profili belirlenir. Sonuç olarak deprem yer hareketi gibi karmaşık bir etkinin ortaya konulmasına yardımcı olacak, zemin sınıflaması, odaklanma etkisi ve frekans bağımlı yapı-zemin etkileşimi gibi risk değerlendirmelerinin yapılması mümkündür. Bu bölümde, mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında yürütülen mikrotremor ölçüm yöntemi ve uygulama alanları tartışılacaktır.

1.1. Mikrobölgeleme

Bir bölgenin doğa kaynaklı tehlikelere karşı yerleşime uygunluk değerlendirmeleri afet risk yönetimi çalışmalarının önemli bir aşamasıdır. Mikrobölgeleme, mekânsal planlama çalışmaları yapılırken; yerleşime açılması düşünülen boş alanlardaki tüm afet tehlikelerini, yapılaşmış alanlarda ise tüm afet risklerini, büyük ölçekli haritalar üzerinde belirleyerek, güvenli arazi kullanımı ve bölgeleme kararlarının alınmasına, kentsel dönüşüm ve zarar azaltma planlaması çalışmaları için ise; stratejik amaçlar, hedefler ve öncelikler

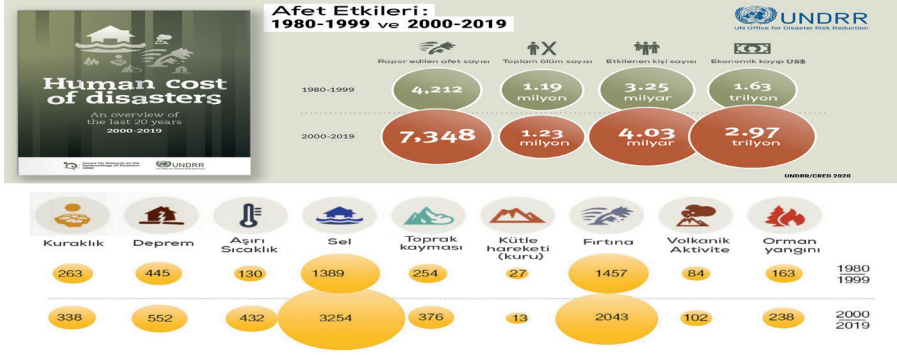
1 Doç. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, mtun@eskisehir.edu.tr,
<https://orcid.org/0000-0002-7118-9977>

belirlenmesine girdi sağlayan çok disiplinli çalışmalardır (Ergünay 2008). Mikrobölgeleme çalışmaları ilk olarak 1960'lı yıllarda yerleşime açılması planlanan alanlardaki deprem tehlikesinin belirlenerek deprem kaynaklı zararların azaltılması amacıyla başlatılmış ve sismik mikro-bölgeleme olarak adlandırılmıştır (Ergünay 2008). Mikrobölgeleme çalışmaları 1:1000-1:5000 ölçeklerinde yapılmaktadır. Deprem yer hareketi kaynaklı sıvılaşma tehlikesi, taşıma gücü kaybı, kütle hareketleri, yüzey faylanması gibi tehlike alanları büyük ölçekli haritalar üzerinde gösterilebilir. Mikro-bölgeleme çalışmaları deprem tehlikesi kaynaklı etkilerin haritalanması olarak ifade edilmesine karşın yerleşime uygunluk değerlendirilmesi kapsamında tüm doğa ve teknolojik tehlike kaynaklarının dikkate alınması gerektiği göz ardı edilemez. Dolayısıyla, mikro-bölgeleme çalışmalarının disiplinler üstü yaklaşımla bütünlük tehlike değerlendirmesi çerçevesinde planlanması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu kapsamda mikro-bölgeleme çalışmaları çalışma sahasının tehlikeye maruziyet koşullarına bağlı olarak aşağıdaki alanlarda yapılması gerektiği değerlendirilmektedir. Mikro-bölgeleme çalışmaları yerleşime uygunluk ve dirençlilik çalışmalarına altlık veri sağlaması beklenir. Mikro-bölgeleme haritaları, tehlike kaynakları, maruziyet koşulları ve zarar görülebilirlik değişkenleri kullanılarak yapılan afet risk analizlerine altlık veri oluşturur. Bu bölümde sismik ve geoteknik mikro-bölgeleme çalışmaları kapsamında mikrotremor ölçümlerinin yeri ve önemi tartışılmıştır.

Tehlike türleri, coğrafi bölgelere göre değişkenlik gösterebilir. Birleşmiş Milletler Afet Risk Azaltma Ofisi'nin raporuna göre 318 farklı tehlike ortak bir sınıflandırma dili kullanılarak uluslararası bütünlük bir kullanıma uyumlu hale getirilmiştir (UNDRR 2020). Tehlikelerin farklı coğrafi bölgelerdeki etkileri, tehlike kaynağının şiddeti veya büyüklüğü, iklimsel koşullar, atmosferik koşullar, yerel zemin koşulları, sosyokültürel yapı, bölge ekonomisi, nüfus yoğunluğu ve kentin dirençliliğine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Dolayısıyla bir bölgede mikro-bölgeleme çalışmasına başlamadan önce araştırma sahasında daha önceden meydana gelen ve afete dönüşen tehlike türlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Ülkemizde ve dünyada sıklıkla görülen bazı afetler grafik gösterimle birlikte Şekil 1'de verilmiştir.



(a)



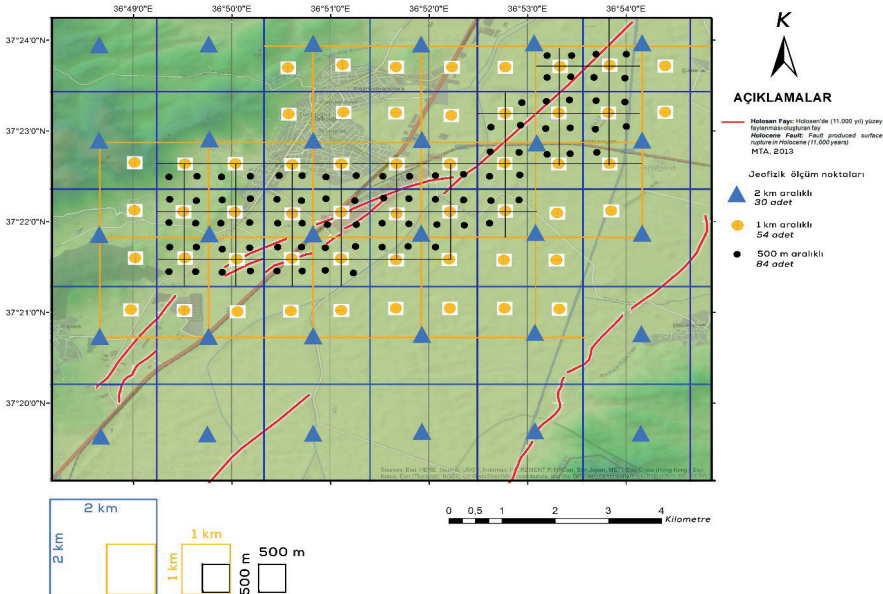
(b)

Şekil 1. (a) Ülkemizde ve dünyada sıklıkla görülen bazı afetlerin grafik gösterimi
 (b) Dünyada 1980--2019 yılları arasında rapor edilen afet etkileri Kaynak: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (CREd and UNDRR 2020)

Tablo 1. Mikro-Bölgeleme çalışmasının kapsamı

Doğa Mikro-bölgelemesi	Teknoloji Mikro-bölgelemesi	Kent ve Nüfus Mikro-bölgelemesi
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Meteorolojik	<input type="checkbox"/> Endüstriyel	<input type="checkbox"/> Kırılgan Nüfus
<input type="checkbox"/> Klimatolojik	<input type="checkbox"/> Maden	<input type="checkbox"/> Dayanaksız Üst yapı ve Altyapı
<input type="checkbox"/> Jeolojik	<input type="checkbox"/> Ulaştırma	<input type="checkbox"/> Yoğunluk
<input type="checkbox"/> Geoteknik	<input type="checkbox"/> Enerji	<input type="checkbox"/> Arkeolojik
<input type="checkbox"/> Hidrolojik	<input type="checkbox"/> İletişim	
<input type="checkbox"/> Sismik		
<input type="checkbox"/> Biyolojik		
<input type="checkbox"/> Tarım		
<input type="checkbox"/> Orman		

Mikro-bölgeleme çalışmalarının projelendirilmesindeki kritik aşamalar Tablo 2'de verilmiş olup mikro-bölgeleme çalışmalarının en önemli aşaması veri toplamadır. Mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında, araştırma sahasında toplanan verilerden elde edilen sonuçların doğru yorumlanması doğru karar almaya imkân sağlar. Bu aşamada araştırmanın amacı yani araştırma probleminin net bir şekilde belirlenmesi gerekir. Problemin ortaya konulmasıyla birlikte veriye dayalı bilginin elde edilmesi mikrobölgeleme çalışmalarının temelini oluşturur. Herhangi bir yer bilimsel değişkenin alansal değişimi incelenirken öncelikle veri toplama sıklığı planlanır (Şekil 2). Bu planlama sürecinde öncelikle, belirlenmek istenen problem, veri toplama yöntemi, morfoloji ile birlikte yerel zemin özellikleri dikkate alınır. Genellikle gridlenen araştırma sahasındaki her bir eleman veya birim hücrede ölçüm alınması ve değerlendirilmesi oldukça zor ve yüksek maliyetlidir. Bu nedenle, daha geniş aralıklı dolayısıyla az sayıda ölçüm ile başlayarak değişkenin anomali verdiği alanlar belirlenerek veri toplama planlaması yapılır. Örneğin, bir basen yapısındaki çalışma sahasında sedimanter tabakaların kalınlığı ve derinlik geometrisi araştırmasında verinin farklı doğrultulardaki değişim trendine bakılarak ölçüm planlamasına başlanır. Değişim trendinin ve veri anomalisinin tespit edildiği alanlarda ölçüm sıklığı artırılarak değişkenin alansal ve yönsel değişimleri incelenir. Sonuç olarak, araştırma sahasındaki yer bilimsel bir parametrenin belirli bir belirsizlik içerisinde ölçümü yapılmış olur.



Şekil 2. Mikrobölgeleme çalışmalarında gridleme ile veri toplama geometrisi uygulama örneği haritası

Tablo 2. Mikro-bölgelem çalışması proje aşamaları

1	• Tehlike kaynaklarının belirlenmesi
2	• Veri toplama yöntemlerinin belirlenmesi
3	• Mekansal veri tabanı tasarımı
4	• Arazide veri toplama planlaması ve uygulaması
5	• Veri işlem ve jeoistatistik analiz
6	• Sayısal haritalama, modelleme ve yorumlama
7	• Sonuçların bütünlük değerlendirilmesi ve paydaşlarla birlikte tartışılması
8	• Raporlama ve Sunuş

1.2. Mikrotremor Ölçümü

Mikrotremor ölçümünde ortam gürültüsü 3 bileşenli kayıtcı ile ortalama 30 dk süreli kaydedilir (Şekil 3). Tek istasyon mikrotremor ölçüm yönteminde (HVSr- Horizontal to Vertical Spectral Ratio) doğal ve insan kaynaklı titreşimlerin kaydedilerek frekans ekseninde yatay bileşenin düşey bileşene spektral oranı hesaplanır (Bonnetfoy-Claudet, Cornou et al. 2004, Cornou, Kristek et al. 2004). Yöntemin ilk olarak (Omori 1908) tarafından yapılan çalışmalarda kullanılmaya başlanmış ve Kanai'nin çalışmalarında geliştirilerek kullanılmaya devam edilmiştir (Kanai, Tanaka et al. 1954, Kanai 1961, Kanai and Tanaka 1961, Nogoshi and Igarashi 1970, Nogoshi and Igarashi 1971) çalışmalarıyla kullanılmaya devam edilmiştir. Yöntemin kullanımı (Nakamura 1989) çalışmasıyla birlikte yaygınlaşmıştır. Zemin hakim frekansının belirlenmesinde kullanılabileceği görülen HVSr yöntemi, ilerleyen yıllardaki bilim ve teknolojiye gelişmelerle birlikte zemin mühendislik problemlerinin çözümüne yönelik uygulama alanlarında tercih edildiği görülmektedir (Lermo and Chávez-García 1994, Malagnini, Tricarico et al. 1996, Seekins, Wennerberg et al. 1996, Teves-Costa, Matias et al. 1996). Mikrotremor ölçümünün alınması ve güvenilirlik koşulları ve aralıklarına ilişkin kılavuz SESAME, (2004) projesi kapsamında geliştirilmiştir.



(a)



(b)

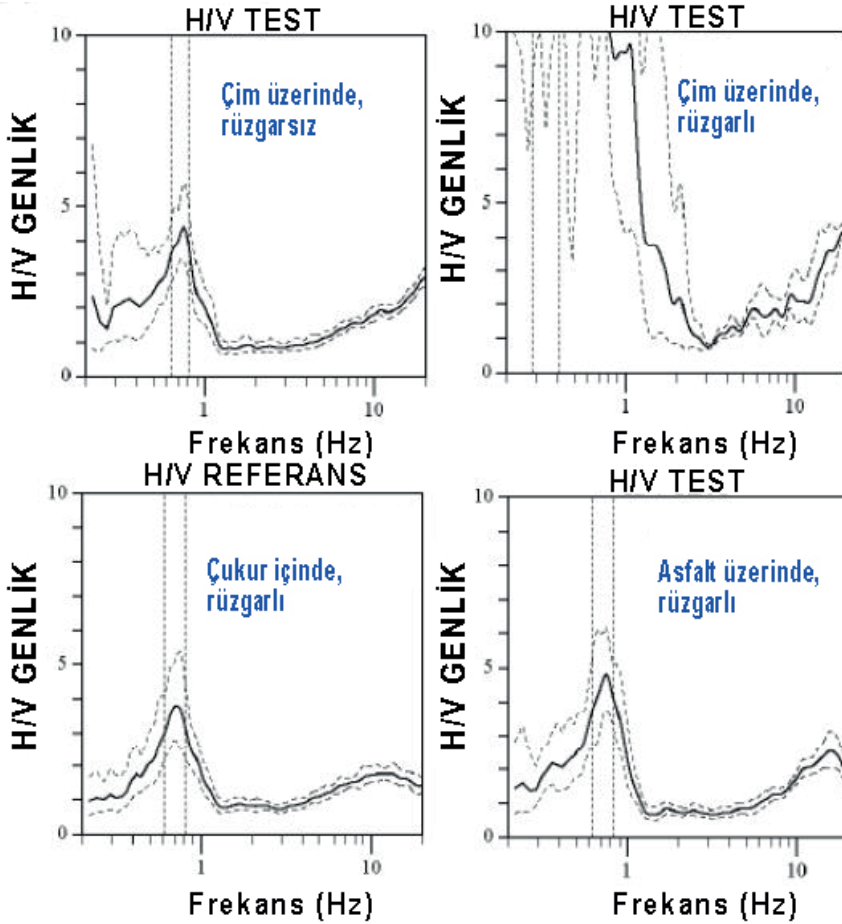
Şekil 3. (a) Beton zemin üzerinde mikrotremor ölçümü alınırken bir fotoğraf (b) toprak zeminde mikrotremor ölçümü alınırken bir fotoğraf; Sensör: GURALP CMG 6TD

Farklı zemin ve atmosferik hava koşullarında kaydedilen mikrotremor verilerinin H/V spektral oranı grafik verileri ve karşılaştırmalı yorumları önceki çalışmalarda detaylı olarak tartışılmıştır (Chatelain, Guillier et al. 2008). Bu araştırma sonuçlarına göre rüzgar, yağmur gibi dış ortam gürültüsünden arındırılmış kayıtlarda H/V genlik eğrilerinin daha net bir şekilde elde edilebildiği görülmektedir (Şekil 4). Bu karşılaştırma çim ile rüzgarın etkisinin veri kalitesinde çok fazla olumsuz etki oluşturduğunu, çukur içinde veya asfalt zemin üzerinde ise rüzgarın büyük bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Mikrotremor ölçümü alınırken nelere dikkat edilmesi gerektiğine ilişkin kısa teknik notlar Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Mikrotremor ölçümlerinde uyulması gereken bazı hususlar (Atakan, Bard et al. 2004, Atakan, Duval et al. 2004, SESAME 2004)

Parametre	Tavsiyeler	
	Beklenen minimum f_0 (Hz)	Min. kayıt süresi (dk.)
Kayıt süresi	0.2	30
	0.5	20
	1	10
	2	5
	5	3
	10	2
Ölçüm aralığı	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikrobölgeleme: Geniş bir aralık ile başlangıç (örn.: 500 m'lik grid) ve yanal değişimin artması durumunda 250 m aralığa düşülebilir. ▪ Tek yer tepkisi: Bir f_0 değeri türetmek için kesinlikle tek ölçüm noktası kullanma, en az 3 ölçüm noktasında testi yap 	
Kayıt parametreleri	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Üreticiler tarafından önerilen sensör seviyesi ▪ Sinyal doygunluğa ulaşmadan mümkün olan maksimum kazanç seviyesini sapta 	
Zemin ile sensör arası kuplaj	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mümkün olduğunda sensörü doğrudan asıl zemin üzerine kur ▪ Sensörü çok yumuşak zemin (çamur, sürtülmüş toprak, uzun boylu ot, vb.) veya yağmurdan sonra suya doygun zemin üzerine kurmaktan kaçın 	
Yapay Zemin ile Sensör arası kuplaj	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sünger, karton gibi yumuşak malzemeli yüzeylerden kaçın ▪ Sensörün kurulumunu ve düzeçlenmesini engelleyecek dik yamaçlarda, kum ile dolu bir kap veya kum yığını üzerine sensörü kur. ▪ Kar veya buz üzerinde meydana gelebilecek lokal bir erimeden dolayı sensörün devrilmesinden sakınmak için, metal veya ağaç bir plaka veya kum ile dolu bir kap üzerine sensörü kur. 	
Çevredeki yapılar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rüzgar esintisinden dolayı (yaklaşık ≥ 5 m/s), binalar, ağaçlar gibi yapıların yanında kayıt almaktan kaçın. Bu durum eğriler içinde bazı düşük frekanslar olarak görülür ve H/V sonuçlarını etkiler. ▪ Kanalizasyon kapakları, boru hatları, araç park yerleri gibi yeraltı yapıları üzerinde ölçüm almaktan kaçının. 	
Hava koşulları	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rüzgar: 5 m/s'den daha hızlı rüzgarlardan sensörü koruyun. Bu önlem yapıların yakınında değilseniz yardımcı olacaktır. ▪ Yağmur: Yoğun yağmur altında ölçüm almaktan sakının. Hafif yağmur fark edilir ölçüde etkiye sahip değildir. <p>Sıcaklık: üreticinin talimatlarına uygun olarak sensörü ve kayıtçıyı kontrol et.</p>	
Bozulmalar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tekil kaynaklar: İnşaat makineleri, endüstriyel makineler, pompalar, jeneratörler gibi gürültü kaynaklarının yakınında ölçüm almaktan sakının. ▪ Geçiciler: Ayak sesleri, arabalar gibi geçici gürültüler durumunda, etki ortadan kalktıktan sonra veri analizi için yeterli olacak pencere uzunluğu sağlayacak kayıt süresini sağla. 	

Mikrotremorların kaynağı ile ilgili olarak (Gutenberg 1958) titreşim hareketinin frekansına bağlı olarak farklı tipte kaynakları tanımlayan bir tablo hazırlamışlardır. Mikrotremor kaynaklarının frekans aralığına ilişkin bilgi Tablo 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Aynı yerde ölçülen H/V eğrilerinin karşılaştırılması. (Chatelain ve diğ., 2008).

Tablo 4. Frekansa göre gürültü kaynakları (Gutenberg 1958, Asten 1978, Asten and Henstridge 1984).

	Gutenberg, 1958	Asten, 1978
Kıyılarda oluşan dalgalar	0.05-0.1 Hz	0.5-1.2 Hz
Ay tutulması/büyük ölçekli meteorolojik salınımlar	0.1-0.25 Hz	0.16-0.5 Hz
Okyanuslarda oluşan siklonlar	0.3-1 Hz	0.5-3 Hz
Yerel meteorolojik olgular	1.4-5 Hz	
Volkan kökenli titreşimler	2-10 Hz	
Kent içindeki günlük aktivite	1-100 Hz	1.4-30 Hz

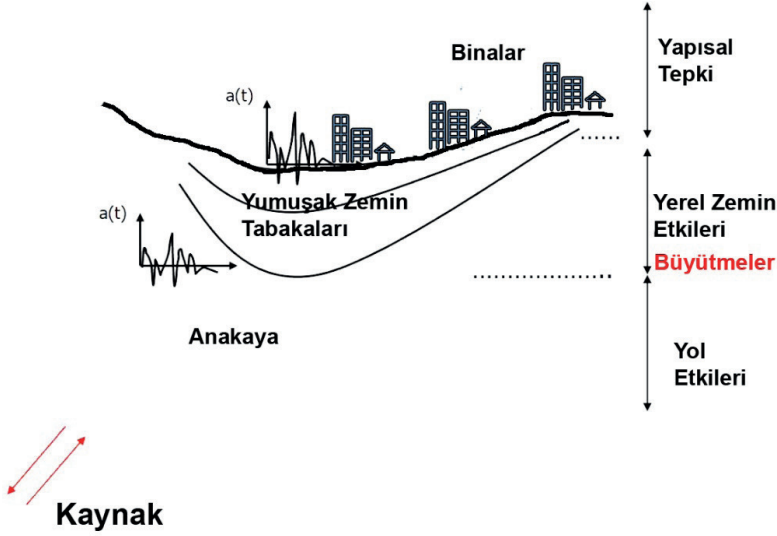
Mikrotremor ölçümünün uygulama kolaylığı ve düşük maliyetli olması yöntemin kullanımında oldukça etkili olmuştur. Sedimanter havzaların basen yapısının hakim frekans ve ana kaya derinlik geometrisi değişkenleri kapsamında belirlenmesi deprem yer tepkisi analizlerinde oldukça önem kazanmıştır. Deprem kaynaklı deprem dalgalarının yeraltı yapısal özellikleri kaynaklı odaklanma etkisi nedeniyle kuvvetli yer hareketi miktarında büyütme gerçekleştiği bilinmektedir. Şekil 5’de kaynaktan yayılan bir deprem dalgasının içinden geçtiği jeolojik ortam boyunca maruz kalacağı etkiler grafik gösterim ile ifade edilmeye çalışılmıştır. Odaklanma etkisine neden olabilecek yumuşak zemin tabakası ile anakaya derinlik sınırı geometrisinin zemin hakim frekansı ve sediman kalınlığı ilişkisini kullanarak yorumlayan bir çok araştırma bulunmaktadır. Farklı çalışma sahalarında alınan mikrotremor ölçümlerinden elde edilen hakim frekans değerleri ile üst sediman kalınlıkları arasındaki ilişkiyi ortaya koyan birçok çalışma vardır (Ibs-von Seht and Wohlenberg 1999, Delgado, López Casado et al. 2000a, Parolai, Bormann et al. 2002, D’AMICO, Picozzi et al. 2004, Hinzen, Weber et al. 2004, García-Jerez, Luzón et al. 2006, Motamed, Ghalandarzadeh et al. 2007, Birgoren, Ozel et al. 2009, Dinesh, Nair et al. 2010, Gosar and Lenart 2010, Özalaybey, Zor et al. 2011, Sukumaran, Parvez et al. 2011, Karabulut 2012, Tün 2013, Tün, Pekkan et al. 2016, Tün, Pekkan et al. 2016, Gupta, Parvez et al. 2020, Kumar and Mahajan 2020, Rupar and Gosar 2020, Stanko and Markušić 2020) (Şekil 6).

Bu ilişki

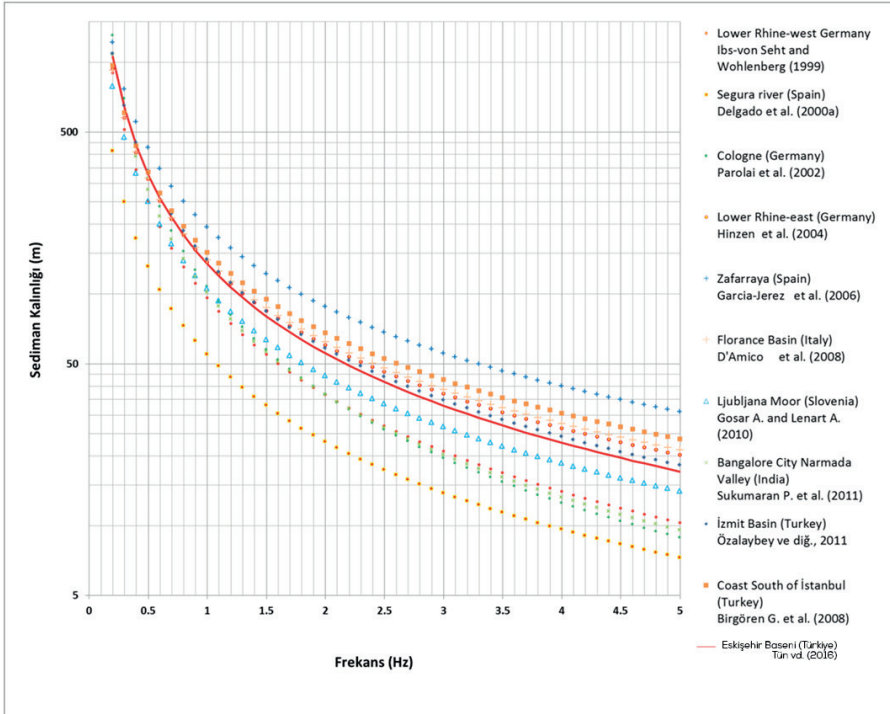
$$h = af_r^{-b}$$

1

doğrusal olmayan bir regresyon bağıntısı ile ifade edilmiştir.



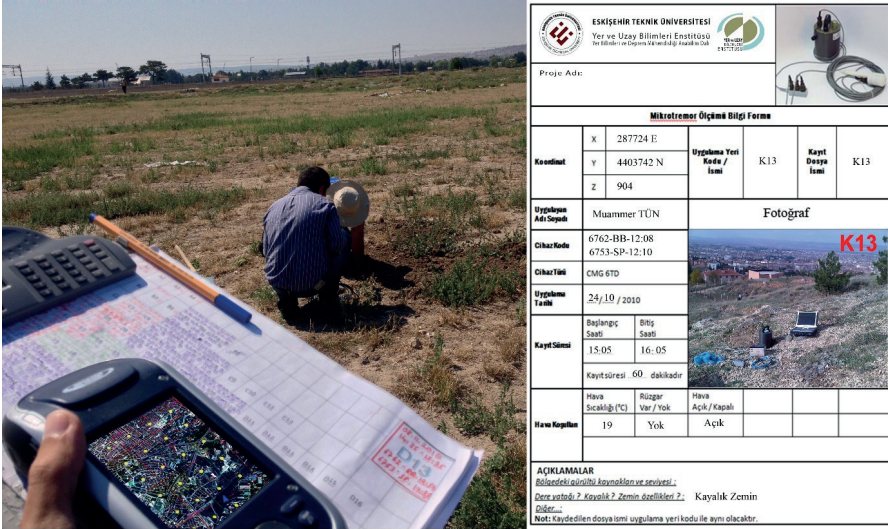
Şekil 5. Deprem kaynağından yayılan deprem dalgalarının yol etkisi, sıfır sedimanter zemin tabakalarının etkisinin gelişebileceği yapısal bir ortamın grafik gösterimi.



Şekil 6. Farklı araştırmacıların farklı çalışma alanları için geliştirdikleri hakim frekans-ana kaya derinliği değişim grafikleri.

1.2.1. Mikrotremor Ölçüm Planlaması ve Veri Toplama

Mikro-bölgeleme çalışmasına yöntem belirlendikten sonraki önemli aşamalardan birisi sahada bu verinin toplanmasına yönelik planlamanın yapılmasıdır. Harita üzerinde yapılan planlamalar saha gerçekliği ile karşılaşıldığında ulaşım ve uygulamada güçlükleri meydana gelebilir. Bu nedenle saha ölçüm planlamalarında mümkün olduğunca bu güçlüklerin giderilmesine yönelik B planı mutlak yapılmalıdır. Mikrotremor ölçümlerinde, 2 nokta arasında kuş uçuşu 500 m olduğu düşünülürse bir noktadan diğerine varış zamanı araçla ortalama 5 dakika planlanabilir. Ancak iki nokta arasında yüksek eğimli arazi, bataklık, akarsu, endüstriyel tesis, çevrili özel mülk, askeri bölge gibi koşullarda bu ulaşım süresi 1 saati geçebilir. Ölçüm planlamasında, ölçüm alınacak yerlerin sayısal harita üzerinde önceden işlenmesi (Şekil 7) ve kodlanması mutlaka yapılmalıdır, Planlanan ölçüm yerinden saha koşulları nedeniyle olası bir sapma durumunda yerinde gelişmiş el GPS'leri ile veri tabanına aktarılması gerekir. Tüm bu koşullar geniş bir araştırma sahasında ortalama 1000 ölçüm noktası için değerlendirilmelidir. Mikrotremor ölçümü alınırken sensörün konumlandırılacağı zeminin toprak, kaya, asfalt, beton gibi özellikleri tanımlanmalıdır. Sensörün kuzey yönlenmesi ve düzenci kontrol edilmeli, rüzgar, nem, sıcaklık, atmosfer basıncı gibi hava koşulları not edilmelidir. Ayrıca ortamda endüstriyel, trafik, yüksek gerilim, trafo gibi yüksek gürültü kaynakları varsa form üzerine işlenmelidir (Şekil 7b).



(a)

(b)

Şekil 7. (a) Örnek bir uygulama noktasında ölçüm alınırken ölçüm yerinin kodu, cihaz kodu, ölçüm saati forma ve el GPS'indeki sayısal harita üzerine veri tabanına girilmelidir (b) Her ölçüm noktası için mikrotremor ölçüm formu doldurulmalıdır

1.2.2. Tek İstasyon Mikrotremor Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

(Bour, Fouissac et al. 1998) çalışmasında Nogoshi-Nakamura tekniğinin aşağıdaki varsayımlara dayandığı belirtilmiştir. Mikrotremorlar birkaç farklı dalganın bir araya gelmesinden oluşur, fakat baskın olan, daha derin ve sert bir alt tabakanın üzerindeki yumuşak yüzey tabakalarında yayılan Rayleigh dalga türüdür. Rayleigh dalgalarının gürültü (titreşimler) hareketi üzerindeki etkisi (ERW), yüzeydeki düşey spektrum (V_S) içinde yer alırken, tabaka tabanında yoktur (V_B).

$$E_{RW} = \frac{V_S}{V_B} = \frac{\text{yüzey}}{\text{taban}} \quad 2$$

Mikrotremor hareketlerinin düşey bileşeni, üst sedimanter ortamı oluşturan yumuşak zemin tabakaları tarafından büyütme etkisine maruz kalmaz. 0.2-20 Hz frekans aralığı için hareketin yatay ve düşey bileşenlerinin spektral oranı, tabakanın tabanında 1'e yaklaşır.

$$\frac{H_B}{V_B} = 1 \quad 3$$

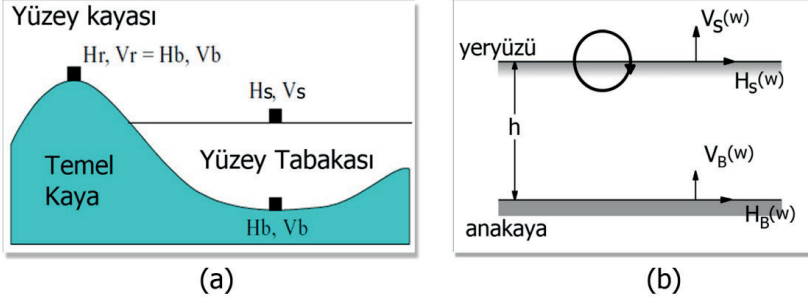
Yüzey jeolojisinden kaynaklı yerel etkiler genellikle yumuşak zemin tabakasının yüzeyindeki deprem kaydının yatay bileşeni (H_s) ile mostra veren anakayadaki yatay bileşen) arasındaki oran (S_1) ile açıklanabilir.

$$\frac{H_s}{H_B} = S_1 (\text{Yerel Zemin Etkisi}) \quad 4$$

H_B , V_B ; temel kayadaki düşey ve yatay spektrumlarıdır. H_s , V_s ; Rayleigh dalgalarının yüzeydeki düşey ve yatay doğrultudaki spektrumlarıdır (Şekil 8). Eğer Rayleigh dalgasının etkisi yoksa, $V_s = V_B$ olacaktır. Eğer $V_s > V_B$ ise bu sonuç yüzey dalgalarının etkisi olarak düşünülür. Rayleigh dalga etkisi

$$E_{RW} = \frac{V_S}{V_B} = \frac{\text{yüzey}}{\text{taban}} \quad (\text{Rayleigh Dalga Etkisi}) \quad 5$$

olarak tahmin edilir



Şekil 8. (a) Sedimanter basen yapısı (Nakamura 2000) (b) Nakamura (1989) tarafından önerilen mikrotremorların yayılımı ile ilgili basit model.

Tek istasyon mikrotremor ölçümlerinin değerlendirilmesinde H/V Spektral Oran (Nakamura) Yöntemi kullanılarak yatay bileşenin düşey bileşene spektral oranı alınır. Mikrotremor ölçümünde, yeraltında üst sediman tabakalar tarafından örtülü anakaya ile üst sedimanın empedans farkı nedeniyle ortaya çıkan sonuçlar dikkate alınır. Dolayısıyla, bu yöntem ile sediman-ana kaya sınır geometrisi tespit edilebilir. H/V spektral oranından elde edilen pikin genliği, ardışık iki tabaka arasındaki hız kontrastıyla ilişkilendirilir.

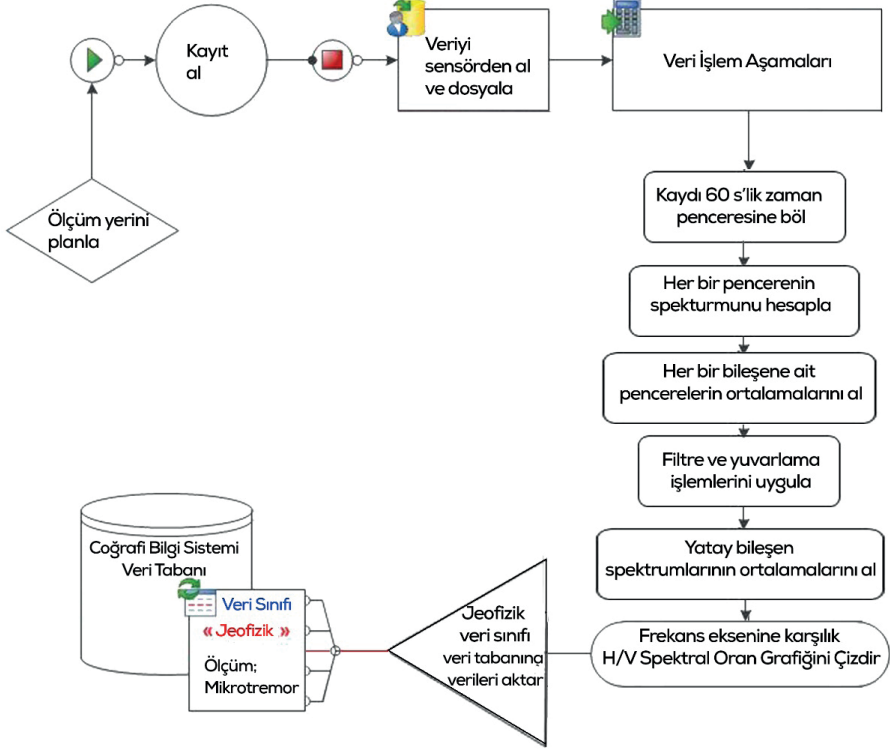
Bu koşullar altında, yumuşak yüzeY tabakasının üzerinde kaydedilen gürültülerde, yatay ve düşey bileşenleri arasındaki spektral oran, Rayleigh dalgalarının etkisini (E_{RW}), jeolojik yapıdan kaynaklanan etkiyi koruyarak yok eder (Bour, Fouissac et al. 1998).

$$S_2 = \frac{S_1}{E_{RW}} = \frac{H_S}{V_S}$$

6

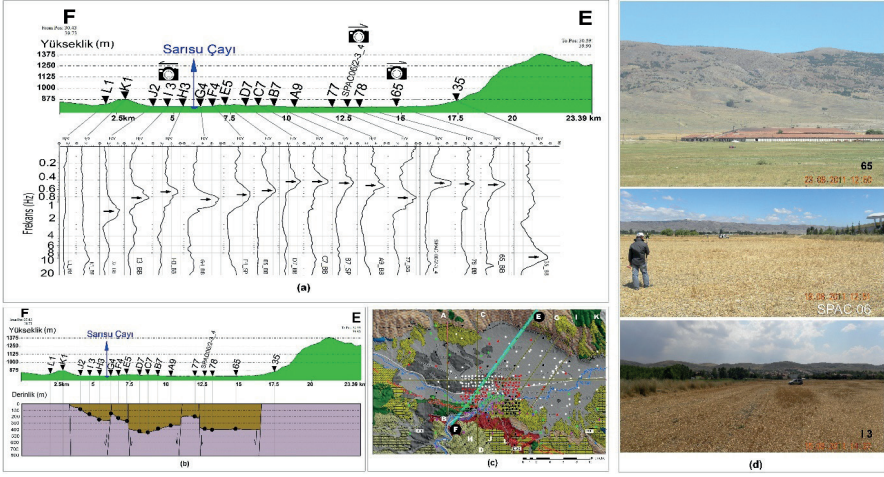
Bu oran H/V spektral oranı olarak adlandırılır.

Tek istasyon mikrotremor verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan işlem akışı Şekil 9'de verilmiştir. Her bir ölçüm noktasında en az 30 dakika veri kaydedilmesi önerilir. Mikrotremor ölçümünde en ideal kayıt zemin ortamının doğal titreşimcik kaydının alınması olmasına karşın geçici ortam gürültüleri de kaydedilecektir. Bu nedenle, mikrotremor kaydının en az 30 dakika süreli olarak alınması önerilir.



Şekil 9. Tek istasyon mikrotremor ölçümü veri toplama, veri işlem ve kayıt iş akış diyagramı (Tün 2013)

(Tün, Pekkan et al. 2016) araştırma makalesinde Eskişehir baseni ana kaya derinlik geometrisi mikrotremor ölçüm yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve jeolojik yapı ile uyumu tartışılmıştır (Şekil 10). Ayrıca (Tün, Pekkan et al. 2022) araştırma makalesinde alüvyon sığ sedimanı oluşturan alüvyon tabakasındaki H/V oran eğrilerindeki büyüklüklerin istatistiksel dağılımı incelenerek eski alüvyon ve yeni alüvyon ayrımının yapıldığı görülmektedir.



Şekil 10. Eskişehir Baseni anakaya derinlik geometrisi ve mikrotremor ölçüm yerlerini gösteren barita (Tun, Pekkan et al. 2016)

KAYNAKLAR

- Asten, M. and J. Henstridge (1984). "Array estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins." *Geophysics* **49**(11): 1828-1837.
- Asten, M. W. (1978). "Geological control on the three-component spectra of Rayleigh-wave microseisms." *Bulletin of the Seismological Society of America* **68**(6): 1623-1636.
- Atakan, K., et al. (2004). J-SESAME: A standardized software solution for the H/V spectral ratio technique. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- Atakan, K., et al. (2004). The H/V spectral ratio technique: experimental conditions, data processing and empirical reliability assessment. 13th world conference in Earthquake Engineering, Vancouver, Paper.
- Birgoren, G., et al. (2009). "Bedrock Depth Mapping of the Coast South of Istanbul: Comparison of Analytical and Experimental Analyses." *Turkish Journal of Earth Sciences* **18**(2): 315-329.
- Bonnefoy-Claudet, S., et al. (2004). Simulation of seismic ambient noise: I. Results of H/V and array techniques on canonical models. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 1-6 August.
- Bour, M., et al. (1998). "On the use of microtremor recordings in seismic microzonation." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **17**(7): 465-474.
- Chatelain, J. L., et al. (2008). "Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings." *Bulletin of Earthquake Engineering* **6**(1): 33-74.
- Cornou, C., et al. (2004). Simulation of seismic ambient vibrations: II. H/V and array techniques for real sites. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 2004, Paper.
- CRED and UNDRR (2020). UNDRR Press release on the report "The Human Cost of Disasters 2000-2019", CRED, UNDRR, Geneva.
- D'AMICO, V., et al. (2004). "Quick estimates of soft sediment thicknesses from ambient noise horizontal to vertical spectral ratios: a case study in southern Italy." *Journal of earthquake engineering* **8**(06): 895-908.
- Delgado, J., et al. (2000a). "Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool." *Journal of Applied Geophysics* **45**(1): 19-32.
- Dinesh, B., et al. (2010). "Estimation of sedimentary layer shear wave velocity using micro-tremor H/V ratio measurements for Bangalore city." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **30**(11): 1377-1382.

- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F., 2013, Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1
- Ergünay, O. (2008). "Mikrobölgeleme Çalışmaları ve Afet Senaryoları." Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri: 73-77.
- García-Jerez, A., et al. (2006). "Characterization of the sedimentary cover of the Zafarraya basin, southern Spain, by means of ambient noise." Bulletin of the Seismological Society of America **96**(3): 957-967.
- Gosar, A. and A. Lenart (2010). "Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor basin (Slovenia) using microtremors." Bulletin of Earthquake Engineering **8**(3): 501-518.
- Gupta, S. V., et al. (2020). "Site Effects Investigation in Srinagar City of Kashmir Basin Using Microtremor and Its Inversion." Journal of Earthquake Engineering: 1-22.
- Gutenberg, B. (1958). "Microseisms." Advances in Geophysics **5**: 53-92.
- Hinzen, K. G., et al. (2004). "On the resolution of H/V measurements to determine sediment thickness, a case study across a normal fault in the lower Rhine embayment, Germany." Journal of earthquake Engineering **8**(06): 909-926.
- Ibs-von Seht, M. and J. Wohlenberg (1999). "Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments." Bulletin of the Seismological Society of America **89**(1): 250-259.
- Kanai, K. (1961). "4. An Empirical Formula for the Spectrum of Strong Earthquake Motions."
- Kanai, K. and T. Tanaka (1961). "On microtremors." Bulletin of the Earthquake Research Institute of Tokyo **39**(VIII): 97-115.
- Kanai, K., et al. (1954). "Measurement of the microtremor I." Bulletin of the Earthquake Research Institute of Tokyo **32**: 199-209.
- Karabulut, S. (2012). İstanbul Kenti İçin Yer Tepkisi Ve 3 Boyutlu (3-B) Kayma Dalga Hiz (Vs) Yapısının Belirlenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi. **Doktora Tezi**.
- Kumar, P. and A. K. Mahajan (2020). "New empirical relationship between resonance frequency and thickness of sediment using ambient noise measurements and joint-fit-inversion of the Rayleigh wave dispersion curve for Kangra Valley (NW Himalaya), India." Environmental Earth Sciences **79**: 1-14.
- Lermo, J. and F. J. Chávez-García (1994). "Are microtremors useful in site response evaluation?" Bulletin of the Seismological Society of America **84**(5): 1350-1364.

- Malagnini, L., et al. (1996). "Explosion, earthquake, and ambient noise recordings in a Pliocene sediment-filled valley: inferences on seismic response properties by reference-and non-reference-site techniques." *Bulletin of the Seismological Society of America* **86**(3): 670-682.
- Motamed, R., et al. (2007). "Seismic microzonation and damage assessment of Bam city, Southeastern Iran." *Journal of earthquake Engineering* **11**(1): 110-132.
- Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface." *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports* **30**(1): 25-33.
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, Auckland New Zealand.*
- Nogoshi, M. and T. Igarashi (1970). "On the propagation characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface." *J. Seismol. Soc. Japan* **23**: 264-280.
- Nogoshi, M. and T. Igarashi (1971). "On the amplitude characteristics of microtremor (part 2)." *J. Seismol. Soc. Japan* **24**: 26-40.
- Omori, F. (1908). "On Micro-Tremors." *Bulletin of Earth Inv. Com.* **2**(I-II).
- Özalaybey, S., et al. (2011). "Investigation of 3-D basin structures in the İzmit Bay area (Turkey) by single-station microtremor and gravimetric methods." *Geophysical Journal International* **186**(2): 883-894.
- Parolai, S., et al. (2002). "New relationships between Vs, thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany)." *Bulletin of the Seismological Society of America* **92**(6): 2521-2527.
- Rupar, L. and A. Gosar (2020). "MAPPING THE THICKNESS OF QUATERNARY SEDIMENTS IN THE ISKA ALLUVIAL FAN (CENTRAL SLOVENIA) USING MICROTREMOR METHOD." *Acta Geodynamica et Geromaterialia* **17**(2): 177-191.
- Seekins, L. C., et al. (1996). "Site amplification at five locations in San Francisco, California: A comparison of S waves, codas, and microtremors." *Bulletin of the Seismological Society of America* **86**(3): 627-635.
- SESAME, H. (2004). V User Guidelines, Sesame European research project WP12-Deliverable D23. 12, European Commission-Research General Directorate Project No, EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- Stanko, D. and S. Markušić (2020). "An empirical relationship between resonance frequency, bedrock depth and V S30 for Croatia based on HVSR forward modelling." *Natural Hazards* **103**(3): 3715-3743.

- Sukumaran, P., et al. (2011). "Profiling of late Tertiary-early Quaternary surface in the lower reaches of Narmada valley using microtremors." *Journal of Asian Earth Sciences* **41**(3): 325-334.
- Teves-Costa, P., et al. (1996). "Seismic behaviour estimation of thin alluvium layers using microtremor recordings." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **15**(3): 201-209.
- Tün, M. (2013). Interpretation Of Ground Response And Shear-Wave Velocity (V_s) Structure In Microzonation Studies: A Case Study In Eskişehir. Engineering Faculty, Department of Geophysics Engineering, Istanbul University, Doctorate Thesis. **DR**.
- Tün, M., et al. (2022). "The depth of alluvial sediments and subsurface profiling along the Eskişehir Basin in Central Turkey using microtremor observations." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **81**(5): 169.
- Tün, M., et al. (2016). "An investigation into the bedrock depth in the Eskişehir Quaternary Basin (Turkey) using the microtremor method." *Geophysical Journal International* **207**(1): 589-607.
- UNDRR (2020). Hazard Definition and Classification Review Technical Report. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), UNDDR, Geneva, Switzerland.

