

KOCAELİ İLİNDE ZEMİN SINIFLAMASI VE SİSMİK TEHLİKE DEĞERLENDİRME ÇALIŞMALARI

SITE CLASSIFICATION AND SEISMIC HAZARD EVALUATION OF KOCAELI PROVINCE

Ekrem ZOR¹, Mustafa CEVHER², Gökmen MENGÜÇ², Mustafa SOYDABAŞ²,
Adnan BİLGİÇ², Erkan AYAN², Serdar ÖZALAYBEY¹

ÖZET

Kocaeli Büyükşehir Belediyesi ve TÜBİTAK MAM işbirliği ile, Kocaeli ili için bir zemin sınıflaması ve tehlike değerlendirme çalışması yürütülmektedir. Bu çalışma ile Kocaeli ili için zeminin deprem açısından davranışı değerlendirilerek, olası bir depremde ağır hasar alabilecek mevkiler belirlenmeye çalışılacaktır. Çalışmanın hedefi, sağlıklı imar planları ve şehir planlaması çalışmaları için veri üretilerek, olası bir depremde karşılaşılabilecek can ve mal kayıplarının önüne geçmeye çalışmaktır. Şehir planlaması yönünden yararı, olası ağır hasar alabilecek mevkilerin yeşil alan olarak, önemli ve yüksek binaların ise daha güvenli zeminlere doğru planlamalarını sağlamak olacaktır. Bu amaçla, zemin sınıflaması ve buna bağlı zeminin deprem sırasında dinamik davranışının bölgeleştirilerek belirlenmesi, olası bir depremin hangi alanı ne düzeyde etkileyeceği (Sismik Tehlike) bilgisini sağlayacaktır. Bu çalışmada, mikrotremör dizin (SPAC) ve Sismik Kırılma ölçümleri ile yerleşim alanlarını kapsayan (60 nokta) yerlerde zeminin S-dalga hız yapısı belirlenecektir. Bugüne kadar Kocaeli Baseni ve civarında 41 noktada ölçümler tamamlanmıştır. Jeofizik ölçümlerle elde edilen S-dalgası hız değerleri kullanılarak zemin sınıflaması için çeşitli sınıflama kriterleri mevcuttur. NEHRP A.B.D'de jeoteknik ve inşaat mühendisliği alanında yeni yapılan inşaatların sismik dizaynında kullanılan zemin sınıflama kriteridir. NEHRP'e göre zemin sınıfı, S-dalga hızının 30 metre derinliğe kadar olan ortalama hızına (Vs30) dayanmaktadır. Ayrıca, toplam 400 noktada toplanan 3-bileşen mikrotremör verileri spektral oran yöntemi ile değerlendirilerek zeminin hakim frekansı ve yatay/düşey hareketi büyütme oranı doğrudan ölçümlerle kestirilmektedir. S-dalga hızına göre belirlenen zemin sınıfları ve ana kaya haritası kullanılarak senaryo depremler için oluşabilecek en büyük yatay yer ivmesi haritaları CBS ortamında üretilen olacaktır. Bu sunumda çalışma kapsamında kullanılan yöntemler, veriler ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin Sınıflaması, Mikrobölgeleme, Sismik Tehlike

ABSTRACT

The Greater Municipality of Kocaeli and Marmara Research Center of TÜBİTAK have been working towards the implementation of an Earthquake Hazard Mitigation programme that is based on modern scientific and engineering methods. Such a programme is required since the existing official settlement plans and earthquake damage distribution observed during the 1999 İzmit Earthquake showed great amount of inconsistencies. Such inconsistencies is likely to be a result of insufficient investigation of local site conditions based on too shallow site surveys. The geological units and thickness of sediments in the Kocaeli region show large amount of lateral and vertical variations. Such regions are subject to earthquake hazard by means seismic focusing and resonance effects, resulting in heavy damage zones often reported in the literature. Thus, local site conditions must be evaluated by using modern geological, geophysical, and geotechnical methods and Seismic Hazard information must be provided based on detailed local

¹ TÜBİTAK MAM, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, Gebze Kocaeli, Ekrem.Zor@mam.gov.tr

² Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, Kocaeli, zemindeprem@kocaeli.bel.tr

soil conditions and seismic zonation codes. With this purpose, the Greater Municipality of Kocaeli and TUBITAK Marmara Research Center have launched a project consisting of a series of geological and geophysical surveys. These surveys include macro scale investigations and measurements to determine geological and geophysical structure, local site classification based on average S-wave velocity down to 30 m depth based on Microtremor Array (SPAC, f-k) method, and measurement of local site resonance frequency and amplification parameters. In this work, we present new data and results and provide a discussion of the Microtremor methods used.

Keywords: Site Classification, Microzonation, Seismic Hazard.

GİRİŞ

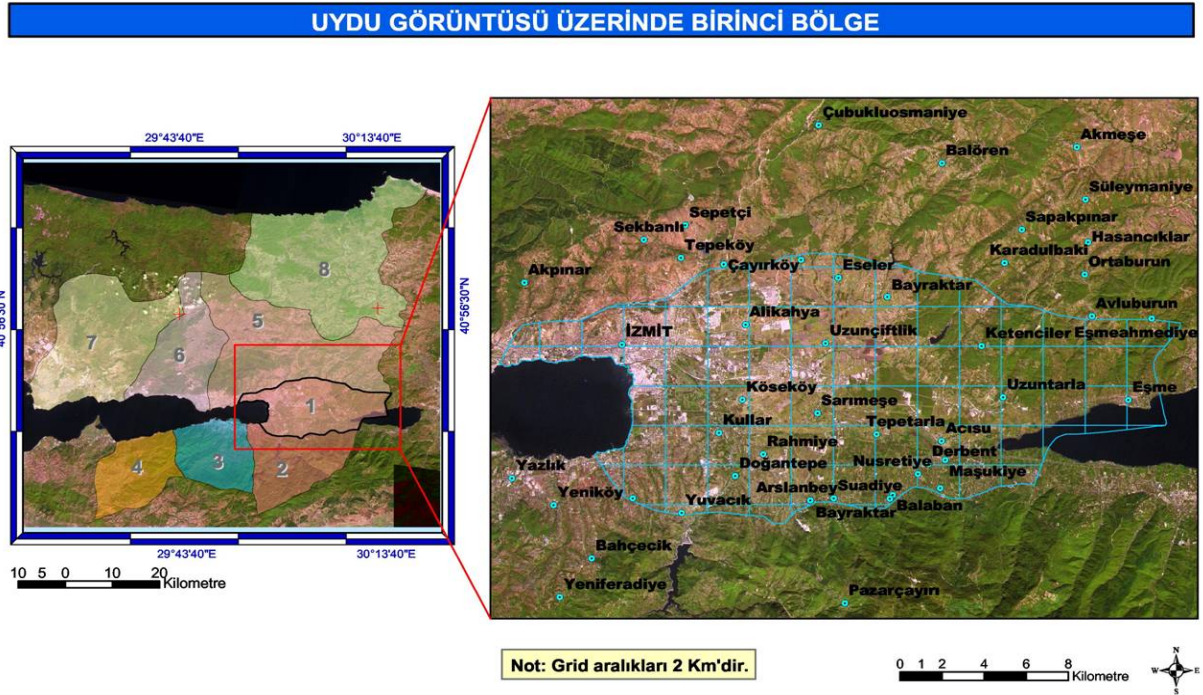
17 Ağustos 1999, Mw=7.4 büyüklüğündeki Kocaeli depremi, Marmara Denizi içine uzanan Kuzey Anadolu Fayının (KAF) büyük bir deprem üretme olasılığını ve Marmara Bölgesi için Deprem Riski ve Sismik Tehlike analizinin önemini ortaya çıkarmıştır. Bu yüzden, yaklaşık 1200 km uzunluğundaki KAF gibi bir ana fay sisteminin, Marmara Denizi içinde kalan yaklaşık 150 km uzunluğundaki bölümünün yarattığı Deprem Riski ve Sismik Tehlikenin değerlendirilmesi yer bilimcilerin önemli bir uğraşı alanı olmuştur. Marmara Denizi içinde KAF'a ait bir çok kırık sisteminin varlığı ortaya konmuştur. Olası bir depremin Marmara Bölgesinde yer alan metropolitan alanlarda, yerel zemin koşulları ile bağlantılı olarak yaratabileceği hasar ve yapılması gerekenler günümüzde hala tartışılmaktadır.

Yerel zemin koşulları, deprem zararlarının ve etkilerinin dağılımında en önemli etkenlerden biridir ve bu yüzden sismoloji ve deprem mühendisliğinin en önemli konularındandır. Deprem kaynağından aynı uzaklıkta bir bölgede iki farklı zemin yer hareketine farklı tepki gösterebilmektedir. Genellikle, yaşlı kaya birimleri üzerinde çökelmiş ve kaya zeminle önemli derecede yoğunluk farkı yaratan genç ve kalın çökel alanlar deprem dalgalarının genliklerini büyütmektedir. Bu tür zeminlerde iki farklı mekanizmanın bu büyütme neden olduğu söylenebilir; deprem dalgalarının kapanıp tekrarlı yansımaları (rezonans) veya taban kaya geometrisinin sebep olabileceği sismik dalgaların odaklanmasıdır. Bu tür farklı zemin davranışlarının deprem dalgaları üzerindeki büyütme etkisi, önemli büyüklükteki 1985 Mexico City (Meksika), 1989 Loma Prieta (ABD) ve 1999 Kocaeli (Türkiye) depremleri üzerine yapılan araştırmalarla açık olarak ortaya konmuştur (Singh vd., 1988; Özel vd., 2002; Ansal vd., 2003; Ergin vd., 2004). Yerel zemin koşullarının sismik enerjiyi büyütmesine ilişkin klasik bir örnek bahsi geçen 8.1 büyüklüğündeki 1985 Meksika depremidir. Bu depremde zemin, 0.2 – 0.7 Hz frekans bandında, yaklaşık 8-50 kat arasında değişen büyütme göstermiştir. Bu derece yüksek zemin büyütme değerinin, Mexico City altındaki kalın ve yumuşak göl çökellerine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır (Singh vd., 1988). Ülkemizden ilginç bir örnek ise, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin merkezinden 100 km uzak olmasına rağmen İstanbul'un Avcılar ilçesinde gözlenen zemin davranışıdır. Bu bölgede zemin, 0.3-1.5 Hz frekans bandı aralığında bir büyütme göstermiş ve 100-150 m kalınlığında düşük hızlı bir tabaka içersinde kapanlanmış sismik dalgalar neticesi ortaya çıktığı şeklinde yorumlanmıştır (Ergin vd., 2004).

Yukardaki özetlenen mekanizmalar sonucu oluşabilecek zemin büyütmesini belirlemek için son yıllarda yapılan jeofizik çalışmalar, zeminin S-dalga hız profiline belirlenmesine ve bu hızlara göre zemin sınıflamasına odaklanmaktadır. Bu çalışmada, Marmara Denizi'nin doğu ucunda yeralan Kocaeli ili için Deprem Riski ve Sismik Tehlike dağılımı ortaya konulmaya çalışılmaktadır. Bu amaçla, öncelikle elde edilen veriler toplanan verilerle birlikte değerlendirilmek üzere (Jeolojik sondaj, bölgenin jeolojik haritası ve jeoteknik etüd raporları) toplanıp Coğrafik Bilgi Sistemi (CBS) aktarılmıştır. Zemin hakim titreşim frekansının ve büyütmesinin tek istasyon Yatay/Düşey (H/V) yöntemi (Nogoshi ve Igarashi, 1970; Nakamura, 1989) ile belirlenmesi için ~400 noktada ve bölgeyi temsil edebilecek dağılım ile S-dalgası hız profillerinin Mikrotremör Dizin yöntemleri ile (SPAC ve FK) (Aki, 1957; Capon, 1969) 60 noktada yapılması planlanmıştır. Bugüne kadar ~180 noktada H/V ve 41 noktada mikrotremör dizin ölçümleri tamamlanmıştır.

ÇALIŞMA ALANI

Bu çalışma ile, Türkiye’de ilk defa bir ilin tamamı için geniş kapsamda ve ölçekte yeni jeofizik ölçüm teknik ve standartlarına dayalı bir sismik tehlike değerlendirme çalışması gerçekleştirilmiş olacaktır. Sismik tehlikenin olası büyük depremlerden önce belirlenmesi, deprem hasarlarının en aza indirilebilmesi için gerekli Mühendislik, Afet Planlama ve Yönetim önlemlerinin en doğru ve etkin olarak alınmasını sağlayacaktır. Çalışmalar Şekil 1a’da görülen alt bölgelerde uygulanmaktadır. Proje çalışmalarına Kasım 2005 tarihinden itibaren başlanmıştır. Proje kapsamında Kocaeli ilinin tamamı 8 alt bölgeye ayrılarak, proje çalışma planında öngörüldüğü gibi, 1. Bölge olan İzmit-Metropolitan alanı üzerinde çalışmalar başlatılmıştır (Şekil 1b). Jeofizik ölçümlerin alınacağı noktalar CBS’de uydu fotoğrafları, sayısal topoğrafik ve jeolojik haritalar altlık oluşturularak belirlenmiştir.



Şekil 1. İzmit Metropolitan alanı 1. Bölge çalışma alanı. Kocaeli ili için Sismik Tehlike değerlendirme çalışmasının gerçekleştirildiği alt bölgeler haritası.

JEOFİZİK VERİLER

Yatay-Düşey genlik oranlaması için mikrotremör verileri, Reftek DAS 130 serisi kayıtçı sistemleri kullanılarak kaydedilmiştir. Algılayıcı olarak, 1 Hz doğal salınım frekanslı 3-bileşen Mark Products L4-3C sismometreler kullanılmıştır. Bu ölçümlerde sayısal kayıtçı sistemi, sismometre tarafından üç bileşende (Düşey, Doğu-Batı ve Kuzey-Güney) algılanan sinyalleri, saniyede 100 örnek alarak kayıt edecek şekilde ayarlanmıştır.

Mikrotremör Dizin verilerinin toplanması için toplam 20 adet Reftek-Texan 125 kayıtçı ve 1 Hz köşe frekansına sahip düşey bileşen L4-1C Mark Products sismometreler kullanılmıştır. Mikrotremör Dizin kayıt geometrisi, 3 farklı yarıçapta (20 m, 50 m, 75 m) yarım daireler üzerine, ve her bir daire üzerine 6 adet alıcının 0, 30, 60, 90, 120 ve 150 derece azimutlarına yerleştirilerek oluşturulmuştur. Kayıtçılar 24 bitlik sayılaştırma ve 500 Hz örnekleme aralığı ile her bir ölçüm noktasında en az 2 saat sürekli kayıt almıştır.

Sismik Kırılma kayıtlarının alınmasında 4.5 Hz’lik Mark Products L28 jeofonları ve kayıtçı olarak Reftek Texan-125 kayıtçıları saniyede 500 örnek alacak şekilde kullanılmıştır. Sismik

kaynak olarak 7-fişek kapasiteli bir ‘Buffalo Gun’ ve 10 kg’lik bir balyoz kullanılmıştır. Sismik atışlar 150 metre açılım için, 0, 75 ve 150 metrelerde Buffalo Gun ile, ara atışlar ise 25, 50, 100, ve 125 metrelerde balyoz ile yapılmıştır. Arazide uygun olan mevkilerde açılımın iki ucundan -50 ve +50 metre ofsetlerde de atış yapılmıştır. Buffalo Gun ile yapılan sismik atışlar, her biri 36 gr barut kapasiteli 7 adet Magnum marka av fişeklerinin 50 cm derinliğinde açılan çukurlara yerleştirilerek, patlatılması ile gerçekleştirilmiştir.

JEOLOJİ

Kocaeli ili jeoloji haritasının sayısal ortamda üretilmesi için MTA’dan 27 adet pafta 1/25,000’lik, 1 adet pafta ise 1/100,000’lik olarak temin edilmiştir. MTA’dan temin edilen orijinal jeoloji veri paftaları, tüm Kocaeli ilini kapsayacak şekilde birleştirildikten sonra CBS’de oluşturma aşamasında, paftalararası uyumsuzluklar, ölçek farkları, hatalı ve eksik öznitelik bilgileri düzeltilmiştir. Hatalı ve gereksiz ayrıntılar indirgenerek genelleştirilmiş, fazlalıklardan arınmış ve tutarlı bir jeolojik veri tabanı oluşturulmuştur. Çalışmada amaçlanan jeolojik veri tabanı ihtiyacını karşılamak için anlamlı ve okunaklı olan Şekil 2’deki jeoloji haritası üretilmiştir. Bu harita altlık olarak kullanılarak Kocaeli ili Jeolojik zemin sınıflama çalışmaları gerçekleştirilecektir. Haritadan da görülebileceği gibi İzmit Körfezi’ den Sapanca’ ya kadar uzanan İzmit Baseni Kuvaterner ve Pliyosen yaşlı çökellerden oluşmakta ve İzmit Baseni’ nin kuzey ve güneyine doğru daha yaşlı ve sağlam zeminlere doğru geçiş gözlenmektedir. İzmit körfezine yakın kısımlarda kuzeye kahverengi ile gösterilen Alt-Orta Eosen yaşlı kumtaşı, konglomera, şeyl ve çamurtaşı gibi birimlere geçiş gözlenmektedir. Ayrıca, bu geçiş sırasında aralarda Üst Kretase-Alt Eosen yaşlı (yeşil renkli birim) ve Kocaeli yarımadasının daha kuzeyinde de gözlenen Kireçtaşı ve Olistrostrom gibi birimlerde gözlenmektedir. Güneyinde ise benzer şekilde kahverengi ile gösterilen Alt-Orta Eosen yaşlı kumtaşı, konglomera, şeyl ve çamurtaşı gibi birimlere geçiş gözlenirken, doğuya Sapanca tarafına doğru basenin güneyinde ise Üst Kretase yaşlı rekristalize kireçtaşı ve mermer birimleri gözlenmektedir.

JEOFİZİK ÖLÇÜMLER

Zemin Hakim Frekans ve Büyütme Ölçümleri ve Değerlendirmeleri

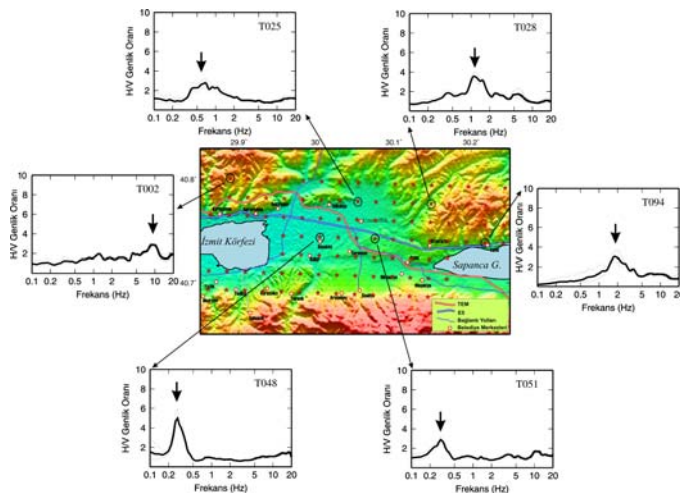
Yerel zemin hakim frekans ve büyütmesinin elde edilmesinde kullanılan klasik yöntem referans istasyon yöntemidir (Borcherdt, 1970). Bu yöntemde, yaşlı kaya birimleri üzerinde çökelmiş ve kaya zeminle önemli derecede yoğunluk farkı yaratan genç ve kalın çökel alanların deprem dalgalarının genliklerini hangi frekansta ve ne değerde büyüttükleri belirlenmeye çalışılır. İdeal olan, aynı zaman aralığında düşük hızlı çökel zeminde ve üzerinde yer aldığı derindeki yaşlı kaya üzerinde alınan ölçümleri spektral ortamda birbirine oranlamaktır. Bu sayede, ana kaya üzerindeki kayıttan elde edilen genliklerin, yüzeydeki istasyona vardığında ne kadar büyütüldüklerini bulmak mümkündür. Uygulamada bunun oldukça zor olması nedeni ile, çökel zeminde alınan kayıtlar altında yer alan ana kayayı temsil eden yüzeylenmiş bir referans noktasında alınan kayda oranlama yöntemi kullanılmaktadır. Aynı alet ve deprem kullanılması durumunda spektral oranlama ile alet ve kaynak etkisi giderilmiş olacaktır. Yöntemin başarısı, bulunan referans istasyonun kurulduğu sağlam zeminin, çökel zeminde alınan ölçüm noktasının altında yer alan ana kayayı ne kadar temsil ettiğine bağlıdır. Ayrıca, düzlem dalga yaklaşımını sağlamak için, iki ölçüm noktası arasındaki mesafenin kaynağa olan mesafeden daha küçük olmasını sağlayacak bir depremin kayıt edilmesi gerekmektedir.

Diğer bir yöntem olan tek istasyon yöntemi ise, ekonomik ve uygulamada hızlı bir teknik olması nedeniyle, zemin büyütme ve hakim titreşim (rezonans) frekansı belirleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hızlı ve ekonomik olmasının nedeni ise, deprem olmasını beklemek yerine yerin doğal gürültüsünün kayıtları kullanılarak sonuç elde edilmesidir.

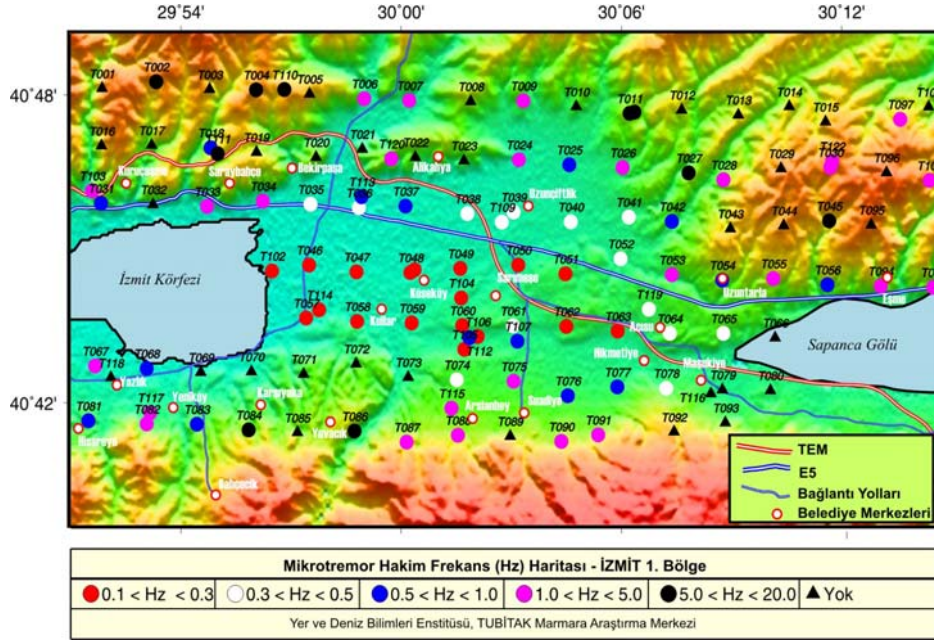
fonksiyonu ile direk ilişkili olduğu ve yüzey dalgalarının ya gözardı edilebileceği yada giderilebileceği varsayımına dayanır (Nakamura, 1989). Nakamura yaklaşımında, düşey bileşen kayıtlarının yatay bileşen kayıtlarının aksine zemin koşullarından etkilenmediği ve düşey bileşen kayıtlarının ana kayada ölçülen harekete eşit olduğu varsayımına dayanır. Diğer yaklaşımda ise, doğal gürültünün baskın olarak yüzey dalgalarından (Rayleigh) oluştuğu ve yatay-düşey genlik oranının Rayleigh dalgasının eliptikliği ile ilişkili olduğudur (Nogoshi and Igarashi, 1971). Frekans bağımlı olan eliptiklik, yüzeydeki çökel zemin ile ana kaya arasında yeteri kadar yüksek bir empedans kontrastı var ise, yerin hakim frekansında büyütme ortaya çıkarmaktadır. Bu yaklaşımda hakim frekansın eğrilerde ortaya çıkması, düşey bileşendeki yüzey dalgası enerjisinin empedans kontrastının olduğu derinlikle ilişkili frekansta kaybolmasının sonucudur. Bu varsayımlara rağmen yöntemin hakim frekansı belirlemede başarılı olduğu, ama büyütme referans istasyon yöntemi ile yapılan kıyaslamalar sonucu daha küçük hesapladığı bilinmektedir (Lachet ve Bard, 1994; Field ve Jacob, 1995).

Bu çalışmada, tek noktada 3-bileşen sismometreler ile toplanan mikrotremör verilerinin yatay-düşey spektral oranı analizi ile, zemin hakim titreşim frekansı ve bu frekansa karşı gelen yatay-düşey genlik büyütme oranı doğrudan saptanmıştır. Yatay-düşey spektral oranın güvenilir bir şekilde elde edilebilmesi için kayıt uzunluğu olabildiğince uzun seçilmiştir. Kayıtların değerlendirilmesi sırasında geçici gürültülerin hakim olduğu zaman pencereleri hesaplamaya katılmamıştır. Elde edilen verilerin işlenmesinde Avrupa'daki yer bilimciler tarafından, **SESAME** (Site EffectS assessment using **AM**bitient **E**xcitation) adlı proje kapsamında, geliştirilmiş ve literatürde yaygın olarak kullanılan, **GEOPSY** (<http://www.geopsy.org>) adlı yazılım kullanılmıştır. Yatay-düşey spektral oran eğrilerinin hesaplanması için, herbir bileşenden elde edilen veri, 80 ile 200 sn arasında değişen uzunlukta geçici gürültüleri içermeyecek şekilde pencereleştirilip, herbir pencereye ait Yatay-Düşey spektral oran eğrileri hesaplanmıştır. Hesaplanan eğrilerin ortalaması alınarak ölçüm noktasını temsil eden spektral oran eğrisi ve standart sapması belirlenmiştir. Geçici gürültülerin ayıklanması işlemi otomatik tetikleme algoritması kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde her bir nokta için doğal gürültü içeren, ortalama en az ~10 ölçüm penceresi kullanılmasına dikkat edilmiştir. Bu kriteri sağlamayan noktalar için ölçümler arazide tekrar alınmıştır. Bu analize örnek olarak, T002, T025, T028, T048, T051 ve T094 nolu noktalardan elde edilen yatay-düşey genlik oranı eğrileri harita üzerindeki yerleri ile birlikte Şekil 3'de verilmiştir.

Şekil 3'deki gibi elde edilen eğrilerden Kocaeli 1. Bölge için hakim frekans değerleri renk kodlaması kullanılarak Şekil 4' de haritalanmıştır. Şekildeki harita genel olarak değerlendirildiğinde, hakim frekans değerlerinin İzmit Baseni içinde yer alan noktalarda oldukça düşük değerlerde (0.2-0.4 Hz) olduğu ve İzmit Baseni'nin dışına doğru bu değerlerin yükseldiği (1-5 Hz) gözlenmektedir. Basenin dışında yer alan ve yüksek topoğrafyaya sahip noktalarda hakim frekans değerleri daha yüksek bir frekans bandında (5-20 Hz) yer almakta veya hakim frekans değerleri gözlenmemektedir (üçgen ile sembollendirilen noktalar). İzmit Baseni içindeki kırmızı dairelerle gösterilen, 0.1-0.3 Hz frekans bandına düşen noktalardan kuzeye doğru gidildikçe, değerler önce beyaz dairelerle gösterilen 0.3-0.5 Hz frekans bandına yükselmekte, daha sonra mavi renkli 0.5-1.0 Hz frekans bandına yada hakim frekans gözlenmemesine doğru tedrici bir geçiş göstermektedir. Diğer taraftan Basenin güneyine doğru ise bu geçiş daha serttir ve 0.1-0.3 Hz' den, 0.5-1.0 Hz yada hakim frekansın gözlenmediği duruma geçmektedir (Şekil 4).



Şekil 3. Farklı zemin koşullarında yapılan ölçümlerden elde edilen spektral oran eğrileri ve topoğrafya haritası üzerindeki konumları. Elde edilen ortalama yatay-düşey genlik büyütme eğrileri siyah ve standart sapmaları kesikli gri çizgilerle gösterilmiştir. Siyah oklar ise hakim frekansı gösterir.



Şekil 4. İzmit Metropolitan alanında toplanan Mikrotremör verilerinden belirlenen hakim titreşim frekans haritası.

Yüksek hakim frekans değerleri ($> 5\text{ Hz}$) veya hakim frekansın gözlenmemesi, yüksek topoğrafyaya sahip ve ana kayanın jeolojik olarak yüzeyletiği bölgelerde görülmektedir. Bu tür gözlemler, basen sınırlarına yakın zemin üzerinde ve/veya sert zemin üzerinde alınan ölçümleri işaret eder. Bu değişimin nedeninin İzmit Baseni'ni dolduran çökellerin kalınlığı ve hemen altında yer alan ana kaya geometrisi ile ilgili olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Bu yoruma göre, basen içinde bir noktada gözlenen hakim frekans değerinin (f_0), baseni dolduran çökellerin o noktadaki ortalama S dalga hızı (V_s) ve çökel kalınlığına (H) bağlı olarak,

$$f_0 = \frac{V_s}{4H} \quad (1)$$

bağıntısı (Ibs-von Seht ve Wohlenberg, 1999) ile değiştiği dikkate alınarak değerlendirilebilir. Örneğin tüm Basen için $V_s = 400\text{ m/s}$ olduğu varsayılırsa, T048 noktasındaki hakim frekans değeri ($f_0 = 0.28\text{ Hz}$) ele alındığında, baseni dolduran çökellerin kalınlığı bu noktada $H = \sim 357\text{ m}$ 'dir. Benzer şekilde hesaplandığında, bu noktanın kuzeyinde yer alan T038 noktasında ($f_0 = 0.44\text{ Hz}$) bu kalınlık $\sim 227\text{ m}$ ve güneyinde yer alan T075 noktasında ise ($f_0 = 1.77\text{ Hz}$) $\sim 56\text{ m}$ olmaktadır. Buna göre, basenin kuzeyine doğru çökel kalınlığı 357 m 'den 227 m 'ye, güneyine doğru ise 56 m 'ye düşmektedir. Bu sert geçişin gözlemlendiği hat ise KAF'ın geçtiği kesimdir. Bu değerlendirmelere göre, İzmit Baseni'nin genel olarak, kuzeyden güneye fay hattına doğru derinleşen bir geometriye sahip olduğu söylenebilir.

Zemin Sınıflaması Ölçümleri ve Değerlendirmeleri

Zemin sınıflaması amaçlı etüdlerde Sismik Kırılma ve Mikrotremör Dizin yöntemleri kullanılmıştır. Zeminin S-dalga hız profili ve buna bağlı (V_s30) zemin sınıfının belirlenmesi için Mikrotremör Dizin (SPAC) yöntemi uygulanmıştır. Zemin sınıflamasının S-dalga hızına göre yapılmasındaki ana neden deprem sırasında hasar ve yıkıma neden olan dalgaların S-dalgaları ve yüzey dalgaları olmalarıdır. S-dalgalarının taşıdığı sismik enerji ise yüzeydeki zemin bloğunun S-dalga hızı (V_s) ile orantılıdır. Buna göre çok düşük V_s hızlı zeminler ($< 200\text{ m/sn}$) yüksek V_s hızlı ($> 1000\text{ m/sn}$) zeminlere göre deprem hareketini 5-10 kat büyütebilmektedir. Jeofizik ve jeoteknik

camiasında mühendislik ve yapısal dizayn açısından zemin sınıflamasının, zeminin yüzeyden en az 30 metre derinliği kadar olan bölümünün ortalama S-dalga hızı, Vs30 göre yapılması yaygın kabul görmektedir.

SPAC yöntemi ile S dalga yapısını elde edebilmek için dizini oluşturan kayıtların alıcılar vasıtası ile aynı zaman aralığında sürekli olarak mikrotremorları kaydetmesi zorunludur. Aki (1957) mikrotremor gözlemlerini dairesel bir dizin üzerinden düşünüp tanımlamıştır. Yöntem uzaysal özilişki fonksiyonlarının merkez istasyon $\Phi(\omega;0,0)$ ile 0'dan 2π 'ye r yarıçaplı daireyi oluşturan istasyonlar ($\Phi(\omega,r,\theta)$) arasında elde edilmesi ve onların açısız olarak integrasyonu esasına dayanır.

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

Üstteki denklem (2) sonucunda tanımlı her bir r yarıçapı için elde edilen SPAC katsayı fonksiyonları ile faz hızı arasındaki ilişki sıfırıncı dereceden birinci tür Bessel fonksiyonu ile tanımlıdır.

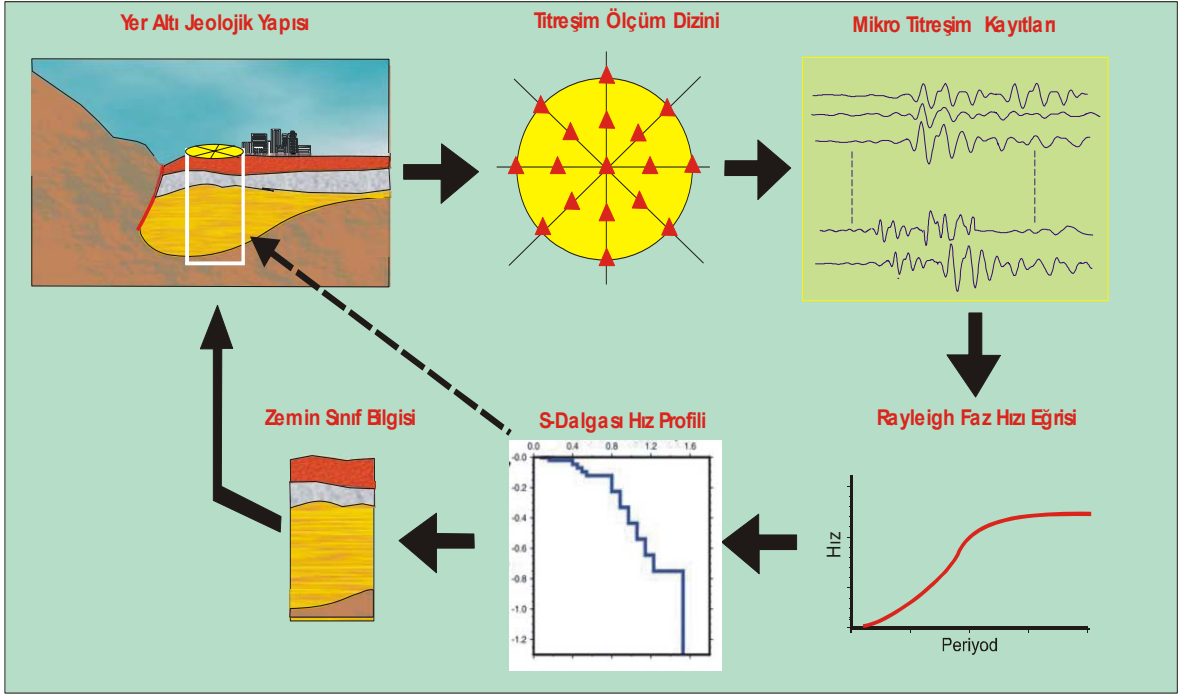
$$\rho(\omega,r)=J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) \quad (3)$$

$c(\omega)$ her bir ω frekansındaki faz hızını gösterir. SPAC katsayıları gözlenen mikrotremorlardan frekans ortamında aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\rho(r,\omega)=\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\text{Re}[S_{CX}(\omega,r,\theta)]}{\sqrt{S_C(\omega,r,\theta) \cdot S_X(\omega,r,\theta)}} d\theta \quad (4)$$

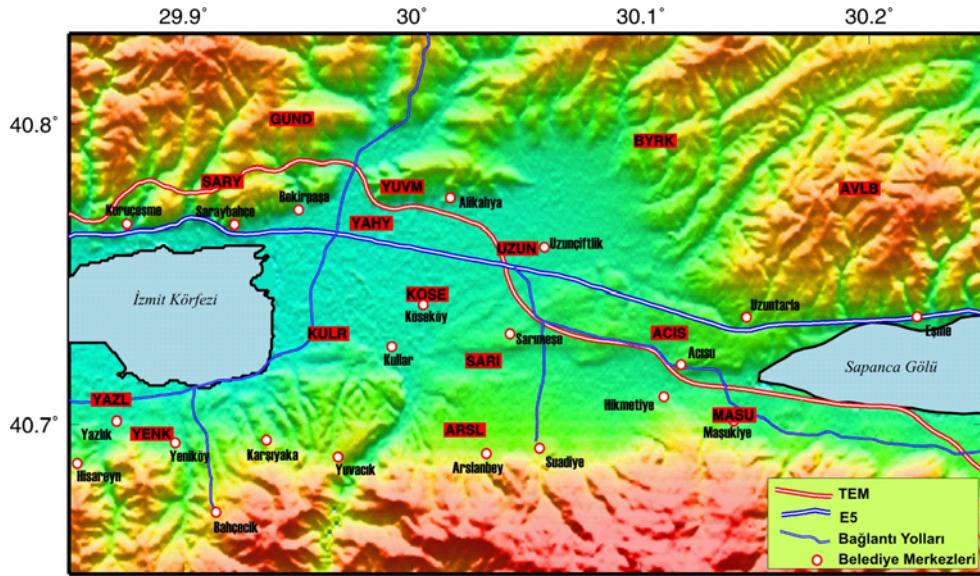
$S_c(\omega)$ ve $S_x(\omega)$ C (merkez) ve X istasyonlarındaki mikrotremörlerin güç spektrumu yoğunluklarını temsil ederken, $S_{cx}(\omega,r,\theta)$ iki istasyondaki mikrotremörlerin çapraz ilişki spektrumdur. SPAC katsayıları $\rho(r,\omega)$ elde edildikten sonra, frekansın fonksiyonu olarak faz hızı dispersiyon eğrisi denklem (3)'deki Bessel fonksiyonunun değişkeninden elde edilebilir. SPAC yöntemine ek olarak dispersiyon eğrisinin yüksek frekans bölümünü güvenilir bir şekilde elde etmek için, dizin verileri kullanılarak f-k (frekans-dalga sayısı) yönteminden (Capon, 1969) ve Sismik Kırılma verilerinin yüzey dalgasının baskın olarak kaydedildiği kesimi kullanılarak doğrusal f-k yönteminden yararlanılmıştır. Ardından yer-hız modelini doğrusal ters çözüm yolu ile elde etmek mümkündür. Şekil 5'de mikrotremör dizin yöntemi uygulanarak, dalga formlarından dispersiyon eğrisine ve oradan da ters çözüm yöntemi ile S dalga hız profiline eldesi ve zemin yapısının nasıl belirlendiği şematik olarak verilmiştir. Bu çalışmada doğrusal ters çözüm yöntemi (Park et al., 1999) kullanılarak dispersion eğrilerinden hız modeli elde edilmiştir. Bilindiği gibi doğrusal ters çözüm yöntemi bir başlangıç modelinden hareketle hız modelini elde etmeye dayanmaktadır. Bu nedenle daha hızlı bir şekilde yer modeline yakınsama sağlamak için başlangıç modelinin seçimi önemlidir. Elimizde frekansa göre faz hızlarının (C_f) değişimini veren dispersiyon eğrisi olduğuna göre, dispersion eğrisine dayalı bir başlangıç modeli dalga boyundan ($\lambda_f = C_f / f$) tahmin edilen bir derinlikte ($z_f = 0.3 \lambda_f$), faz hızının 1.09 katı S dalga hızı (V_s) olacak şekilde tanımlanıp elde edilebilir (Stokoe et al., 1994; Park et al., 1999).

Zemin sınıflamasına yönelik 15 noktada yapılan jeofizik ölçümler için Şekil 6'da verilen haritada gösterilen yerler seçilmiştir. Ölçümler Temmuz-Ağustos 2006 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir ölçüm noktasında yarım dairesel dizinler (Chouet vd., 1998) kullanılarak, en az 20 sismik kayıtlı yerleştirilip mikrotremör ölçümleri alınmıştır. Bu dizin şekli ile Asten vd. (2004) tarafından ifade edildiği gibi, ideal Bessel eğrisine en yakın eğriyi veriden elde etmek mümkündür.

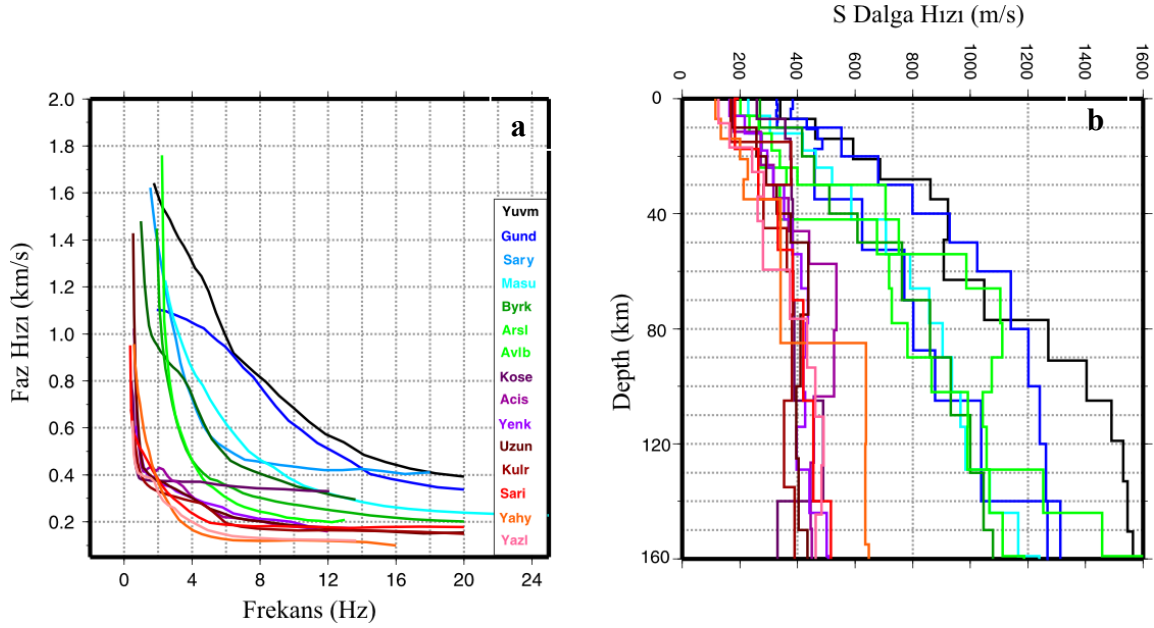


Şekil 5. Mikrotremör Dizin yöntemi uygulamasının şematik gösterimi.

Şekil 6'da gösterilen yerlerde toplanan veriler kullanılarak elde edilen dispersion eğrileri Şekil 7a'da verilmiştir. Bu bölümün başında anlatıldığı gibi başlangıç modelleri dispersion eğrilerinden türetilmiş ve doğrusal çözüm yöntemi ile 160 metre derinliğe kadar Şekil 7b'deki yer modelleri elde edilmiştir.



Şekil 6. Zemin sınıflaması jeofizik ölçümlerinin alındığı noktaların haritası.



Şekil 7. Şekil 6’da görülen mevkilerde elde edilen dispersiyon eğrileri (a) ve doğrusal ters çözüm yöntemi ile elde edilen S-dalga hız profilleri (b). Sol taraftaki şekilde verilen mevki kodlarının her biri farklı renklerle ifade edilmiş olup, ilgili dispersiyon ve hız modelleri de aynı renklerle gösterilmiştir.

Şekil 7b’den takip edilebileceği gibi hız modelleri 160 metre derinliğe kadar kabaca iki gruba ayrılabilir. İlki, Yazlık (YAZL), Yahya Kaptan (YAHY), Sarımeşe (SARI), Kullar (KULR), Uzunciftlik (UZUN), Yeniköy (YENK), Acısu (ACIS) ve Köseköy (KOSE) mevkilerinde gözlenen düşük hızlı gruptur (birinci grup). İkincisi ise, birinci gruba nispetle daha hızlı olan Avluburun (AVLB), Arslanbey (ARSL), Bayraktar (BYRK), Maşukiye (MASU), Saraybahçe (SARY), Gündoğdu (GUND) ve Yuvam Akarca (YUVM)’nin olduğu gruptur (ikinci grup). Birinci grupta yer alan mevkiler Kocaeli Baseni içinde yer almakta iken, ikinci gruptaki mevkiler ise Basenin dışındaki daha sert ve yaşlı jeolojik birimler üzerinde yer almaktadır.

Elde edilen S-dalgası hız profilleri kullanılarak zemin sınıf bilgisinin oluşturulması için çeşitli sınıflama kriterleri mevcuttur. Bu kriterler ayrıntılarında farklı olup genelde aynı özellikleri içermektedir. Burada örnek olarak NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Programme) zemin sınıflama kriterleri kullanılmıştır. NEHRP, A.B.D’de jeoteknik ve inşaat mühendisliği camiasında kabul görmüş ve yeni yapılan inşaatların sismik dizaynında yaygın olarak kullanılan zemin sınıflama kriterleridir. NEHRP’e göre zemin sınıfı, S-dalga hızının 30 metre derinliğe kadar olan ortalama hızına (V_{s30}), dayanmaktadır ve bu sınıflar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. NEHRP’e göre zemin sınıflama kriterleri.

NEHRP ZEMİN SINIFI	TANIMLAMA	S DALGASI HIZI (V_{s30})
A	Sert ana kaya	> 1500 m/s
B	Sağlam, dayanıklı ile sert kaya arası birimler	760 – 1500 m/s
C	Yoğun toprak, yumuşak kaya	360 - 760 m/s
D	Sert toprak	180 – 360 m/s
E	Yumuşak killer	< 180 m/s
F	Özel çalışma gerektiren zeminler, örneğin sıvılaştırılabilir zeminler, suya dolgun kil ve organik olan ve 36 m’den daha kalın zeminler	

Şekil 7b’deki hız modellerinden 30 metreye kadar ortalama S dalga hızları hesaplanarak İzmit Metropolitan bölgesindeki 15 nokta için aşağıdaki zemin sınıfları elde edilmiştir (Tablo 2).

Vs30' a göre yapılan sınıflamada, birinci grup olarak adlandırdığımız ve İzmit Baseni içinde veya sınırında yer alan mevkiler D veya E zemin sınıfına sahip iken, ikinci grup olarak adlandırılan basenin dışındaki mevkiler ise nispeten daha sağlam olan C zemin sınıfında yer almaktadır.

Tablo 2. NEHRP Vs30'a göre İzmit Metropolitan alanındaki mevkiler için zemin sınıfları.

N O	MEVKİ	NEHRP ZEMİN SINIFI	N O	MEVKİ	NEHRP ZEMİN SINIFI
1	Yuvam Akarca (YUVM)	C	9	Yeniköy (YENK)	D
2	Gündoğdu (GUND)	C	10	Acısu (ACIS)	D
3	Saraybahçe (SARY)	C	11	Kullar (KULL)	D
4	Maşukiye (MASU)	C	12	Uzunçiftlik (UZUN)	D
5	Bayraktar (BYRK)	C	13	Sarımeşe (SARI)	D
6	Köseköy (KOSE)	D	14	Yazlık (YAZL)	E
7	Arslanbey (ARSL)	D	15	Yahya Kaptan (YAHY)	E
8	Avluburun (AVLB)	D			

SONUÇLAR

Bu aşamada Kocaeli ili için güvenilir bir jeoloji haritası hazırlanmış ve ~180 noktada Nakamura yöntemi ile hakim frekans, 15 noktada Vs30'a göre zemin sınıflama çalışmaları sonuçlandırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler ve karşılaştırmalı testler neticesinde çalışmada kullanılan Mikrotremör yöntemlerinin son derece başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Tek istasyon hakim frekans ölçümleri ve S-dalga hızına dayalı zemin sınıflama bilgileri çalışma alanının jeolojik yapısı ile yüksek bir uyum içinde değişim göstermektedir. Özellikle, Nakamura yöntemi ile belirlenen hakim frekans değerlerinin İzmit Basenini dolduran çökellerin kalınlığı ile orantılı değiştiği gözlenmiştir. Mikrotremör Dizin yöntemi, özellikle İzmit gibi kentsel alanlarda zemin sınıflaması amaçlı S-dalga hızı pofillerinin elde edilmesinde güvenilir ve alternatif yöntemlere göre ucuz ve uygulanabilir bir yöntem olarak değerlendirilmiştir. Ancak, Mikrotremör Dizin yöntemi dalga alanını çok sayıda alıcıdan oluşan bir dizin ile kaydederek uygulanmalıdır ($f \cdot k \cdot n > 11$, $SPAC \cdot n > 4$).

İzmit Metropolitan alanında yapılan hakim frekans çalışmaları neticesinde, İzmit Baseni içindeki noktalarda 0.2-0.3 Hz frekans bandında bir büyütme gözlenirken, kuzeye doğru gidildikçe değerler önce 0.3-0.5 Hz frekans bandına yükselmekte, daha sonra 0.5-1.0 Hz frekans bandına yada hakim frekans gözlenmemesine doğru tedrici bir geçiş göstermektedir. Diğer taraftan Basenin güneyine doğru ise bu geçiş daha serttir ve 0.2-0.3 Hz' den, 0.5-1.0 Hz yada hakim frekansın olmadığı duruma geçmektedir. Buna göre, Basenin kuzeyine doğru çökel kalınlığının daha yumuşak bir geçiş gösterdiği, güneyine doğru ise bu geçişin daha sert olduğu söylenebilir. Güneye doğru bu sert geçişin gözlemlendiği hat ise KAF'nin geçtiği kesimdir. Bu değerlendirmelere göre, İzmit Baseni'nin genel olarak, kuzeyden güneye fay hattına doğru derinleşen bir geometriye sahip olduğu ve KAF'nin hemen güneyinde ise aniden derinleştiği söylenebilir.

Yapılan zemin sınıflama çalışmalarında ise, S-dalga hız modelleri kabaca iki gruba ayrılabilir. Birinci grupta yer alan mevkiler Kocaeli Baseni içinde yer almakta iken, ikinci gruptaki mevkiler ise Basenin dışındaki daha yaşlı ve sert zeminlerde yer almaktadır. Buradan Vs30'a göre yapılan sınıflamada, birinci grup olarak adlandırdığımız ve İzmit Baseni içinde veya sınırında yer alan mevkiler D veya E zemin sınıfına sahip iken, ikinci grup olarak adlandırılan Basenin dışındaki mevkiler ise nispeten daha sert kayalardan oluşmakta ve C tipi zemin sınıfında yer almaktadır.

Özetle, İzmit Körfezi' den Sapanca' ya kadar İzmit Basenini dolduran Kuvaterner ve Pliyosen yaşlı çökeller üzerinde yapılan ölçümler jeoloji ile uyumlu bir şekilde hem düşük hakim frekans değerlerine ve yüksek büyütmeleme sahip hemde zemin sınıfı açısından NEHRP sınıflama kriterlerine göre D veya E tipi sert toprak ve yumuşak kil için verilen sınıfta yer almaktadır. İzmit

Baseni' nin kuzey ve güneyine doğru daha yaşlı Üst Kretase, Alt-Orta Eosen yaşlı ve sert jeolojik birimler üzerinde alınan ölçümlerde ise, Basen derinliğinin azalması ile orantılı olarak

hakim frekans değerleri yükselmekte yada gözlenememektedir. Bununla birlikte, bu birimlerin zemin sınıfları da daha sağlam zemini ifade eden C tipi zemin sınıfında yer almaktadırlar.

Tüm Kocaeli ili için planlanan 60 noktada zemin sınıflama çalışmaları tamamlanıp yapılacak jeolojik sondajlarla sonuçlar karşılaştırıldıktan sonra, düşey ve yatay yer hareketinin ivmeleri tahmin edilerek Sismik Tehlike dağılım kestirimi Campbell and Bozognia (2003) tarafından geliştirilen yaklaşımla son adım olarak yapılacaktır. Bölgede tanımlanmış fayların üretebileceği depremlerin büyüklükleri ve zemin büyütme etkilerinin birlikte değerlendirilerek, yüksek ivmelere ve dolayısıyla Sismik Tehlikeye maruz kalabilecek alanların ön kestirimi ve en büyük olası yatay ivme dağılım haritalarının hazırlanması gerçekleştirilecektir.

Teşekkür

Çalışmada emeği geçen TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi çalışanlarından Mehmet Ergin, Mustafa Cengiz Tapırdamaz, Adil Tarancıoğlu, Suna Çetin, Ahmet Yörük, Adnan Arslan'a teşekkürü bir borç biliriz. Ayrıca, Kocaeli Büyükşehir Belediyesi çalışanlarından Mehmet Öztoran, Mehmet Sancılı, Tayfun Kavaklı, Hakan Cantürk, Güneş Mutman, Nilgün Aytugar'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Aki K (1957) "Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with special reference to microtremors", *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokio Univ.*, 25, 415-457.
- Ansal A, Springman S, Studer J, Demirbaş E, Önalp A, Erdik M, Giardini D, Şeşetyan K, Demircioğlu M, Akman H, Fäh D, Christen A, Laue J, Buchheister J, Çetin Ö, Siyahi B, Fahjan Y, Gülkan Y, Bakir S, Lestuzzi P, Elmas M, Köksal D, Gökçe O, Konferans kitapçığı, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul.
- Asten MW, Dhu T and Lam N (2004) "Optimised Array Design for Microtremor Array Studies Applied to Site Classification; Comparison of Results with Scept Logs.", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, 1-6 August, Paper No. 2903.
- Borcherdt RD (1970) "Effects of local geology on ground motion near San-Francisco Bay", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 60, 29-61.
- Campbell KW ve Bozorgnia Y (2003) "Updated Near-Source Ground Motion (Attenuation) Relations for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, 314-331.
- Capon J (1969) "High Resolution frequency wavenumber analysis", *Proc. Inst. Elect. and Electron Eng.*, 57, 1408-1418.
- Chouet B, De Luca G, Milana G, Dawson P, Martini M, and Scarpa R (1998) "Shallow velocity structure of Stromboli Volcano, Italy, derived from small aperture array measurements of Strombolian tremor", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 653-666.
- Ergin M, Özalaybey S, Aktar M, Yalçın MN (2004) "Site Amplification at Avcılar, İstanbul", *Tectonophysics*, 391, 335-346.
- Field EH ve Jacob KH (1995) "A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are not reference site dependent", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 85, 1127- 1143.
- Ibs-von Seht M ve Wohlenberg J (1999) "Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 250-259.
- Lachet C ve Bard PY (1994) "Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the Nakamura's technique", *J. Phys. Earth*, 42, 377-397.
- Nakamura Y (1989) "A method for dynamic characteristics of estimation of subsurface using microtremor on the ground", *Q. Rep. RTRI* 30, 1.
- Nogoshi M, Igarashi T (1970) "On the propagation characteristics of microtremor", *J. Seismol. Soc. Jpn.*, 23, 264- 280.
- Özel O, Cranswick E, Meremonte M, Erdik M, Şafak E (2002) "Site effect in Avcılar, west of İstanbul, Turkey from strong and weak motion data", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92, 499-508.
- Park CB, Miller RD ve Xia J (1999) "Multichannel analysis of Surface Waves", *Geophysics*, 64, No.3, 800-808.
- Singh SK, Mena E, Castro R (1988) "Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 451-477.
- Stokoe KH, Wright GW, James AB ve Jose MR (1994) "Characterization of geotechnical sites by SASW method", in *Woods, R. D., Ed., Geophysical characterization of sites: Oxford Publ.*