

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MİKROBÖLGELEME METODOLOJİLERİ VE BALIKESİR İÇİN  
BİR UYGULAMA**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Banu Yağcı**

**Balıkesir, Kasım 2005**

**Bu çalışma Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri  
Birimi tarafından BAP 2003/33 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MİKROBÖLGELEME METODOLOJİLERİ VE BALIKESİR İÇİN**  
**BİR UYGULAMA**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Y. Müh. Banu Yağcı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Atilla Ansal**

**Sınav Tarihi : 15.11.2005**

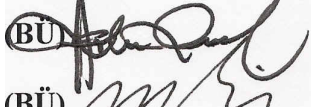
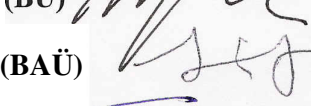
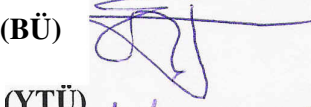
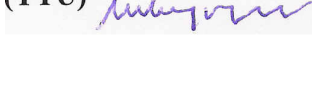

**Juri Üyeleri : Prof.Dr. Atilla Ansal (Danışman)**

**Prof.Dr. Mustafa Erdik**

**Prof.Dr. Şerif Saylan**

**Prof.Dr. Erol Güler**

**Prof.Dr. Kutay Özaydın**

(BÜ)   
(BÜ)   
(BAÜ)   
(BÜ)   
(YTÜ) 

**Balıkesir, Kasım 2005**

## ÖZET

### MİKROBÖLGELEME METODOLOJİLERİ VE BALIKESİR İÇİN BİR UYGULAMA

Banu Yağcı

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

(Doktora Tezi/ Tez Danışmanı: Prof. Dr. Atilla Ansal)

Balıkesir, 2005

Balıkesir için sismik mikrobölgeleme uygulaması, derlenen mevcut veriler doğrultusunda Belediye sınırları içindeki Bahçelievler, Hasan Basri Çantay ve Plevne Mahalleleri (BPH Bölgesi) ile 18-02 Bölgesi inceleme alanlarını kapsamaktadır. Geliştirilen yöntemde, sismik, jeolojik, jeofizik ve geoteknik verinin birleştirilmesi doğrultusunda, olası bir yer hareketi için kaynak, yol ve yerel zemin şartlarının karşılıklı etkileşimine dayalı, yer hareketi parametrelerindeki değişim belirlenmektedir. Yerleşim alanı sınırlarındaki farklı kaynaklı jeolojik veriler derlenmiş ve mevcut düşey elektrik sondajları ile düzenlenen kesitlerde, rezistivitenin derinlikle değişimi jeolojik veri ile birlikte yorumlanmaya çalışılmıştır. Zemin tabakalarının rezistiviteleri aynı zamanda geoteknik bazı özellikler ile karşılaştırılmaktadır. Farklı kaynaklı geoteknik verilerin birleştirilmesine dayalı olarak ortaya çıkan yaklaşımlar doğrultusunda, inceleme alanlarındaki zemin grupları ve dinamik davranış modelleri tanımlanarak, veri dağılımı için uygun hücre sistemlerinde temsili zemin profilleri modellenmiştir. Olasılıksal yöntemle hesaplanmış olan tasarım depremi için farklı azalım ilişkileri kullanılarak, referans zemin yüzeyinde eş tehlike spektrumları belirlenmiş ve bu spektrumlar ile uyumlu sentetik yer hareketi kayıtları üretilmiştir. Bu amaçla, frekans tanım alanındaki spektral uyum yöntemlerinden biri olan RASCAL programı kullanılmaktadır. Simülasyon yöntemindeki yer hareketi modeli için kaynak ve dalga yayılım ortamına ait bölgesel parametreler ile gerçek yer hareketi kayıtlarına dayalı parametrik bir çalışma yapılmıştır. RASCAL ile üretilen kayıtlar, hedef yer hareketi parametreleri için TARSCTHS programı ve ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtlarla karşılaştırılmıştır.

Modellenen temsili profillerin zemin davranış analizleri, 1 boyutlu eşdeğer lineer analiz yöntemine dayalı SHAKE 91 programı ile yapılmıştır. Bu aşamada iki grup yer hareketi kaydı kullanılmaktadır. 1. grupta, yer hareketi simülasyonu aşamasında yapılan parametrik çalışmalar doğrultusunda seçilen 6 kayıt bulunmaktadır. 2. gruptaki kayıtlar, gerçek yer hareketi kayıtlarının referans zemin yüzeyinde olasılıksal olarak hesaplanan en büyük ivme değeri ile oranlanması sonucu elde edilmiştir. Her iki grup kayıt ile yüzeyde hesaplanan yer hareketi parametrelerine ait frekans dağılımları, maksimum ivme, Arias şiddeti ve spektral parametreler cinsinden karşılaştırılmıştır. Balıkesir yerleşim alanı sınırlarındaki 250\*250 m boyutlu hücre sisteminde oluşturulan inceleme alanlarının mikrobölgeleme haritalarında, zemin davranış analizleri ve ampirik yaklaşım ile hesaplanan spektral ivmelerin birlikte yorumlanması sonucu, göreceli olarak 3 farklı yer hareketi seviyesi tanımlanmaktadır.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER :** Balıkesir / mikrobölgeleme / rezistivite / yerel zemin şartları / eş tehlike spektrumu / yer hareketi simülasyonu / gerilme farkı / inelastik / azalım / yüksek frekans azalımı / zemin davranış analizi / maksimum ivme / Arias şiddeti / spektral ivme

## **ABSTRACT**

### **MICROZONATION METHODOLOGIES AND A STUDY FOR BALIKESİR**

**Banu Yağcı**

**Balıkesir University, Institute of Science, Department of Civil Engineering**

**(PhD. Thesis / Supervisor : Prof. Dr. Atilla Ansal)**

**Balıkesir-Turkey 2005**

Microzonation study carried out for Balıkesir includes Bahçelievler, Hasan Basri Çantay, Plevne (BPH) districts and 18-02 district in the city due to available existing data. In the proposed methodology, seismological, geological, geophysics and geotechnical data were evaluated and the variation of ground motion parameters which depends on interaction between source, path and local soil conditions were investigated for the possible ground motion. Existing geological data in the area occupied by the Balıkesir Municipality and resistivity sounding that indicate variations of resistivity with depth were examined together. The variations of resistivity were investigated according to geotechnical parameters. Soil types and dynamic response models for hypothetical boreholes in available grid system were defined by taking available data from different sources. Uniform hazard spectrums were developed based on appropriate attenuation relationships for probabilistic design earthquake and synthetic time histories were simulated compatible with this spectrum. For simulation, RASCAL frequency domain procedure was utilized. Parametric studies were conducted for parameters regarding ground motions source and path models in procedure and input ground motion records. Ground motion records simulated with RASCAL were compared with records that simulated by TARSCTHS and by scaling procedure for target ground motions parameters.

Site response analyses were conducted by SHAKE 91 based on 1D equivalent linear procedure. In this instance, two groups of ground motion records were used. First six records were selected according to parametric studies conducted with RASCAL. Second six records were obtained by scaling procedure for peak ground acceleration. For these ground motion records, response variability were investigated to surface ground motions parameters such as peak acceleration, Arias intensity and spectral acceleration. Microzonation was conducted in 250\*250 m grid system determined for area within the boundaries of Balıkesir Municipality. Microzonation map with respect to ground shaking intensity was produced based on spectral acceleration calculated from empirical approach and site response analyses and divided in three zones based on relative evaluation.

**KEY WORDS :** Balıkesir / microzonation / resistivite / local site condition/ uniform hazard spectra / synthetic time history / stress drop / inelastic attenuation / high frequency diminution / site response analyzes / peak ground acceleration / Arias intensity / spectral acceleration

## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| <b>ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER</b>   | ii           |
| <b>ABSTRACT, KEY WORDS</b>   | iii          |
| <b>İÇİNDEKİLER</b>   | iv           |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>  | vi           |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>   | vii          |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>   | xii          |
| <b>ÖNSÖZ</b>   | xiii         |
| <b>1. GİRİŞ</b>  | 1            |
| <b>2. MİKROBÖLGELEME</b>   | 4            |
| 2.1 Giriş  | 4            |
| 2.2 Yer Hareketleri Üzerinde Yerel Zemin Şartlarının Etkisi  | 6            |
| 2.3 Yerel Zemin Şartlarının Etkisinin Araştırılması  | 9            |
| 2.3.1 Deneysel-Ampirik Teknik  | 10           |
| 2.3.2 Ampirik Yöntemler  | 14           |
| 2.3.3 Yarı Ampirik Yöntemler   | 15           |
| 2.3.4 Teorik Yöntemler   | 16           |
| 2.3.5 Hibrit Yöntemler   | 18           |
| 2.4 Mikrobölgeleme Metodolojileri  | 19           |
| 2.4.1 Sismik Tehlike Analizleri  | 20           |
| 2.4.2 NEHRP Şartnamesi   | 23           |
| 2.4.3 Literatürdeki Mikrobölgeleme Yöntemleri  | 26           |
| 2.4.4 Mikrobölgelemede Kullanılan Yer Hareketi Parametreleri                                       | 37           |
| <b>3. İNCELEME ALANLARININ JEOLJİSİ VE MEVCUT<br/>REZİSTİVİTE ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ</b> | 41           |
| 3.1 Giriş  | 41           |
| 3.2 İnceleme Alanlarının Jeolojisi   | 42           |
| 3.3 Rezistivite Çalışmalarının Değerlendirilmesi   | 52           |
| 3.3.1 Rezistivite (Elektrik Özdirenç) Yöntemi  | 52           |
| 3.3.2 Literatürdeki Çalışmalar   | 53           |
| 3.3.3 İnceleme Alanlarındaki Rezistivite Verisinin Değerlendirilmesi                               | 56           |
| 3.4 Sonuçlar   | 70           |

|   |     |
|---|-----|
| <b>4. GEOTEKNİK MODELLEME</b>   | 72  |
| 4.1 Giriş   | 72  |
| 4.2 Mevcut Geoteknik Veri   | 72  |
| 4.3 Geoteknik Modelleme   | 75  |
| 4.3.1 BPH Bölgesi Temsili Zemin Profillerinin Modellenmesi  | 78  |
| 4.3.2 18-02 Konut Bölgesi ve Akıncılar Mahallesi Temsili Zemin Profillerinin Modellenmesi   | 87  |
| 4.4 Sonuçlar  | 90  |
| <b>5. SİSMİK TEHLİKENİN DEĞERLENDİRİLMESİ</b>   | 92  |
| 5.1 Giriş   | 92  |
| 5.2 Sismik Tehlike Analizi  | 93  |
| 5.3 Balıkesir’deki Yer Hareketi Kayıtlarının Azalım İlişkileri ile Karşılaştırılması  | 98  |
| 5.4 Balıkesir için Azalım İlişkilerine Dayalı Yer Hareketi Parametreleri  | 105 |
| 5.5 Hedeflenen Yer Hareketi Parametreleri ile Uyumlu Kayıtların Üretilmesi  | 109 |
| 5.5.1 Rascal Programı ile Üretilen Yer Hareketi Kayıtları   | 115 |
| 5.5.2 Rascal ile Üretilen Kayıtların Tarscths Programı ve Maksimum İvme Ölçekleme Yöntemi ile Üretilen Kayıtlarla Karşılaştırılması | 135 |
| 5.6 Sonuçlar  | 144 |
| <b>6. ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ VE MİKROBÖLGELEME PARAMETRELERİ</b>   | 147 |
| 6.1 Giriş   | 147 |
| 6.2 Rascal ile Üretilen Kayıtların Kullanıldığı Zemin Davranış Analizleri   | 148 |
| 6.3 Maksimum İvme için Oranlanan Kayıtların Kullanıldığı Zemin Davranış Analizleri  | 154 |
| 6.4 Sonuçlar  | 163 |
| <b>7. MİKROBÖLGELEME UYGULAMASI</b>   | 165 |
| 7.1 Giriş   | 165 |
| 7.2 Mikrobölgeleme Parametreleri ve Haritalama  | 165 |
| 7.3 Sonuçlar  | 175 |
| <b>8. SONUÇLAR</b>  | 177 |
| <b>KAYNAKLAR</b>  | 182 |

## SEMBOL LİSTESİ

| <b>Sembol</b>  | <b>Adı</b>                      | <b>Birimi</b>      |
|----------------|---------------------------------|--------------------|
| $A_p$          | En büyük ivme                   | cm/sn <sup>2</sup> |
| $\Delta\sigma$ | Gerilme farkı                   | bars               |
| $G_{max}$      | Maksimum kayma modülü           | kg/cm <sup>2</sup> |
| Hz             | Frekans                         | Hz                 |
| I              | Deprem şiddeti                  |                    |
| $\kappa$       | Spektral azalım faktörü         |                    |
| M              | Manyitüd                        |                    |
| $\Omega$       | Rezistivite (elektrik özdirenç) | ohm-m              |
| T              | Periyot                         | sn                 |
| $\gamma_c$     | Dinamik kayma deformasyonu      |                    |
| PI             | Plastisite indisi               |                    |
| Q              | Kalite faktörü                  |                    |
| R              | Dış merkez uzaklığı             | km                 |
| $S_a$          | Spektral ivme                   | cm/sn <sup>2</sup> |
| SPT-N          | Standart penetrasyon sayısı     |                    |
| $V_s$          | Kayma dalgası hızı              | m/s                |

## ŞEKİL LİSTESİ

| Şekil No    | Adı   | Sayfa |
|-------------|---|-------|
| Şekil 2.1   | Ana kaya-yumuşak zemin maksimum ivme ilişkisi (Idriss)  | 8     |
| Şekil 3.1   | Balıkesir yerleşim alanı ve çevresinin jeolojisi  | 42    |
| Şekil 3.2   | Balıkesir yerleşim alanı sınırları içindeki DSİ ve MTA' ya ait 16 derin sondajın dağılımı   | 46    |
| Şekil 3.3.a | Derin sondaj kesitleri (A)  | 47    |
| Şekil 3.3.b | Derin sondaj kesitleri (B)  | 48    |
| Şekil 3.3.c | Derin sondaj kesitleri (C)  | 49    |
| Şekil 3.3.d | Derin sondaj kesitleri (D)  | 50    |
| Şekil 3.3.e | Derin sondaj kesitleri (E)  | 51    |
| Şekil 3.4   | Schlumberger elektrod dizilimi  | 52    |
| Şekil 3.5   | BPH Bölgesi rezistivite profilleri ve etrafındaki 250 m çaplı alan içinde kalan sondajlar, zemin etüdüleri ve sismik kırılma deneyleri  | 57    |
| Şekil 3.6   | Rezistivitenin zemin sınıfı ile değişimi  | 59    |
| Şekil 3.7   | Rezistivitenin ince tane oranı ile değişimi   | 59    |
| Şekil 3.8   | Rezistivitenin plastisite indisi ile değişimi   | 60    |
| Şekil 3.9   | Rezistivite profilleri için seçilen değer aralıkları  | 60    |
| Şekil 3.10  | BPH Bölgesi rezistivite noktalarının oluşturduğu kesitler   | 61    |
| Şekil 3.11  | 18-02 Bölgesi rezistivite noktalarının oluşturduğu kesitler   | 61    |
| Şekil 3.12  | BPH Bölgesi, A-A kesiti rezistivite profilleri  | 62    |
| Şekil 3.13  | BPH Bölgesi, B-B kesiti rezistivite profilleri  | 63    |
| Şekil 3.14  | BPH Bölgesi, C-C kesiti rezistivite profilleri  | 64    |
| Şekil 3.15  | BPH Bölgesi, D-D kesiti rezistivite profilleri  | 65    |
| Şekil 3.16  | 18-02 Bölgesi, A-A kesiti rezistivite profilleri  | 66    |
| Şekil 3.17  | 18-02 Bölgesi, B-B kesiti rezistivite profilleri  | 67    |
| Şekil 3.18  | Rezistivite profili kesitlerinin ve derin sondajların Balıkesir Belediyesi sınırları içindeki yerleşimi   | 69    |
| Şekil 4.1   | Balıkesir Belediyesi sınırları içindeki mevcut geoteknik veri kaynaklarının dağılımı (taralı alanlar 1. kaynak verisinin yerlerini, + sembolü noktalar ise 2. kaynaktaki zemin etüd noktalarını göstermektedir) | 73    |
| Şekil 4.2   | 18-02 Konut Bölgesinde mevcut verinin dağılımı  | 74    |
| Şekil 4.3   | BPH Bölgesinde mevcut verinin dağılımı  | 75    |
| Şekil 4.4   | Vucetic ve Dobry' nin [117] plastisite indisine dayalı $G/G_{max}$ eğrileri ile karşılaştırılan, Piedmond zemini laboratuvar deney sonuçları  | 78    |
| Şekil 4.5   | Türkiye'nin farklı bölgelerine ait zemin numuneleri için dinamik üç eksenli deney sonuçlarına dayalı $G/G_{max}$ eğrileri [124]   | 78    |
| Şekil 4.6   | BPH bölgesinde belirlenen 250*250 m boyutlu hücrelerdeki verilerin dağılımı (1. kaynak sondaj noktaları • sembolü ile ve 2. kaynaktaki zemin etüd noktaları + sembolü ile gösterilmektedir)                     | 79    |



| <b>Şekil No</b> | <b>Adı</b>   | <b>Sayfa</b> |
|-----------------|--|--------------|
| Şekil 4.7       | Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre tanımlanan BPH Bölgesindeki zeminlerin dağılımı  | 80           |
| Şekil 4.8       | BPH bölgesindeki zeminlerin plastisite indislerinin frekans dağılımı   | 81           |
| Şekil 4.9       | Vucetic ve Dobry [117] tarafından plastisite indisinin fonksiyonu olarak önerilen kayma modülü eğrilerinin, kumlar için Seed ve Idriss [120] tarafından önerilen eğriler ile karşılaştırılması | 81           |
| Şekil 4.10      | T30 hücresi veri tabanı  | 84           |
| Şekil 4.11      | T30 hücresi temsili zemin profili  | 85           |
| Şekil 4.12      | BPH Bölgesi temsili sondajları için seçilen hücreler ve sismik kırılma deney noktaları (Taraflı alanlar, kayma dalgası hız profilinin bulunmadığı hücreleri göstermektedir)                    | 86           |
| Şekil 4.13      | 18-02 Bölgesi, 350*350 m boyutlu karelerden oluşan hücre sistemi   | 89           |
| Şekil 4.14      | Akıncılar Mahallesi, 150*150 m boyutlu karelerden oluşan hücre Sistemi   | 89           |
| Şekil 5.1       | Balıkesir civarındaki sismik etkinlik  | 94           |
| Şekil 5.2       | Balıkesir çevresindeki 100 km yarıçaplı alan içinde tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen depremlerin büyüklüklerine ve konumlarına göre dağılımı.   | 95           |
| Şekil 5.3       | Deprem dış merkez uzaklığının daha az olma olasılığına göre Değişimi   | 97           |
| Şekil 5.4       | Ana kaya seviyesinde en büyük yatay ivme değerleri   | 97           |
| Şekil 5.5       | Balıkesir yer hareketi kayıt istasyonlarının zamana bağlı olarak değişen yerleri (Meteoroloji Müdürlüğü, Bayındırlık lojmanları ve şu anki konumu Huzurevi)                                    | 98           |
| Şekil 5.6       | Balıkesir istasyonlarında kaydedilmiş, büyüklüğü $4 < M < 5$ olan depremlere ait en büyük ivmelerin azalım ilişkileri ile karşılaştırılması  | 99           |
| Şekil 5.7       | Balıkesir istasyonlarında kaydedilmiş, büyüklüğü $5 < M < 6$ olan depremlere ait en büyük ivmelerin azalım ilişkileri ile karşılaştırılması  | 100          |
| Şekil 5.8       | Balıkesir istasyonlarında kaydedilmiş, büyüklüğü $M > 7$ olan depremlere ait en büyük ivmelerin azalım ilişkileri ile karşılaştırılması  | 100          |
| Şekil 5.9       | Farklı deprem büyüklüğü ölçekleri arasındaki ilişki  | 100          |
| Şekil 5.10      | Balıkesir istasyonunda, $M > 5$ ve $r < 100$ km şartlarını sağlayan 09lt2422 nolu yer hareketi kaydının, spektral azalım ilişkileri ile Karşılaştırılması                                      | 102          |
| Şekil 5.11      | Sadiğ vd. [130] spektral azalım ilişkisi ile Balıkesir istasyonlarında uygun şartlardaki yer hareketi kayıtlarının karşılaştırılması   | 104          |
| Şekil 5.12      | Ansal [128] ilişkisine dayalı olarak % 10 aşılma olasılığına sahip en büyük ivmenin, Balıkesir yerleşim alanı sınırları içindeki değişimi  | 105          |
| Şekil 5.13      | Balıkesir tasarım depremi için literatürdeki azalım ilişkilerine dayalı, zemin şartlarındaki spektral ivmeler  | 106          |
| Şekil 5.14      | Balıkesir tasarım depremi için literatürdeki azalım ilişkilerine dayalı, kaya şartlarındaki spektral ivmeler   | 107          |

| <b>Sekil No</b> | <b>Adı</b>   | <b>Sayfa</b> |
|-----------------|--|--------------|
| Şekil 5.15      | Balıkesir için ana kaya seviyesinde, Boore vd. [137] ve Ambraseys vd. [133] azalım ilişkilerine dayalı, ortalama ve % 10 aşılma olasılığına sahip spektral ivmeler                   | 109          |
| Şekil 5.16      | Yer hareketi modellemesinde kullanılan Fourier genlik spektrumunun temel elemanları  | 112          |
| Şekil 5.17      | Frekans bağımlı kalite faktörü   | 114          |
| Şekil 5.18      | Literatürdeki bazı çalışmalara ait yüksek frekans aralığındaki kalite faktörleri   | 114          |
| Şekil 5.19      | Gerilme farkı ve kalite faktörü değişiminin, farklı hedef spektrum ve farklı kayıtlar ile üretilen yer hareketleri üzerindeki etkisi ( $\kappa=0.035$ için)                          | 118          |
| Şekil 5.20      | Gerilme farkı ve kalite faktörü değişiminin, farklı hedef spektrum ve farklı kayıtlar ile üretilen yer hareketleri üzerindeki etkisi ( $\kappa=0$ için)                              | 119          |
| Şekil 5.21      | Sol taraf; sabit gerilme farkı için kalite faktöründeki değişimin etkisi, sağ taraf; kalite faktörünün sabit olması durumunda gerilme farkındaki değişimin etkisi ( $\kappa=0$ için) | 120          |
| Şekil 5.22      | Boore vd. [137] azalım ilişkisine dayalı hedef spektrum ile yapılan simülasyonlarda, kullanılan ve üretilen yer hareketi kayıtlarına ait spektrumlar                                 | 122          |
| Şekil 5.23      | Normal fay tipi için Ambraseys vd. [133] azalım ilişkisine dayalı Hedef spektrum ile yapılan simülasyonlarda, kullanılan ve üretilen yer hareketi kayıtlarına ait spektrumlar        | 123          |
| Şekil 5.24      | Yanal atımlı fay tipi için Ambraseys vd. [133] azalım ilişkisine dayalı hedef spektrum ile yapılan simülasyonlarda, kullanılan ve üretilen yer hareketi kayıtlarına ait spektrumlar  | 124          |
| Şekil 5.25      | Programın verisi, her bir yer hareketi kaydı için farklı hedef spektrumlara dayalı olarak üretilen kayıtların karşılaştırılması  | 125          |
| Şekil 5.26      | Her bir hedef spektrum için, kullanılan 6 farklı yer hareketi kaydına dayalı olarak elde edilen yapay kayıtlara ait spektrumlar ve ortalaması  | 126          |
| Şekil 5.27      | Z3 yerel zemin sınıfında tanımlanan temsili zemin ve kayma dalgası hız profilleri  | 127          |
| Şekil 5.28      | Z2 yerel zemin sınıfında tanımlanan temsili zemin ve kayma dalgası hız profilleri  | 128          |
| Şekil 5.29      | Z1 yerel zemin sınıfında tanımlanan temsili zemin ve kayma dalgası hız profili   | 128          |
| Şekil 5.30      | V29 profili davranış analizi sonuçları (Z1 yerel zemin sınıfı, $V_{s30m}=406$ m/s)   | 130          |
| Şekil 5.31      | U30 profili davranış analizi sonuçları (Z2 yerel zemin sınıfı, $V_{s30m}=278$ m/s)   | 131          |
| Şekil 5.32      | S34 profili davranış analizi sonuçları (Z2 yerel zemin sınıfı, $V_{s30m}=314$ m/s)   | 132          |
| Şekil 5.33      | S27 profili davranış analizi sonuçları (Z3 yerel zemin sınıfı, $V_{s30m}=274$ m/s)   | 133          |
| Şekil 5.34      | U35 profili davranış analizi sonuçları (Z3 yerel zemin sınıfı, $V_{s30m}=337$ m/s)   | 134          |

| <b>Şekil No</b> | <b>Adı</b>   | <b>Sayfa</b> |
|-----------------|--|--------------|
| Şekil 5.35      | RASCAL ile üretilen yer hareketi kayıtları   | 136          |
| Şekil 5.36      | TARSCTHS ile üretilen yer hareketi kayıtları   | 137          |
| Şekil 5.37      | Maksimum ivme ölçekleme yöntemi ile üretilen yer hareketi Kayıtları  | 138          |
| Şekil 5.38      | RASCAL ile üretilen kayıtlara ait davranış spektrumları (hedef spektrum ve girdi konumundaki gerçek yer hareketi kaydı spektrumu ile)                    | 140          |
| Şekil 5.39      | TARSCTHS ile üretilen kayıtlara ait davranış spektrumları (hedef spektrum ile)   | 141          |
| Şekil 5.40      | RASCAL, TARSCTHS ve maksimum ivme ölçeklemesi ile üretilen kayıtların davranış spektrumları  | 142          |
| Şekil 5.41      | Farklı zemin profillerinde, üretilen 18 yer hareketi kaydı ile yapılan davranış analizi sonuçları  | 144          |
| Şekil 6.1       | Zemin davranış analizlerinde kullanılan yer hareketleri  | 150          |
| Şekil 6.2       | Ortalama spektral ivmelerin inceleme alanlarındaki frekans Dağılımı  | 151          |
| Şekil 6.3       | Ortalama spektral ivme ve maksimum spektral ivme arasındaki İlişki   | 151          |
| Şekil 6.4       | Ortalama spektral ivme ve ivme spektrum şiddeti arasındaki İlişki  | 152          |
| Şekil 6.5       | Davranış analizlerine dayalı optimizasyon yöntemi ve NEHRP prosedürü ile bulunan 0.2 sn periyotlu spektral ivmelerin karşılaştırılması                   | 153          |
| Şekil 6.6       | Davranış analizlerine dayalı optimizasyon yöntemi ve NEHRP prosedürü ile bulunan 1 sn periyotlu spektral ivmelerin karşılaştırılması                     | 154          |
| Şekil 6.7       | Maksimum ivme ölçekleme yöntemi ile üretilen yer hareketi Kayıtları  | 155          |
| Şekil 6.8       | RASCAL ve ölçekleme yönteminde kullanılan yer hareketi kayıtları için maksimum ivme frekans dağılımları  | 157          |
| Şekil 6.9       | RASCAL ve ölçekleme yönteminde kullanılan yer hareketi kayıtları için Arias şiddeti frekans dağılımları  | 158          |
| Şekil 6.10      | RASCAL ve ölçekleme yönteminde kullanılan yer hareketi kayıtları için 0.2 sn deki spektral ivmelerin frekans dağılımları                                 | 159          |
| Şekil 6.11      | Maksimum ivme frekans dağılımlarının bölgesel olarak ayrılması   | 160          |
| Şekil 6.12      | Arias şiddeti frekans dağılımlarının bölgesel olarak ayrılması   | 160          |
| Şekil 6.13      | 0.2 sn deki spektral ivme frekans dağılımlarının bölgesel olarak Ayrılması   | 161          |
| Şekil 6.14      | Maksimum ivme frekans dağılımları  | 161          |
| Şekil 6.15      | Arias şiddeti frekans dağılımları  | 162          |
| Şekil 6.16      | 0.2 sn periyotlu spektral ivmenin frekans dağılımı   | 162          |
| Şekil 7.1       | Balıkesir yerleşim alanı sınırlarında oluşturulan 250*250 m boyutlu hücre sistemi ve zemin davranış analizleri yapılan temsili profillerin koordinatları | 166          |
| Şekil 7.2       | 18-02 Bölgesinde Türk Deprem Yönetmeliğine göre zemin sınıflarının değişimi  | 167          |

| <b>Şekil No</b> | <b>Adı</b>  | <b>Sayfa</b> |
|-----------------|---|--------------|
| Şekil 7.3       | BPH Bölgesinde Türk Deprem Yönetmeliğine göre zemin sınıflarının değişimi   | 167          |
| Şekil 7.4       | 18-02 Bölgesinde NEHRP' e göre zemin sınıflarının değişimi  | 168          |
| Şekil 7.5       | BPH Bölgesinde NEHRP' e göre zemin sınıflarının değişimi  | 168          |
| Şekil 7.6       | Balıkesir yerleşim alanında inceleme alanları dışındaki bölge için, NEHRP'e göre zemin sınıflarının değişimi                      | 170          |
| Şekil 7.7       | 18-02 Bölgesinde zemin davranış analizleri ile belirlenen ortalama spektral ivmelerin değişimi                                    | 172          |
| Şekil 7.8       | BPH Bölgesinde zemin davranış analizleri ile belirlenen ortalama spektral ivmelerin değişimi                                      | 172          |
| Şekil 7.9       | 18-02 Bölgesinde eşdeğer kayma dalgası hızlarına dayalı olarak Borchardt ilişkisi [76] ile belirlenen spektral ivmelerin değişimi | 173          |
| Şekil 7.10      | BPH Bölgesinde eşdeğer kayma dalgası hızlarına dayalı olarak Borchardt ilişkisi [76] ile belirlenen spektral ivmelerin değişimi   | 173          |
| Şekil 7.11      | 18-02 Bölgesinde yer hareketine göre bölgeleme  | 174          |
| Şekil 7.12      | BPH Bölgesinde yer hareketine göre bölgeleme  | 174          |
| Şekil 7.13      | Balıkesir yerleşim alanı sınırları içinde yer hareketine göre bölgeleme   | 175          |

## TABLO LİSTESİ

| <b>Tablo No</b> | <b>Adı</b>   | <b>Sayfa</b> |
|-----------------|--|--------------|
| Tablo 3.1       | Balıkesir yerleşim alanı ve çevresinin stratigrafik kesiti   | 43           |
| Tablo 3.2       | BPH Bölgesindeki rezistivitelerin, etrafındaki laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılması                         | 58           |
| Tablo 4.1       | Geoteknik modelleme için belirlenen zemin grupları   | 82           |
| Tablo 4.2       | Geoteknik modellemede kullanılan zemin grupları ve dinamik davranış modelleri  | 83           |
| Tablo 5.1       | Tarihsel ve aletsel dönemlerde Balıkesir çevresinde R=100 km yarıçaplı alan içinde kalan bölgede meydana gelen depremler | 94           |
| Tablo 5.2       | Gerilme farkı ve kalite faktörü sabitinin değişen değerlerine dayalı olarak belirlenen 6 farklı durum                    | 116          |
| Tablo 5.3       | Rascal programında kullanılan yer hareketi kayıtları   | 116          |
| Tablo 5.4       | Üretilen kayıtlara ait bazı yer hareketi parametreleri   | 149          |
| Tablo 6.1       | Zemin davranış analizlerinde kullanılan, RASCAL programı ile üretilmiş yer hareketi kayıtları                            | 149          |
| Tablo 6.2       | Zemin davranış analizlerinde kullanılan kayıtlara ait yer hareketi Parametreleri   | 149          |
| Tablo 6.3       | Maksimum ivme ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtlara ait bazı Parametreler   | 155          |

## ÖNSÖZ

Öncelikle, danışmanım Sayın Prof. Dr. Atilla Ansal'a, doktora öğrencisi olarak bana kendisiyle çalışma fırsatını tanıdığı için minnettar olduğumu açıklamak isterim. Çalışmalarım sırasında çok değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak, her aşamada gösterdiği sonsuz destekten dolayı kendisine teşekkür ediyorum. Tez İzleme Komitesi jüri üyelerim, Sayın Prof. Dr. Şerif Saylan ve Sayın Prof. Dr. Mustafa Erdik' e yardımları ve tezime olan katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

Annem Bilge Türker, babam Nasip Türker ve kardeşim Dr. Kaan Türker, her zaman ve her konuda olduğu gibi tez çalışmam sırasında da çok büyük destek gösterdiler. Hepsine çok teşekkür ediyorum.

Sevgili eşim Levent'e evliliğimiz boyunca süren öğrencilik ve iş hayatımda gösterdiği sonsuz destek ve sevgi ile birlikte, tez çalışmalarım sırasındaki anlayışı ve sabrı için teşekkür ederim.

Kızım Dilara, yoğun çalışma zamanlarımda hep çok büyük bir sabır gösterdi. Daima yanımda olarak beni destekleyen canım kızıma teşekkür ediyorum.

**2005**

**Banu Yağcı**

## 1. GİRİŞ

Mikrobölgeleme, yer hareketi karakteristiklerinin belirlenmesi için deprem kaynağı, yol ve zemin şartlarının karşılıklı etkileşimini göz önüne alan disiplinler arası bir konudur. Zemin tabakalarının deprem etkileri altındaki davranışlarının ve dolayısıyla zemin yüzeyinde deprem özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi çalışmalarını kapsamaktadır. Bu doğrultuda mikrobölgeleme çalışmalarında, olası deprem özelliklerinin ve etkisinin göz önüne alınması gerekmektedir.

Yerel zemin koşullarının yer hareketi üzerindeki etkisinin araştırılmasında, yüzey ve yer altı topoğrafyasına, geçmişte gözlenen depremler ya da sismik tehlike analizleri ile belirlenen kaynak ve yol karakteristiklerine ve ekonomik imkanlara bağlı olarak farklı yöntem ve yaklaşımlardan yararlanılabilir. 2. bölümde, yerel zemin şartlarının etkisinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler, 5 ana grup altında değerlendirilmekte ve literatürdeki mikrobölgeleme çalışmaları, uygulanan yaklaşımlar doğrultusunda incelenmektedir. Sismik, jeolojik ve geoteknik verinin nasıl birleştirileceği ve sonuçların hangi parametrelere göre, nasıl yorumlanacağı doğrultusunda farklı yaklaşımlar ve yöntemler uygulanabilmektedir.

Balıkesir için sismik mikrobölgeleme uygulaması, derlenen farklı kaynaklı veriler doğrultusunda Belediye sınırları içindeki 4 mahalle ve 1 konut bölgesini kapsayan inceleme alanları ile sınırlıdır. İnceleme alanlarının jeolojisi, 1/2000 [1] ve 1/5000 [2] ölçekli iki farklı çalışma ile Balıkesir yerleşim alanı sınırları içindeki DSİ ve MTA' dan derlenen [2, 3], 16 derin su sondajındaki litolojik kesitlere dayalı olarak 3. bölümde değerlendirilmektedir. Aynı bölümde, mevcut rezistivite sondajları, jeolojik ve geoteknik veri ile birlikte yorumlanmaya çalışılmaktadır.

Balıkesir yerleşim alanı sınırları içinde, BPH Bölgesi, 18-02 Konut Bölgesi ve Akıncılar Mahallesinden oluşan inceleme alanlarındaki geoteknik veritabanı, iki

farklı kaynaktan alınan mevcut verilere dayanmaktadır. 4. bölümde sunulan geoteknik modelleme aşaması, uygun hücre boyutları ile karelere ayrılan inceleme alanlarında, her hücrenin ortasına atanacak temsili zemin profilinin belirlenmesini kapsamaktadır. Bu aşamada, farklı kaynaklı verilerin birleştirilmesine dayalı olarak ortaya çıkan yaklaşımlar doğrultusunda, inceleme alanlarındaki zemin grupları ve dinamik davranış modelleri tanımlanarak, mevcut veri dağılımına uygun seçilen hücre sistemlerinde temsili zemin profilleri modellenmektedir.

5. bölümde, Balıkesir civarında 100 km yarıçapındaki sismik etkinliklerin olasılıksal yöntemlerle değerlendirildiği analizler sonucu hesaplanmış olan, tasarım depremi değerlerine dayalı olarak, ana kaya seviyesindeki yer hareketi parametreleri belirlenmektedir. Literatürdeki farklı azalım ilişkileri için elde edilen değerler, Balıkesir’ deki yer hareketi kayıtları ile karşılaştırılmaktadır. Tasarım depremi değerleri için farklı azalım ilişkileri kullanılarak hesaplanan eş tehlike davranış spektrumları ile uyumlu teorik sentetik yer hareketi kayıtları üretilmektedir. Bu amaçla, frekans tanım alanındaki spektral uyuşum yöntemlerinden biri olan RASCAL (Response Spectra and Acceleration Scaling) [4] programı kullanılmaktadır. RASCAL gerçek yer hareketi kaydına ait Fourier faz spektrumunun kullanımıyla birlikte rassal titreşim teorisine dayalı geliştirilen yarı-ampirik bir yöntemdir. Yöntemdeki yer hareketi modelinin temel elemanlarını oluşturan, basit fonksiyonel formdaki kaynak özellikleri ve dalga yayılım ortamına ait bazı bölgesel parametreler (gerilme farkı ve kalite faktörü sabiti) ve kullanılan gerçek yer hareketi kayıtları için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Programın girdisi olan gerçek kayıtlar, Balıkesir için belirlenen tasarım parametreleri ile büyüklük ve frekans içeriği açısından uyumlu olabilecek, Türkiye’ deki kayıtlar arasından seçilmiştir. RASCAL ile üretilen yer hareketi kayıtları, hedef yer hareketi parametreleri için farklı yöntemler ile üretilen kayıtlarla karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla TARSCTHS [5] programı ve maksimum ivme değeri için zamana bağlı kayıtların oranlanması yöntemi kullanılmaktadır.

Modellenen temsili profillerin SHAKE 91 [6] programı ile yapılan zemin davranış analizi sonuçları 6. bölümde sunulmaktadır. Bu aşamada iki grup yer hareketi kaydı kullanılmıştır. İlk grupta, önceki bölümde Balıkesir için belirlenen



hedef parametreler doğrultusunda RASCAL ile üretilen 18 kayıt içinden seçilen 6 yer hareketi bulunmaktadır. Bu kayıtlar, 3 farklı hedef spektrum ve 6 farklı gerçek yer hareketine dayanmaktadır. 2. gruptaki 6 kayıt, Türkiye'den seçilen gerçek yer hareketlerinin, Balıkesir il merkezi için olasılıksal olarak belirlenen 0.26 g değerindeki en büyük ivme ile oranlanması sonucu elde edilmiştir. İki grup yer hareketi kaydının kullanıldığı davranış analizi sonuçları, yüzeyde elde edilen maksimum ivme, Arias şiddeti ve spektral parametreler cinsinden, frekans dağılımlarına dayalı olarak karşılaştırılmaktadır. RASCAL ile üretilen kayıtların kullanıldığı analizlere dayalı olarak, her hücre için 0.1-1 sn periyot aralığındaki ortalama spektral ivmeler ve NEHRP [7] kriterlerinin sağlandığı bir optimizasyon yaklaşımı ile tasarım spektrumu parametreleri belirlenmiştir.

7. bölümde, Balıkesir yerleşim alanı sınırlarındaki 250\*250 m boyutlu hücre sistemi için, coğrafi bilgi sistemi kullanılarak haritalanan, inceleme alanlarının mikrobölgelemesi sunulmaktadır. Mikrobölgeleme parametresi, iki farklı yaklaşım ile hesaplanan spektral ivmelere dayanmaktadır. Sonuçlar 8. bölümde yer almaktadır.

## 2. MİKROBÖLGELEME

### 2.1 Giriş

Deprem riskinin azaltılması amaçlı yapılan çalışmaların başlangıç aşamasını oluşturan mikrobölgeleme, yer hareketi karakteristiklerinin belirlenmesi için deprem kaynağı, yol ve zemin şartlarının karşılıklı etkileşimini göz önüne alan disiplinler arası bir konudur.

Sismik mikrobölgeleme, zemin tabakalarının deprem etkileri altındaki davranışlarının tahmin edilmesi ve buna bağlı olarak zemin yüzeyinde deprem özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesidir. Deprem hareketindeki değişim, deprem kaynağı ve yol özelliklerinin yerel jeolojik ve geoteknik koşullar ile birlikte olasılıksal olarak değerlendirilmesi ile incelenmektedir. Ulusal ölçekteki makrobölgeleme haritaları, önceden tanımlanmış bir zemin veya kaya koşuluna göre olasılıksal deprem tehlikesini göstermektedir fakat küçük ölçekli haritaların yeterli detayda olmaması nedeni ile makrobölgeleme haritalarında yerel zemin koşulları dikkate alınmamaktadır [8].

Ansal vd. [9] tarafından mikrobölgeleme, bir bölgede olabilecek deprem özellikleri göz önüne alınarak zemin tabakalarının nasıl bir davranış göstereceklerinin ve yapıları etkileyecek deprem kuvvetlerinin inceleme bölgesi içinde nasıl bir değişim göstereceğinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır.

Finn vd.'nin [10] tanımlaması ile mikrobölgeleme, yerel zemin şartlarının etkisini göz önüne alarak tasarım için sismik tehlike tahminlerinin geliştirilmesi prosedürüdür. Mikrobölgelemenin amacı doğrultusunda deprem kuvvetlerine karşı yapı tasarımında etkili parametreler kullanılmaktadır. Ancak sismik mikrobölgeleme uygulamalarında amaç parsel bazında uygulamaya yönelik tasarım parametrelerinin kullanılması olmamalıdır. Bu çalışmalar öncelikli olarak, kent planlaması ve arazi

kullanım amaçlı parametrelerin belirlenmesini hedeflemektedir [11]. Sismik mikrobölgelemenin temel hedefi gelecekteki deprem kayıplarının önlenmesi olmasına rağmen, bu tür çalışmaların çoğunun hasar verici bir depremden sonra yeniden yapılanma için uygun yerin seçilmesi amacıyla oluşturulduğu bilinmektedir [12].

Bir mikrobölgeleme çalışmasında ilk aşama, deprem kaynak ve yol karakteristiklerini göz önüne alarak olabilecek yer hareketi için tehlike analizidir. İkinci aşamada, geoteknik zemin şartları ve belirlenen yer hareketi altında zemin tabakalarının davranışları belirlenmektedir. Son aşamada, ilk iki aşamadan elde edilen sonuçlara dayanan bir bölgeleme oluşturulmaktadır [13].

Mikrobölgeleme için ISSMFE Geoteknik Deprem Mühendisliği Teknik Komitesi tarafından hazırlanan el kitabı, bölgesel yer hareketi davranışı, şev stabilitesi ve sıvılaşma olmak üzere üç tip geoteknik olayın değerlendirilmesi için kabul edilmiş yaklaşımları içermektedir. Yer hareketi için mikrobölgeleme çalışmaları, içeriğine dayalı olarak üç farklı aşamada gruplanmaktadır. Birinci aşama, mevcut bilgilerin ve tarihi dokümanların derlenmesine ve yorumlanmasına dayalı genel bir bölgeleme ile tanımlanabilir. İkinci aşama, basit geoteknik çalışmaları ve mikrotremor ölçümlerini kapsamaktadır. Üçüncü aşama bölgeleme ise detaylı geoteknik araştırmalar ve sayısal analiz yöntemlerine dayanmaktadır [14].

Mikrobölgeleme çalışmalarında teoride ve uygulamada gelinen en son durum, “Deprem Risklerini Azaltmak için Mikrobölgeleme (MERM)” adı verilen çalışma ile “Belediyeler için Sismik Mikrobölgeleme” genel başlıklı projede derlenmiştir. DRM (World Institute for Disaster Risk Management) tarafından Marmara Bölgesi için organize edilen projede, 1999 Kocaeli depreminden ciddi oranda etkilenen, Kocaeli ve Sakarya illeri bu detaylı bilimsel çalışma için seçilen pilot illerdir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin ardından, etkilenen bölgedeki bina standartlarının ve arazi kullanımının düzenlenmesine ait yaklaşımların yetersizliği konusunda genel bir görüş birliği sağlanmıştır. Bu projenin, mikrobölgeleme ile ilgili, sismolojik, geoteknik ve yapısal faktörlerin bilimsel değerlendirmesinde teknik bir destek sağlanması planlanmıştır. Bu iki pilot çalışmadan çıkarılan sonuçlara da dayalı olarak,

Türkiye'de arazi kullanımının düzenlenmesi ve sismik mikrobölgeleme için bir el kitabı hazırlanmıştır [8].

Mikrobölgelemeyi, yerel ölçekte (1/10000, 1/2000) uygulanan sismik bölgeleme için kullanılan bir teknik olarak tanımlarsak, önemli bir şehir ile küçük bir kasaba için ya da zengin ve fakir bir ülke için aynı mikrobölgeleme metodolojisinin uygulanmasının mümkün olmadığı bir gerçektir [15]. Aynı zamanda, farklı mühendislik problemlerinin, farklı yer hareketi karakteristiklerinden etkilenmeleri nedeniyle mikrobölgelemede kullanılacak parametrelerin çeşitliliği ve inceleme alanı veri tabanları, mikrobölgeleme uygulamalarındaki yaklaşımları yönlendirmektedir. Bu bölümde, uygulamadaki mikrobölgeleme yöntemleri izlenen farklı yaklaşımlar doğrultusunda incelenmektedir.

## **2.2 Yer Hareketleri Üzerinde Yerel Zemin Şartlarının Etkisi**

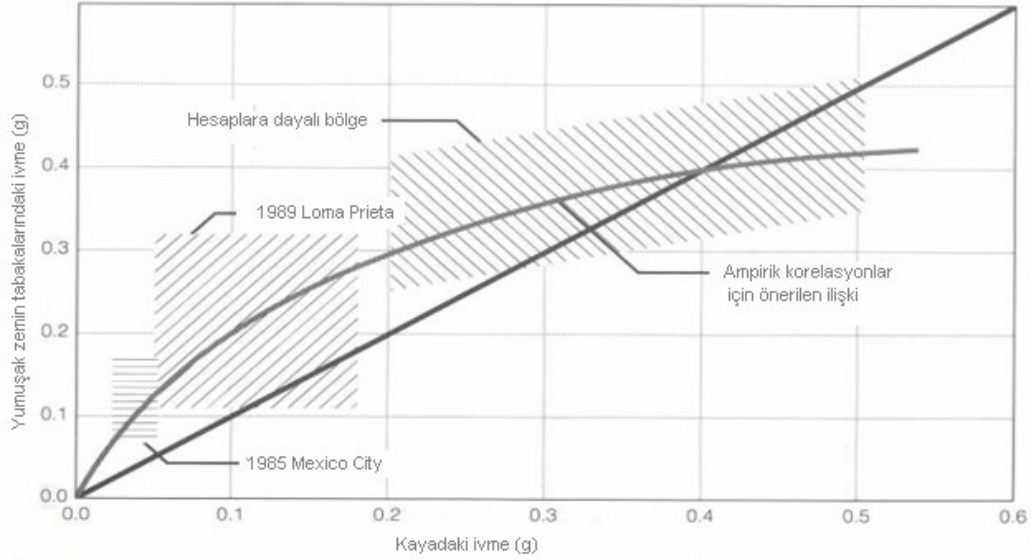
Yerel zemin şartları, yer hareketinin önemli karakteristikleri olan genliği, frekans içeriği ve süresini önemli oranda etkileyebilir. Bu etkinin miktarı, zemin özelliklerine, arazi topografyasına ve ana kayadaki yer hareketi karakteristiklerine bağlıdır. Teorik davranış analizlerinin temelini oluşturan kanıtlar, yerel zemin koşullarının, yüzeydeki yer hareketini etkileyebileceğini göstermektedir. Birçok arazi için, yüzeye yakın zeminlerin yoğunluğu ve kayma dalgası hızı derinlerdeki zeminlere oranla daha küçüktür. Eğer yayılma ve malzeme sönümü etkileri ihmal edilirse, elastik dalga enerjisinin korunumu teorisi, derinden yüzeye akan enerjinin sabit kalmasını gerektirmektedir (enerji akışı,  $\rho v_s u^2$ ). Bu durumda yüzeye yaklaşan dalganın yoğunluğu ve kayma dalgası hızı azaldığı için partikül hızı ( $u$ ) artacaktır. Yerel zeminin karakteristikleri, spesifik impedans sabit olduğunda zemin büyütmesinin oluşacağı aralığı da etkileyebilir. Geometrileri benzer ancak biri diğerinden daha rijit iki zeminin lineer olarak elastik ve ana kayanın ise rijit varsayılmasıyla yürütülen davranış analizlerinin sonuçları; yumuşak zeminin ana kayadaki hareketi rijit zemine göre daha düşük frekansta büyüttüğünü göstermektedir [16].

Ana kaya derinliği, yeraltı su seviyesi, zemin tabakalarının özellikleri ve kalınlığındaki değişiklikler nedeniyle çok farklı olabilen geoteknik zemin şartları, yüzeydeki yer hareketi karakteristiklerini kontrol eden ana faktörler arasındadır. Depremler sırasında, farklı genlik ve frekanslardaki tekrarlı gerilmelere maruz zemin tabakalarının gerilme-şekil değiştirme özellikleri ve mukavemet özellikleri değişebilir. Bu durumda hem zemin tabakalarının davranışı hem de yüzeydeki yer hareketi karakteristikleri, zemin tabakalarının özelliklerinden etkilenecektir. Özellikle plastisite indisinin, zemin tabakalarının tekrarlı yükler altındaki gerilme-deformasyon davranışını etkileyen parametrelerden önemli bir tanesi olduğu laboratuvar deneylerine dayalı olarak bilinmektedir [17]. Ansal vd.'nin [18] çalışmasında, arazi deneylerine dayalı olarak belirlenen zemin büyütmesi ile plastisite indisi arasındaki ilişki, sınırlı veriye rağmen görülebilmektedir.

Yüzey ve yeraltı topoğrafyası, yer hareketi karakteristikleri üzerinde yerel zemin şartlarının etkisini kontrol eden önemli parametrelerdir. Basen yapısındaki arazilerde yatay olarak ilerleyen yüzey dalgalarının, 1 boyutlu etkiye ek amplifikasyona neden olduğu ve yer hareketi süresini uzattığı yapılan çalışmalarla gözlenmektedir [19]. Kayma dalgası için 2 boyutlu sayısal simülasyona dayalı parametrik analizler, Thessaloniki (Yunanistan) örneğinde [20], zemin davranışının temel olarak basen şekline bağlı olduğunu çünkü davranışın büyük bir oranda yerel olarak oluşan yüzey dalgaları tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Dolayısıyla, sığ alüvyon vadilerdeki yatay heterojenliğin neden olduğu ek büyütmelemin (aggravation factor) düşünülmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Yüzeydeki yer hareketi karakteristiklerini kontrol eden parametrelerden biri de ana kayadaki yer hareketi şiddetidir. Yumuşak zemin tabakalarının ana kayadaki farklı yer hareketi şiddeti ile değişen davranışları, gözlem ve analiz sonuçlarına dayalı olarak Şekil 1 deki eğri ile gösterilmektedir. Seed vd. [21] tarafından, Batı Amerika'daki manyitüdü 6.5 olan deprem kayıtları kullanılarak farklı zemin şartlarındaki pik ivmeler için istatitksel bir çalışmaya dayalı olarak önerilen eğri, Idriss [22, 23] tarafından 1985 Mexico City ve 1989 Loma Prieta depremi verileri kullanılarak yumuşak zeminler için modifiye edilmiştir. Bu depremlerde, ana kaya ivmesinin 0.05g ve 0.1g arasındaki düşük değerlerinde, çok değişken kalınlıklarda

yumuşak kil tabakasına sahip bölgelerde 1.5 ile 4 kat arasında büyütme faktörleri görülmektedir. Şekil 2.1'deki gözlem ve analiz sonuçlarında görüldüğü gibi, yumuşak zeminler için ortalama büyütme faktörü, kayadaki ivme artışı ile birlikte azalma eğilimindedir; ana kayadaki düşük ivmelere karşılık 2.5 ile 3 arasında iken 0.4g'lik bir ivme durumunda büyütme faktörünün 1 olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1 Ana kaya-yumuşak zemin maksimum ivme ilişkisi (Idriss [22, 23])

Geçmiş depremlerdeki aletsel ölçümler, zemin tabakalarının yer hareketini gerek zaman gerekse frekans tanım alanında etkilediklerini göstermektedir. Deprem dalgaları üzerinde yerel zemin koşullarının etkisine ait en klasik örneklerden biri olan 1967 Karakas depreminde, zemin tabakaları ile yapının aynı periyotta hareket etmesi sonucu rezonans durumu gözlenmiştir. Karakas bölgesindeki zeminin rijitliği relatif olarak üniform olduğundan, zeminin periyoduna yakın doğal periyoda sahip binalardaki yapısal hasarın büyük bir miktarına, zemin derinliğindeki değişimin sebep olduğu belirtilmektedir [24].

Bir diğer klasik örnekte, zemin tabakaları ile yapının periyotları aynı zamanda yer hareketinin periyodu ile çakışmaktadır. 1985 Meksika depreminde odaktan 400 km uzakta 50 m kalınlığında yumuşak zemin tabakaları ( $V_s=100\text{m/sn}$ ),

sert zemin koşullarına göre dalga genliklerini 5 kat daha fazla büyüterek, üzerindeki yüksek yapıları (10–20 katlı) ağır hasara uğratmıştır [25]. Bu yumuşak kil tabakalarında, 2 saniye periyodundaki spektral ivmelerin kayadakine oranla 15-20 kat daha büyük olduğu gözlenmiştir. Killerin daha kalın olduğu vadinin diğer bölgesinde de, 3-4 saniye arasında değişen periyotlardaki spektral ivmelerin 15 kat büyütüldüğü ancak bu yüksek periyotlardaki ana kaya ivmelerinin düşük olması nedeniyle hasarların çok yüksek olmadığı belirtilmektedir [26]. 1989 Loma Prieta depreminde ise yumuşak kil zeminlerin bulunduğu bazı bölgelerdeki yer hareketi kayıtlarından, yüksek periyotlara ait spektral değerlerdeki büyütme oranları 3 ile 6 kat arasında olduğu görülmektedir [27].

Yerel zemin şartlarının etkisini gösteren diğer bir örnek 1999 Kocaeli depreminde İstanbul’da ölçülen faya yaklaşık eşit uzaklıktaki kuvvetli yer hareketi kayıtlarıdır. Bu kayıtlarda gözlenen en büyük ivme değerleri; Maslak'ta 0.05g, Ataköy'de 0.17g ve Ambarlı'da 0.25g değerleri ile yaklaşık 5 misli kadar değişim göstermektedir [9].

Yerel zemin şartlarının etkisi, yer hareketi ile olan etkileşimin derecesine dayalı olarak değişmektedir. Ana kaya seviyesinde ivme değerlerinin büyük olması zeminlere gelen tekrarlı kayma gerilmelerinin büyük olmasına ve dolayısıyla yumuşak ve gevşek zemin tabakalarında elasto-plastik davranışlara neden olacaktır. Böyle bir durumda zemin yüzeyinde oluşan ivme değerlerinde bir azalma söz konusu olabilir. 1933 Long Beach (Kaliforniya), 1971 San Fernando ve 1994 Northridge depremi hasar dağılımlarını aynı metodoloji ile inceleyen çalışmalarda [28, 29], bu etkileşim sonucu, zeminde büyük deformasyonların ve farklı hareketlerin gözlemlendiği bölgeler ile binalarda ciddi seviyede hasarın gözlemlendiği alanların farklı olduğu gözlenmektedir. Bu gözlemler, zeminin kötü olduğu bölgelerde, hasarın daha büyük olacağı şeklindeki popüler görüşe uymamaktadır. Zeminlerin büyük deformasyon yaptığı bölgelerde, binalardaki potansiyel hasarda önemli bir azalma beklenebileceği gözlenmiştir.

## 2.3 Yerel Zemin Şartlarının Etkisinin Araştırılması

Yerel zemin koşullarının yer hareketi üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmalar, yüzey ve yer altı topoğrafyasına, geçmişte gözlenen ya da sismik tehlike analizleri ile belirlenen deprem kaynak ve yol karakteristiklerine ve ekonomik imkanlara dayalı olarak farklı yöntemler ve yaklaşımlar içermektedir. Literatürde çoğunlukla, kuvvetli ve zayıf yer hareketi kayıtlarını, mikrotremor ölçümlerini ve sayısal analiz yöntemlerini kullanan çalışmalar olarak gruplanabilecek, farklı yöntem ve yaklaşımlar karşılaştırılmakta ve incelenen bölgenin sismik, topografik, jeolojik ve geoteknik özellikleri göz önüne alınarak uygunlukları değerlendirilmektedir.

Pitilakis [30], yerel zemin şartlarının etkisinin belirlenmesinde kullanılan yöntemleri genel olarak 5 ana grupta toplamaktadır. **(1) Ampirik-Deneysel yöntemler**, genellikle frekans tanım alanındaki beklenen yer hareketi karakteristiklerinin tahmininde yer hareketi ve çevre gürültüsü kayıtlarını kullanmaktadır. **(2) Ampirik yöntemlerde** hız, ivme ve davranış spektrumu gibi yer hareketi parametreleri, zemin sınıflandırması, kayma dalgası hızı, topoğrafya, ve deprem büyüklüğüne dayalı olarak mevcut büyüme ilişkileri ile belirlenmektedir. Bu yöntem, genel olarak sismik yönetmeliklerdeki yaklaşım olarak tanımlanabilir. **(3) Yarı ampirik yöntemler**, küçük depremlerdeki kayıtların (örneğin, Green fonksiyonları) birleşimi ile yer hareketi kaydı üretilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemler kaynak mekanizması ve dalga yayılım yolu ile ilgili veri gerektirmektedir. **(4) Teorik yöntemler**, 1 boyutlu, 2 boyutlu veya 3 boyutlu dalga yayılım modellerinin kullanıldığı sayısal analiz yöntemlerini kapsamaktadır. **(5) Hibrit yöntemlerde** üretilen yer hareketi kayıtlarının yüksek periyot bileşenleri teorik sismik fay modellerinden, düşük periyot bileşenleri ise yarı-ampirik yöntemlerle hesaplanan sismik dalga yayılım modelleri ile belirlenmektedir.

### 2.3.1 Ampirik-Deneysel Yöntem

Deprem kaynağı, yol ve yerel zemin şartlarının etkisini içeren Fourier spektrumunda, yerel etkilerin tahmin edilebilmesi için kaynak ve yol etkilerinin ayrılması gerekmektedir. Bu doğrultuda önerilen yöntemler, referans istasyonunun



kullanım kriterine dayalı olarak iki ana grupta toplanmaktadır. En yaygın olarak kullanılan deney tekniklerinden, Standart Spektral Oran (SSR), zemin kaydı Fourier genlik spektrumunun aynı deprem için kayadakine oranı ile tanımlanmaktadır. Diğer bir popüler deney tekniğinde, her kayıt için yatay ve düşey spektrumlar oranlanmaktadır (HVSR) [30].

Bu gruptaki yerel zemin şartlarının etkisini inceleyen çalışmaların bir kısmı, farklı depremlerdeki kayıtların, elde edildikleri zemin koşullarına göre gruplandırılmasına dayanmaktadır. Örneğin, farklı zemin ve jeolojik şartları yansıtabileceği düşünülerek seçilen 26 bölgeyi kapsayan İran kuvvetli yer hareketi ağındaki çalışmada[31], sismik tehlike çalışmalarında ve azalım modellerinde kullanılabilecek zemin grupları belirlenmektedir. Zeminlerin kayma dalgası hızları, efektif inceleme derinliği 30-35 m olan sismik kırılma deneyleri ile belirlenmiş ve yer hareketi kayıtlarının analizinde H/V spektral oran tekniği kullanılmıştır. Zeminler, kayma dalgası hızı ve büyütme frekans bandına dayalı olarak 4 grup altında sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma, farklı bir çalışmadaki yüzey jeolojisine dayalı bir sınıflandırma ile karşılaştırılmış ve uyumun % 16 gibi bir oranda olduğu gözlenmiştir.

Diğer bir çalışmada [32], 8 yıllık periyotta 77 JMA istasyonundaki yer hareketi kayıtlarına dayalı olarak Japonya için önerilebilecek, bir zemin büyütme faktörü tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemde, istasyonların jeolojik ve geomorfolojik şartları ile kayıtlara dayalı azalım ilişkilerinin kullanımıyla belirlenen büyütme oranlarının karşılaştırılması sonucu, pik ivme (PGA), pik hız (PGV) ve JMA şiddeti için büyütme oranları tahmin edilebilmektedir.

Farklı geoteknik şartların etkisinin incelendiği bir diğer çalışma [33], 15 Haziran 1999 depremi sırasında, Puebla (Meksika) şehrindeki üç istasyondan alınan yer hareketi kayıtlarını kullanmaktadır. Sonuçlar, maksimum düşey ve yatay ivmeler arasındaki oranın 0.2 ile 0.5 arasında değiştiğini göstermektedir.

Diğer taraftan depremlerde geniş bir aralıkta değişen yükleme şartları altında, zeminin gerçek davranışına ait bilgi edinmek üzere üç boyutlu ivme-ölçerler

kullanılmaktadır. Bu kayıtların kullanımı aynı zamanda deneysel ve analitik yöntemlerin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Lotung (Tayvan) ve Treasur Island (Kaliforniya) bölgelerindeki çalışmalar [34], üç boyutlu ivme kayıtlarının gerilme-deformasyon davranışının değerlendirilmesi ve kullanılan sayısal modelin kalibrasyonunda doğrudan bir kaynak olarak önerilebileceğini göstermektedir.

Yerel zemin koşullarının etkisinin belirlenmesinde, zayıf yer hareketi ve mikrotremor kayıtlarının kullanımına dayalı çalışmalar ise uygulama kolaylığı ve ekonomik nedenlerle tercih edilmektedir. Bu çalışmalara göre genel olarak, küçük genlikli dalgalardan belirlenen zemin büyütme faktörlerinin ve transfer fonksiyonu gösterimlerinin, zeminin lineer davranış göstereceği küçük ve uzak depremler için faydalı olabileceği düşünülmektedir. Zemin büyütme faktörünün deprem sonrası zayıf yer hareketi kayıtlarına dayalı olarak incelendiği 3 farklı çalışmanın, kuvvetli yer hareketi kayıtlarını kullanan bir diğer çalışma ve 1994 Northridge depremi hasar dağılımı ile karşılaştırıldığı değerlendirme sonuçlarının bu düşüncüyü desteklediği görülmektedir. Yakın odak bölgesinde, pik hız değerinin 15 cm/s den büyük olması durumunda, zeminin lineer olmayan davranışının küçük genlikli dalga hareketinden elde edilen büyütme faktörünü değiştirmeye başladığı gözlenmektedir. Deprem sonrası zayıf yer hareketlerinin çoğunda bulunmayan 0.2-2 Hz aralığındaki frekans bileşenlerinin, hasar yapıcı yer hareketine neden olduğu ve bu zayıf yer hareketi kayıtlarına dayalı çalışmaların, zeminin lineer davrandığı bölgelerde yüksek frekanslı zemin büyütmesinin haritalanmasında faydalı olabileceği vurgulanmaktadır [35].

Mikrotremorların genlikleri 0.01-0.001 mm ve periyotları 0.01-20 sn arasında değişmektedir ve genellikle periyot özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Uzun periyotlu (1 sn den büyük) mikrotremorlar deniz dalgaları gibi doğal kaynaklardan yayılan mikrosismik olaylar olarak, kısa periyotlu (1 sn den küçük) mikrotremorlar ise trafik, endüstriyel gürültü gibi insan aktivitesinden kaynaklanan titreşimler olarak tanımlanmaktadır. Ancak mikrotremorların yayılma hareketinde baskın dalgaların türü konusunda araştırmacılar arasında fikir birliği bulunmamaktadır [36]. Analiz yöntemleri içinde en popüler olanları yer hareketi kayıtlarının analizinde de olduğu gibi referans [37] ve tek istasyon (Nakamura Yöntemi) [38] yöntemleridir.

Mikrotremor çalışmalarının çoğu, Fourier spektral oranları ile, yüzeydeki sedimentlerin temel rezonans frekansının belirlenebileceği, zemin büyütmesinin ise bazı odak uzaklığı mesafeleri (davranışın lineer olduğu) için geçerli olabileceği, ancak diğer zemin büyütmesi parametreleri ile karşılaştırılarak doğrulanması gerektiği, genel görüşünde birleşmektedirler. Bir çok araştırmacı, elastik yarı sonsuz ortam üzerinde yatay olarak tek bir yumuşak zemin tabakasının bulunması durumunda, 0.3-5 Hz aralığındaki zeminlerin temel rezonans frekanslarının Nakamura yöntemi ile güvenilir bir şekilde tahmin edilebileceği konusunda hemfikirdir [39].

Mikrotremor ölçümlerinin analizindeki H/V spektral oran yönteminin güvenilirliğini sayısal ve deneysel olarak inceleyen bir çalışma [40], yöntemin geçerliliğini, yüzeydeki ve derindeki zemin tabakaları arasında rijitlik kontrastının olması şartına bağlamaktadır

Mikrotremor kayıtlarının kullanıldığı bir diğer çalışma 1995 depremi sonrası Dinar bölgesinde yapılmıştır [41]. Çalışmada, Referans ve Nakamura yöntemine dayalı analizler sonucunda zemin hakim periyotları ve zemin büyütme katsayıları hesaplanmıştır. Mikrotremor ölçümlerinden bulunan büyütme değerlerinin, arazideki penetrasyon deney sonuçlarına dayalı kayma dalgası hızından elde edilenlerle ve gözlenen yapısal hasar ile uyumlu oluşu, bu tür ölçümlerin zemin davranış özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir

Deprem tehlikesinin yüksek olduğu Lisbon bölgesindeki çalışmada [42], mikrotremor ölçümleri alüvyon tabakalarının sismik davranışını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Nakamura tekniğine dayalı olarak hesaplanan spektral oranlar, alüvyon tabakasının kalınlığı, patlama kayıtları ve Aki-Larner tekniği ile elde edilen 1 ve 2 boyutlu modellerin sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Çalışmada, amplifikasyon faktöründeki değişikliklere rağmen, mikrobölgeleme amacıyla, mikrotremor kayıtlarının kullanılmasının, ince alüvyon tabakalarının rezonans frekansının tahmininde faydalı olabileceği belirtilmektedir.

Japonya-Chiba' daki çalışmada [43], mikrotremor ölçümlerine ait spektral karakteristikler, yer hareketi kayıtlarıninkilerle karşılaştırılmaktadır. 300 m\*300 m lik bir alana, 1982 de kurulan üç boyutlu sismometre donanımından elde edilen yer hareketi kayıtlarının kullanıldığı çalışmada, zemin büyütmesi pik ivme ve transfer fonksiyonları cinsinden incelenmektedir. Mikrotremor ölçümleri de aynı düzende 11 noktada yapılmıştır. Yer hareketi kayıtlarına ait 11 power spektra, mikrotremor ölçümlerine ait olanlarla oldukça uyumlu olup, aynı frekans içeriklerinde benzer yerel zemin etkileri gözlenmektedir.

Farklı bir çalışmada [44], mikrotremor H/V spektral oranları, Yokohama şehri (Japonya) yer hareketi kayıtlarının referans istasyon yöntemi (RMS) oranları ile birlikte kullanılarak, zemin davranışlarının belirlenmesindeki güvenilirliği araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan teknik, mikrotremor ve yer hareketi spektral analizlerinin birleştirilmesine dayanmaktadır. Elde edilen spektral parametreler, bölgedeki çok değişken jeolojik şartlarla karşılaştırılmaktadır. H/V oranlarına dayalı hakim periyot tahminleri, bölgenin % 80'i için RMS hakim periyotları ile uyumlu bulunmuştur. Ancak, H/V oranlarına göre büyütme faktörünün 2 den küçük ve hakim periyotun 0.5 sn den büyük olduğu durumlarda uyumun zayıf olduğu gözlenmektedir.

İspanya'da Zafarraya yakınındaki sediment havzası boyunca iki ayrı profilde ölçülen mikrotremor kayıtlarında, havzanın derinliğinden bağımsız olarak pik değerler 2.8 Hz dolaylarında gözlenmektedir. Diğer taraftan, ana kaya yüzeyinde ölçülen spektranın düz olması sonucu, bu durumun açıklanabilmesi amacıyla farklı nümerik modeller oluşturulmuştur. Mikrotremor ölçümlerinden elde edilen sonuçların, tabakalı bir boyutlu ve homojen iki boyutlu modellerle açıklanamayacağı ancak, yatay olarak tabakalı iki boyutlu modeller ile temsil edilebileceği düşünülmektedir [45].

Mikrotremor ölçümlerini kullanan ancak farklı bir araştırma yönteminde ise, Thessaloniki (Yunanistan) için, yüzey tabakalarının kayma dalgası hızları ile geometrisi belirlenmektedir. Dairesel bir düzende yerleştirilmiş istasyonlarda eş zamanlı olarak alınan ölçümlere dayanan bu yöntemin, yayınlanmış olan sınırlı

sayıdaki literatüre dayalı olarak, büyük inceleme derinliğine ulaşma avantajının olduğu belirtilmektedir [46].

### 2.3.2 Ampirik Yöntemler

Ampirik yöntemler, zemin sınıflandırmasına ve deprem şiddetine dayalı olarak büyütme faktörleri ile sismik yönetmelikler çerçevesinde ya da ön analizler için kullanılmaktadır. Örneğin, Midorikawa [47] tarafından zemin profilinin üst 30m si için eşdeğer kayma dalgası hızına dayalı olarak önerilen spektral büyütme bağıntısı, farklı yaklaşımların bir arada yorumlandığı mikrobölgeleme çalışmalarında kullanılmıştır [11, 48, 49].

Zemin sınıflandırmasında üst 30 m deki ortalama kayma dalgası hızının kullanımı, gelişmiş çoğu sismik yönetmeliklere adapte edilmiştir. Ancak bu parametrenin zemin sınıflandırmasında kullanılmasının yanıltıcı olabileceği ve örneğin sadece ana kaya derinliğinin relatif olarak sığ olduğu, yatay tabakalı zeminler için uygun bir parametre olabileceği görüşleri de mevcuttur [30].

NEHRP 2003 şartnamesinde [50] zemin sınıflandırması, üst 30 m deki ortalama kayma dalgası hızına dayanmaktadır. Zemin büyütme faktörleri ise, yerel zemin sınıfı ve beklenen yer hareketi şiddetinin bir fonksiyonu olarak, ana kayadaki düşük (0.2 sn) ve yüksek (1 sn) periyotlu spektral ivme değerleri için tanımlanmaktadır. Bu yaklaşım ile zemin tabakalarının lineer olmayan davranışı dikkate alınmaktadır.

Avrupa sismik yönetmeliğinde de (EC-8) [51] zemin grupları benzer şekilde üst 30 metredeki kayma dalgası hızlarına dayalı olarak sınıflandırılmaktadır. Spektral büyütme faktörleri zemin gruplarının fonksiyonu olarak Tip-1 ( $M_s > 5.5$ ) ve Tip-2 ( $M_s < 5.5$ ) olmak üzere deprem büyüklüğünü dikkate alan iki farklı durum için tanımlanmaktadır. Spektral büyütme faktörlerinin, zayıf ve kuvvetli yer hareketi durumunda zemin grubuna dayalı olarak değişmesi, zeminlerin lineer ve lineer olmayan davranışlarını yansıtmaktadır.

1998 Türkiye Deprem Yönetmeliğinde [52] ise bu iki faktörlü yaklaşımdan farklı olarak, spektral ivme değeri, yerel zemin sınıfı ve beklenen yer hareketi seviyesinin (etkin ivme) karşılıklı etkileşimine dayalı olarak değişmemektedir [9].

### 2.3.3 Yarı Ampirik Yöntemler

Green fonksiyonları sismolojide, jeolojik yapının küçük depremlerdeki sismik dalgaları nasıl etkilediğinin matematiksel gösterimi olarak tanımlanmaktadır. Jeolojik yapı genellikle çok iyi bilinemediğinden, bu fonksiyonlar doğru bir şekilde hesaplanamazlar. Analitik Green fonksiyonları ancak basit idealize edilmiş jeolojik yapılar için hesaplanabilir. Bununla birlikte küçük depremlerdeki gerçek yer hareketi kayıtları, analitik Green fonksiyonlarının yerine kullanılabilir. Bu fonksiyonlar ampirik Green fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır [53].

Kaynak geometrisi ile ilgili parametrelerin tanımlanmasını gerektiren yöntem, esas olarak deterministik bir yaklaşıma sahiptir. Yöntemin özellikle yakın odaklı yer hareketi kayıtlarının üretilmesinde faydalı olabileceği ancak, kuvvetli non-lineer davranış beklenebilecek yerel zemin şartlarında daha az doğru olduğu düşünülmektedir [30].

Örnek bir çalışmanın metodolojisi [53], birleştirilmiş sismik- geoteknik yaklaşıma dayanmaktadır. İncelenen bölge için belirlenen potansiyel bir depremin moment magnitüd değerine dayalı, deterministik bir yöntemdir. Potansiyel depremi üreten fayın kırılma senaryoları ve bu fayın ürettiği düşük magnitüdü yer hareketi kayıtlarını (ampirik Green fonksiyonları) kullanan sismolojik yaklaşım ile ana kaya için yer hareketi kayıtları üretilmiştir. Bu sismolojik yaklaşım, zemin tabakalarındaki yer hareketi kayıtlarının tahmin edilebilmesi amacıyla geoteknik lineer olmayan analiz ile birleştirilmektedir.

Tahran' daki bir diğer çalışmada [54], ampirik Green fonksiyonları, sismik mikrobölgeleme amacıyla senaryo depremlerinin geliştirilmesi aşamasında ana kayadaki yer hareketinin simülasyonunda kullanılmaktadır.

Avustralya' daki çalışma [55], Green fonksiyonları simülasyonu ile üretilen yakın odaklı sentetik kayıtların, sismik yönetmeliğindeki ampirik tasarım spektrumları ile güçlü korelasyona sahip olduğunu göstermektedir.

#### **2.3.4 Teorik Yöntemler**

Zemin davranış analizlerinde, genellikle taban kayası olarak nitelendirilen formasyondan yukarı doğru hareket ettiği varsayılan kayma dalgaları yayılımı analiz edilmektedir. Bu kavramı esas alarak geliştirilen bir boyutlu ve iki boyutlu analiz yöntemlerinde zemin tabakalarının lineer veya non-lineer davranışı dikkate alınabilmektedir [56].

Bir boyutlu analizlerde zemin kolonu yatay tabaka serisi olarak modellenmektedir. Lineer olmayan zemin davranışının belirlenmesinde yaygın biçimde kullanılmakta olan SHAKE programı, her bir alt tabakada oluşan eşdeğer üniform deformasyon ile uyumlu kayma modülü ve sönüm değerlerini elde etmek amacıyla iteratif prosedüre dayalı olarak eşdeğer lineer yaklaşım kullanmaktadır [6]. Zeminlerin homojen olmayan yapısının, yüzey ve yeraltı topoğrafyasının dikkate alınması gerekli durumlarda 2 ve 3 boyutlu sayısal analiz yöntemleri uygulanmalıdır. Zemin davranış analizlerinin uygulandığı çalışmalardan bir kaçısı aşağıda örneklenmektedir.

Avrupa' da 1993 yılında başlayan Euroseistest projesi, deprem mühendisliği ve mühendislik sismolojisindeki yerel zemin şartlarının etkisini de içeren farklı problemlerin incelendiği büyük ölçekli doğal bir laboratuvar olabilmeyi hedeflemiştir. Bu proje kapsamında, zemin davranışının değerlendirilmesinde ampirik ve teorik yaklaşım sonuçlarının tanımlandığı Volvi grabeni için uygulanan çalışma, aynı detaylı verinin kullanıldığı farklı bir çalışma ile karşılaştırılmaktadır. Çalışma, veri sentezindeki farklı kriterlerin ve ölçümlerin farklı analizinin, zemin davranış modellerinde değişikliğe neden olabileceğini ve sonuç olarak detaylı bir veri tabanı durumunda bile yorumlanan model sonuçlarının değişebileceğini vurgulamaktadır. 2 boyutlu model sonuçları, yüzey dalgalarının zemin davranışında önemli oranda etkili

olduğunu onaylamaktadır. Yüzey dalgalarının etkisini içeren gerçek davranışa rağmen, 1 boyutlu modeller ile gözlemler arasında uyumlu bir ilişki elde edilebilmesi ihtimalinin olduğu gösterilmektedir [57, 58].

İtalya'da, Garfagnana ve Lunigiana bölgesinde yer alan 60 belediye için, yerel zemin etkisinin değerlendirilmesi amacıyla 2000 yılında başlayan bir proje kapsamında, topografik ve stratigrafik büyütmenin belirlenmesinde, 1 ve 2 boyutlu sismik davranış analiz yöntemleri karşılaştırılmaktadır. SHAKE programı ile 1 boyutlu eşdeğer-lineer analiz, ONDA programı ile 1 boyutlu non-lineer analiz ve QUAD4M programı ile 2 boyutlu eşdeğer-lineer analizler yapılmıştır. Çalışmada, güçlü kayma dalgası hızı kontrastının bulunmadığı derin kesit durumunda, SHAKE analizinin sismik harekette azalmaya neden olduğu ve ONDA programı ile benzer sismik davranışın elde edilebilmesi amacıyla ana kayadaki kayma dalgası hızının arttırıldığı belirtilmektedir [59, 60].

1999 Atina depreminde ( $M_s=5.9$ ) ağır hasar gören iki kasabada gözlenen hasar dağılımları ile 1 ve 2 boyutlu sayısal analiz sonuçları arasındaki uyum, yer hareketi üzerinde zeminin ve topografyanın önemli rolü olduğuna dair güçlü bir kanıt oluşturmaktadır. Deprem sonrası güçlü yer hareketi kayıtlarına ait topografik transfer fonksiyonları da bu kanıtları desteklemektedir [61].

1999 Kocaeli depremi dış merkezinin 120 km batısında bulunan Avcılar (İstanbul) bölgesindeki zemin büyütmesi incelemeleri, jeolojik formasyonların farklı derinlikleri ile oluşturulmuş 8 temsili profil kombinasyonunu kullanmaktadır. SHAKE programı ile yapılan analizlerde, hakim frekans içeriğinin ve pik ivmenin ölçekleme ile değiştirildiği 1999 Kocaeli depremi İzmit kaydı kullanılmıştır. Analiz sonuçları büyütme faktörleri 2.5 ile 5 arasında değişen, 0.70, 1.00 ve 1.60 sn lere üç pik periyodun bulunduğunu göstermektedir. Bu durum 1999 Kocaeli depreminde, bölgede periyotları 0.70 ile 1.00 sn arasında değişebilen 5-8 katlı binalarda gözlenen göçme ve ağır hasar ile uyumlu görülmektedir. Avcılar' daki zemin büyütmesi, uzak kuvvetli yer hareketi nedeniyle ana kayadaki düşük ivme ile birlikte yumuşak zemin tabakalarının bir sonucu olarak açıklanmaktadır [62].



### 2.3.5 Hibrit Yöntemler

Deterministik yöntemler, zemin yüzeyindeki hareketi üretmek için sentetik ya da ampirik Green fonksiyonu ile kaynak fonksiyonunu birleştirirler. Kaynak özellikleri ile ilgili parametrelerden biri olan fay kırılmasındaki düzensizlikler, yüksek frekanslı yer hareketini belirlemektedir. Ancak toplam atım ve faylanma biçimi konusunda tahminlerin yapılması mümkün ise de kırılma özelliklerine bağlı hiçbir tahmin yapılamadığından, simülasyonlarda birçok farklı kırılma modellerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Dolayısıyla bu tür deterministik simülasyonlar, deprem mühendisliği açısından çok önemli olan 1 Hz' ten daha yüksek yer hareketlerini güvenilir bir şekilde tahmin edemezler. Bu amaçla stokastik kaynak modellerinin kullanılması veya yüksek frekans bileşenlerinin stokastik olarak ele alınması gerekmektedir. Hibrit yöntemler, geniş bantlı kuvvetli yer hareketi simülasyonları için, yer hareketinin düşük ve yüksek frekanslı kısımlarını ayrı ayrı ele alarak sonradan birleştiren bir yaklaşım kullanmaktadır [63].

Geniş bantlı sentetik yer hareketlerinin belirlenmesinde Hibrit yöntemler, jeolojik, jeofizik ve geoteknik verinin kullanımı ile birlikte kaynak ve yayılım yolu etkilerinin göz önüne alınmasına imkan vermektedir. Bu yöntemin, kuvvetli bir deprem olasılığı taşıyan ancak deprem aktivitesi düşük ve uygun geoteknik verisi olan bölgelerin sismik mikrobölgeleme çalışmaları için, bilimsel ve ekonomik açılardan uygun olduğu düşünülmektedir [64]. Hibrit yaklaşıma dayalı bir mikrobölgeleme yöntemi Santiago de Cuba havzası için uygulanmıştır [65]. Diğer bazı çalışmalar da mikrobölgeleme uygulamaları için önemli katkılar sağlamaktadır [66].

Yakın fay bölgesindeki önemli mühendislik yapıları için tasarıma esas kuvvetli yer hareketinin belirlenmesi amacıyla Erdik ve Durukal [67] tarafından geliştirilen prosedür, 1997 yılında İzmit' teki bir tesisin sismik tehlike analizi kapsamında uygulanmış ve 1999 Kocaeli depremi verileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar prosedürün, düşük frekans bileşenlerinde yeterli uyumun sağlandığını göstermektedir.

## 2.4 Mikrobölgeleme Metodolojileri

Mikrobölgeleme ve depreme dayanıklı tasarım çalışmalarında yerel zemin koşullarının etkisini dikkate alabilmek için farklı yaklaşımlardan yararlanılabilir. Bu aşamada sismik mikrobölgeleme çalışmaları için en önemli iki nokta, farklı disiplinlerden gelen sismik, jeolojik ve geoteknik verinin birleştirilmesi ve uygulamada kullanılabilir önerilerin belirlenmesidir [8].

Sismik mikrobölgeleme çalışmaları genel olarak üç aşamada düşünülmektedir. İlk aşamada bölgesel ölçekte sismik tehlike analizi ile deprem kaynağı ve yol etkilerini yansıtan yer hareketi özellikleri belirlenmektedir. İkinci aşamada, yüzey ve yeraltı topoğrafyası ile birlikte yerel zemin özelliklerinin etkisi, ilk aşamada belirlenen tasarım yer hareketi için araştırılmaktadır. Son aşama, mikrobölgelemenin hedefleri doğrultusunda seçilecek en uygun parametre cinsinden değişimin haritalanmasını kapsamaktadır.

Bu bölümdeki alt başlıkların ilki sismik tehlike analizidir. Sismik tehlike analizi, deterministik veya olasılıksal bir yaklaşıma dayalı olarak yapılabilir. Bu aşamada, olasılıksal yaklaşımda belirlenecek yer hareketi parametreleri için seçilecek dönüşüm periyotları ve bölgesel olarak uygun azalım ilişkilerinin seçilmesi, mikrobölgeleme için önemli iki noktayı oluşturmaktadır. Mikrobölgelemenin ikinci aşamasında, yerel zemin şartlarının yer hareketleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı yöntemlerden biri de ampirik yaklaşımlardır. Literatürde yer alan çok sayıda ampirik çalışma sonuçları tartışmalar ve genel uzman görüşler doğrultusunda şartnamelere de yansıtılmaktadır. Bu nedenle diğer bir alt bölüm, NEHRP şartnamesine ayrılmıştır. Üçüncü bölümde, literatürdeki projeler kapsamında uygulanan mikrobölgeleme yaklaşımları özetlenmektedir. Son bölümde, literatürdeki mikrobölgeleme çalışmalarının bazıları bu sefer, kullanılan parametrelere dayalı olarak sunulmaktadır.

### 2.4.1 Sismik Tehlike Analizleri

Deprem Mühendisliği pratiği, sismik tehlikenin tanımlanması ve azaltulmasını kapsamaktadır [16]. Sismik tehlike sabit bir zaman periyodunda belirli bir yer sarsıntısının görülme olasılığıdır. Sabit bir zaman periyodunda belirli bir hasarın gözlenme olasılığı ise sismik risk olarak tanımlanmaktadır. Sismik riskin rolü, olabilecek bir depremin tahmininde mevcut binalar için çok önemli olmakta ve bu bilgi öncelikleri belirlemede kullanılabilir. Diğer taraftan sismik tehlike değerlendirmesi, yeni yerleşim alanlarının planlanması ve yeni yapıların tasarımında önem kazanmaktadır. Bölgesel veya ulusal ölçekte sismik tehlikenin tam olarak tanımlanması ve azaltulması için tehlike haritaları ve senaryo çalışmalarında, sismotektonik bilgi eksikliğini göz önüne alınması, yer hareketi ve bina hassasiyetini yansıtan uygun tehlike parametrelerinin seçimi ve yerel zemin şartlarını yansıtan mikrobölgeleme çalışmaları zorunlu aşamalar olarak görülmektedir [68].

Sismik tehlikenin belirlenmesinde, deterministik ve olasılıksal olmak üzere iki farklı yaklaşım uygulanabilmektedir. Deterministik yaklaşımda zaman boyutundan bağımsız olarak bölgede meydana gelebilecek en büyük depremin yaratacağı yer hareketi düzeyi belirlenmektedir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi deterministik yöntemlerde aynı zamanda, stokastik kaynak modellerinin kullanımı veya yüksek frekans bileşenlerinin stokastik yaklaşım ile belirlenmesi gerekebilir. Olasılıksal yaklaşım ise hasar yapıcı yer hareketinin belli bir yerde ve belli bir zaman periyodu içerisinde meydana gelme ihtimalini araştırmaktadır [69].

Geleneksel sismik tehlike analizlerinde kaynak, manyitüd ya da makro sismik şiddet gibi tek bir parametreye, yol ise isotropik azalım kuralına dayalı olarak temsil edilmektedir. Ancak yer hareketleri, kaynak karakteristikleri, fay yönlenmesi, gerilme farkı, kırılma şekli, doğrultu etkisi, fay pürüzlülüğü ve kırılma yayılım hızına dayalı olarak özellikle yakın odaklı depremlerde önemli oranda değişim gösterebilir. Bu yüzden olasılıksal yaklaşımların, yer hareketi karakteristiklerini kontrol eden tüm bu faktörlerdeki değişkenliği göz önüne alması nedeniyle daha uygun olduğu düşünülebilmektedir. Genel olarak araştırılan bölge için değişik sismik kaynakların

varlığı durumunda olasılıksal yaklaşım uygun görülürken, bölgedeki tehlikeyi sadece tek bir kaynak düzenliyorsa deterministik yaklaşım tercih edilmektedir. Bununla birlikte tehlike haritaları için olasılıksal yaklaşım, senaryolar için ise deterministik yaklaşımlar uygun görülmektedir [68].

Yapı mühendisliğinde güvenlik açısından kritik ve karmaşık yapıların analizinde, geoteknik mühendisliğinde ise boşluk suyu basıncı oluşumunun zamana bağlı etkisinin göz önüne alınmasını gerektiren analizlerde, zamana bağlı ivme kayıtlarının kullanılması gereklidir ve bu durumda çoğunlukla deterministik yaklaşımlar uygun görülmektedir. Özellikle, aşılma olasılığı düşük ancak yüksek sismik tehlike seviyesine sahip bölgelerdeki kritik yapılar için deterministik yaklaşımlar tavsiye edilmektedir [70].

Deterministik ve olasılıksal yaklaşımların avantaj ve dezavantajlarının değerlendirildiği bir çalışmada [71], tekrarlı analizlerin (deterministik yorumların olasılıksal değerlendirmeyi başlatması veya tersi) birçok uygulama için çok faydalı olabileceği belirtilmektedir.

Bir diğer çalışmada [72], Fabriano (İtalya) mikrobölgelemesi için referans yer hareketinin belirlenmesinde, deterministik, olasılıksal ve stokastik yaklaşımlar karşılaştırılmakta ve her yaklaşımın diğerlerine göre avantaj ve dezavantajlara sahip olabildiği vurgulanmaktadır. Referans yer hareketinin, belirli bir dönüş periyodu için beklenen davranış spektrumundan doğrudan elde edilebildiği olasılıksal yaklaşımın, küçük periyotlu hareketler için yüksek ve büyük periyotlu hareketler için düşük tahminler ürettiği belirtilmektedir. Çalışmada, seçilecek yaklaşımın çalışmanın hedefleri, beklenen maksimum manyitüd ve zemin tipine bağlı olarak belirlenmesi önerilmektedir.

Aynı zamanda olasılıksal yaklaşımda belirlenecek yer hareketi parametreleri için seçilecek dönüşüm periyotları, mikrobölgeleme çalışmaları için önemli noktalardan birini oluşturmaktadır. Olasılıksal ve deterministik olarak hasar senaryolarının oluşturulduğu Basel (İsviçre) şehri için yapılmış bir çalışmada [73]; olasılıksal yaklaşım için 475 yıllık dönüş periyodunun, sismik aktivitesi yüksek

bölgeler için yeterli bir güvenlik seviyesi sağladığı ancak, orta dereceli sismik aktiviteye sahip bölgelerde, bin yılda bir oluşan hasar verici yüksek yer hareketi seviyelerini göstermediği vurgulanmaktadır.

Uygulanan yaklaşımdan bağımsız olarak sismik tehlike analizlerinin tümü, kuvvetli yer hareketi yayılımını ve değişimini tanımlayabilecek yer hareketi azalım ilişkilerinin kullanımını gerektirmektedir. Azalım ilişkileri, deprem büyüklüğü, uzaklık, kaynak mekanizması ve yerel zemin koşullarına bağlı olarak kuvvetli yer hareketinin farklı parametrelerinin medyan ve standart sapmalarını veren, log-normal dağılıma sahip olduğu kabul edilen ampirik bir tanımlamadır.

#### **2.4.2 NEHRP Şartnamesi**

Bir mikrobölgeleme metodolojisi olarak, deprem hasarları ve kuvvetli deprem kayıtlarının yerel zemin koşulları ile ilişkisinin istatistiksel olarak değerlendirildiği yaklaşımda, zemin sınıflandırma sistemleri ve bu sistemdeki zemin grupları için spektral davranış eğrileri önerilmektedir. Bu yaklaşım doğrultusundaki çalışmalar genel olarak şartnamelere yansıtılmaktadır.

Başlangıç versiyonu 1970 lerin sonunda ATC tarafından hazırlanmış olan NEHRP şartnamesinde, yerel zemin koşullarının etkisi, tartışılan çok sayıdaki ampirik ve analitik çalışma sonuçlarına dayalı olarak düzenlenmektedir. Dolayısıyla şartnamenin bu günkü koşulları, mikrobölgelemedeki gelişen yaklaşımları da yansıtmaktadır.

1994 NEHRP şartnamesi, zemin faktörünü de içine alan tasarım kontrol faktörleri ile mikrobölgelemeye dayalı tasarımda ilk adım olarak yorumlanabilir [74]. Amerikanın bina yönetmeliğindeki deprem tasarım şartnameleri, geniş bölgeleri kapsayan makrobölgelemeden, farklı tasarım gerekleri olan sismik bölgeler içeren mikrobölgelemeye doğru gelişim göstermiştir. Bugünkü şartnamelerde bölgeleme, uygulanabilecek yapısal sistemin, izin verilebilir yapı tipinin ve tasarımda

kullanılabilecek analitik prosedürün belirlenmesinde önemli bir faktör olarak görülmektedir [75].

1994 şartnamesi, yüksek ve düşük periyotlardaki yer hareketi büyütmesi üzerinde, anakaya rijitliği, yer hareketi şiddeti seviyesi, zemin tipi, rijitliği ve derinliğinin etkisini gösteren çalışmalar ile 1985 Mexico City ve 1989 Loma Prieta depremlerine ait deneyimleri kapsamaktadır [7]. 1989 Loma Prieta depremi kuvvetli yer hareketi kayıtları, depreme dayanıklı tasarım için yerel zeminlerin davranışının belirlenmesinde önemli bir veri seti sağlamıştır. Bu aşamada, araziye bağımlı davranış spektrumlarının tahmini için geliştirilen metodoloji, kayma dalgası hızına dayalı zemin sınıflandırma sistemini ve kayma dalgası hızı ile yer hareketi seviyesinin fonksiyonu olarak ampirik büyütme katsayılarını tanımlamaktadır [76].

Araştırma ve gözlem sonuçlarını yansıtan bu metodoloji ile yerel zemin şartları ve beklenen yer hareketi seviyesi arasındaki karşılıklı etkileşim göz önüne alınmaktadır. Zeminler genel olarak ana kayadaki yüksek periyotlu spektral ivmeyi, düşük periyotlu spektral ivmeye göre daha fazla büyütmektedir ve yüksek yer hareketi seviyeleri için ( $S_s > 1g$  ;  $S_1 > 0.4g$ ) düşük periyotlardaki büyüme veya azalma daha düşüktür. Bu durum, mevcut zemin tipleri için maksimum spektral büyütme değerinin sabit ( $SA=2.5$ ) olduğu, şartnamenin bir önceki versiyonunun temelini oluşturmaktadır. Aynı zamanda, özellikle düşük seviyedeki yer hareketine maruz yumuşak zeminlerde, düşük periyotlardaki pik ivmelerin birkaç kat büyütülebildiğine ait kanıtlar, normalize spektrum yaklaşımının yerine iki faktörlü yaklaşımın almasını gerektirmiştir. Bu yaklaşım doğrultusunda 2000 NEHRP Şartnamesi, ulusal haritalardan elde edilen olası maksimum spektral ivmeleri (düşük periyot değerleri için  $S_s$  ve 1 sn için  $S_1$ ), zemin katsayısı  $F_a$  ve  $F_v$  değerleri ile düzenlemektedir. Bu katsayılar zemin sınıfı ve maksimum spektral ivmenin ( $S_s$  ve  $S_1$ ) fonksiyonudur [7]. Tanımlanan zemin sınıflandırma sistemi ve arazi katsayıları, şartnamenin 2003 versiyonunda da değişmemiştir [50], ancak literatürde farklı görüşler ve yaklaşımlar doğrultusunda incelenmektedir.

Bir çalışmada [77], 1989 Loma Prieta depremi gözlemlerine dayalı zemin katsayıları, Doğu Amerika'daki yer hareketi karakteristiklerinin,

Kaliforniya'dakilerden oldukça farklı olduğu görüşü doğrultusunda yeniden değerlendirilmektedir. Olasılıksal yaklaşımın kullanıldığı çalışmada, Doğu Amerika'da olması muhtemel yer hareketi için üretilen yapay kayıtlar kullanılmaktadır. Yeniden hesaplanan zemin katsayıları, şartnamedekilerle karşılaştırıldığında, bazı zemin sınıflarında, artan spektral ivme değerlerine karşılık, şartnamedeki katsayılarda lineer olmayan bir davranış ile azalma, elde edilen yeni katsayılarda ise lineer bir davranış sonucu artış gözlenmektedir.

2000 NEHRP şartnamesinde yer alan ve Borchardt [76] tarafından geliştirilen, yer hareketi seviyesine bağımlı, düşük ve yüksek periyotlu büyütme faktörleri, üst 30 m deki ortalama kayma dalgası hızına dayanmaktadır. Bu sınıflandırmanın zemin derinliğini ihmal ediyor olmasının, yer hareketinin tahmin edilmesinde arzu edilmeyen bir belirsizlik seviyesi yaratabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda Borchardt [76] zemin büyütme faktörleri öncelikli olarak önemli oranda lineer olmayan zemin davranışının gözlemlendiği 1989 Loma Prieta depremi verilerine dayanmaktadır. Buna karşılık 1994 Northridge depreminde artan yer hareketi seviyesi ile zemin büyütme faktörlerinde bir azalmanın gözlenmemiş olması şartnamedeki mevcut zemin faktörlerinin güvensiz tarafta olabileceğini düşündürmektedir. NEHRP 2000 ve UBS 1997 şartnamelerindeki mevcut zemin sınıflandırma sistemi ve büyütme katsayılarıyla ilgili bu iki noktayı vurgulayan çalışma [24], zemin rijitliği ve derinliğine dayalı basitleştirilmiş yeni bir sınıflandırma sistemi ve spektral büyütme faktörleri önermektedir. Çalışmada 1989 Loma Prieta ve 1994 Northridge depremi yer hareketi verileri kullanılmış ve önerilen sistemin geçerliliğinin değerlendirilmesi amacıyla azalım ilişkilerindeki basit sınıflandırma sistemi ve kayma dalgası hızına dayalı yönetmeliklerdeki sınıflandırma sistemi ile performanslar karşılaştırılmaktadır. Aktif tektonik bölgelerdeki sığ yer kabuğu hareketi olarak tanımlanan yalnızca iki depreme ait veri setine dayalı çalışma sonuçlarının, yer hareketinin tahminindeki belirsizliği azalttığı belirtilmektedir.

Zemin yüzeyindeki yer hareketi, ana kayadaki yer hareketinin şiddeti, frekans içeriği ve zeminin doğal periyodunun bir fonksiyonudur. Ancak, yönetmeliklerdeki ve azalım ilişkilerindeki basit arazi davranış modelleri, zemin tabakalarındaki yer hareketinin tahmin edilmesinde, ana kayadaki yer hareketinin frekans içeriğini ihmal

etmektedir. Magnitüd ( $M_w$ ), ortalama periyot ( $T_m$ ) ve 1 sn periyotlu normalize spektral ivme ( $NS_{a1}=S_a/MHA$ ) gibi frekans içeriği göstergelerinin katılımıyla zeminler için yer hareketi tahminindeki belirsizliğin azalıp azalmayacağını değerlendirmek için analitik bir çalışma [78] yapılmıştır. Veri seti, değişen şiddet ve frekans içeriklerindeki 20 yer hareketinin girdi olarak kullanıldığı, 60 m derinliğindeki zemin tabakasının (başlangıç periyodu 1 sn) ProShake programı ile yapılan davranış analizlerine dayanmaktadır. Deprem kaynağı ve yol etkileri nedeniyle gerçek kayıtlar tercih edilmemiştir. Regresyon analizi sonuçları, frekans içeriği göstergelerinin dahil edildiği her u davranış modelinin de arazi davranış modellerinin tahminindeki standart hataları önemli oranda azalttığını göstermektedir. Ancak çalışmada geliştirilen ilişkinin tek bir zemin tabakasının eşdeğer-lineer analizine dayalı olması nedeniyle ortaya konan prosedürün geliştirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

#### **2.4.3 Literatürdeki Mikrobölgeleme Yöntemleri**

Literatürde çoğunluğu oluşturan mikrotremor ölçümlerine dayalı yöntemlerde, genellikle spektral oranlardan elde edilen parametreler, jeolojik yapı, zemin tabaka kalınlıkları, ampirik ve analitik transfer fonksiyonu sonuçları ile birlikte yorumlanmaktadır. Özellikle sismik aktivitesi düşük bölgelerde, mikrotremor ölçümleri geleneksel sayısal yaklaşımlarla birlikte değerlendirilmektedir. Ampirik-Deneysel yaklaşımlar olarak sınıflandırdığımız bu yöntemlerden farklı olarak diğer mikrobölgeleme metodolojileri ise, bölgesel sismik tehlike parametrelerine dayalı yaklaşımlardır.

#### **Bazı uygulamalar:**

Mexico şehrine ait 1987 bina yönetmeliğinde yer alan, ancak sınırlı sayıdaki mikrotremor ölçümlerine dayanan hakim periyot haritası, daha sonra 1985-1992 yılları arasında yapılmış tüm mikrotremor verileri ve yer hareketi kayıtları derlenerek yenilenmiştir. Mexico şehri için yerel zemin şartlarının etkisi, bir boyutlu, tek



tabakalı, lineer bir model ile analiz edilmiştir. Mikrotremor ölçümlerinden elde edilen hakim periyot değerlerinin, kuvvetli yer hareketi verilerine ait amprik transfer fonksiyonlarından elde edilenlerle mükemmel bir uyum içinde olduğu gösterilmektedir [79].

Batı Avusturalya, Perth bölgesi (derin sediment havzası) için daha önceki çalışmaların önerisi doğrultusunda, sismik amplifikasyon olasılığının değerlendirilmesi amacıyla, mikrotremor spektral oranlarının kullanıldığı bir mikrobölgeleme çalışması yapılmıştır. Uygulanan yöntemde yer hareketi spektral oranları, mikrotremor ölçümlerinin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Bu düşük deformasyon seviyesindeki titreşimlerin, kuvvetli yer hareketi için uygun bir yaklaşıklık sağlayabileceği görülmektedir. Eş zamanlı ölçümlerle hesaplanan spektral oranlar 6 frekans aralığı için (0.2, 0.5, 1, 2, 3, 5 Hz) farklı haritalar üzerinde gösterilmektedir. Haritalanan spektral oranlar ile bölgenin farklı jeolojik görünümüleri arasında oldukça güçlü korelasyonlar dikkati çekmekle birlikte, bu çalışmayla microtremor ölçüm ve analiz prosedürü detaylı bir şekilde gözden geçirilmektedir [80].

Kentsel bölgelerdeki sismik mikrobölgeleme çalışmalarında, yerel zemin şartlarının etkisinin ampirik değerlendirmesi için önerilen bir teknik, microtremor ölçümlerine dayanmakta ve birkaç prosedürün birleşiminden oluşmaktadır. İsrail'de iki bölge için uygulanan teknikte, mikrotremor kayıtları Nakamura ve Aki metodlarına göre değerlendirilmektedir. Aki yöntemi ile elde edilen zemin tabakalarının hız modeli için davranış analizleri SHAKE programı ile yapılmıştır. Ampirik spektral oranlar ile analitik transfer fonksiyonlarının karşılaştırıldığı çalışmada, makul bir uyumun elde edildiği belirtilmektedir [81].

Mexico şehrine bitişik olan Estado de Mexico bölgesi içinde 67 noktada mikrotremor ölçümleri yapılmış ve iki aylık geçici sismograf ağı kurulmuştur. Mexico şehri için var olan hakim periyot haritasının kuzeydeki bu bölgeye doğru genişletilmesi amacını taşıyan çalışmada, aynı zamanda maksimum relatif amplifikasyon haritası önerilmektedir. Her iki haritanın da yerel jeoloji ile uyum sağladığı gösterilmektedir [82].

Tunus şehrinin gürültü ölçümlerine dayalı mikrobölgelemede, H/V spektral oranları yöntemi ile rezonans frekansı ve büyütme parametreleri kullanılmış ve sonuçların geoteknik bölgeleme ile uyumlu olduğu gözlenmiştir [83].

Avustralya'daki büyük şehirlerin çoğunluğu normal yüklenmiş sediment birimler üzerinde yer aldığından, zemin büyütmesi ve rezonans yaratabilecek periyot değerleri için sismik mikrobölgeleme çalışmalarının gerekli olduğu düşünülmektedir. Uygulanan yöntem, kentsel bölgeler için pilot çalışma niteliğindeki Launceston, Tasmania örneği üzerinde açıklanmaktadır. 1884 den bu yana dış merkez uzaklığı 200 km' nin üzerindeki 5 depremde hasar görmüş olan bölgede, araştırmalara dayalı olarak hasarların nedeninin zemin büyütmesi olduğu belirtilmektedir. 53 tanesi sediment, 3 tanesi ise dolerit üzerinde alınan mikrotremor kayıtları, Nakamura yöntemine dayalı olarak yorumlanmıştır. Gravity araştırmaları ile iki derin vadi kesiti boyunca sediment kalınlıkları detaylı olarak belirlenmiştir. Dolerit üzerinde hesaplanan spektral oranlar büyütme davranışı sergilemez iken sediment zeminde yer alan 53 noktanın 46 tanesinde spektral oranların büyütme etkisi gösterdiği belirtilmektedir. Şehrin 1/10.000 ölçekli mikrobölgeleme haritası, az, orta ve çok katlı binalar için rezonansın oluşabileceği bölgeler cinsinden düzenlenmiştir. 1993 Avustralya standardındaki S zemin faktörü (zemin büyütmesi) ise 1/25.000 ölçekli olarak haritalanmıştır. Avustralya'nın tamamı için sismik mikrobölgeleme çalışmalarının hedeflendiği bu büyük proje kapsamında, kentsel ölçekteki diğer uygulamalarda, sediment kalınlığı ve Nakamura spektral oranlarına dayalı olarak aynı parametreler kullanılmaktadır [84].

Kuvarterner nehir taraçaları üzerinde hızla büyüyen ve genişleyen bir şehir olan Barquisimeto'nun (Venezuela) sismik mikrobölgeleme haritalarında zemin hakim periyodu ve zemin kalınlığı (ana kaya derinliği) parametreleri kullanılmaktadır. 500 m arayla 5 dakikalık mikrotremor kayıtlarının Nakamura yöntemine göre analizinden elde edilen zemin hakim periyotları, ortalama 5 s olmak üzere, 0.2 s ile 1.1 s arasında değişmektedir. Ana kaya (mika-şist) derinliğinin değişimi için 77 sondaj ve 11 sismik kırılma deneyi yapılmıştır. 32 sondajda ulaşılan ana kaya derinliği 5 m ile 15 m arasında değişmektedir. Sismik kırılma deney sonuçları, kayma dalgası hızları 400 m/s ile 650 m/s arasında değişen birinci

tabakanın ardından, ikinci tabakanın kayma dalgası hızlarının 700 m/s ile 1200 m/s arasında kaldığını göstermektedir. Elde edilen mikrobölgeleme haritalarında, zemin tabakasının kalınlığı ile zemin hakim periyodu değerlerinin uyumlu olduğu görülmektedir [85].

Doğal afet risk değerlendirmeleri ilk kez 1994 yılında yapılmış olan Chacao bölgesindeki (Karakas, Venezuela) çalışma, 1997’de başlayan Karakas için sismik risk değerlendirme çalışmalarının bir parçasını oluşturmaktadır. Karakas vadisinin fiziksel özelliklerini değerlendirmek amacıyla yeni jeofizik veriler, mevcut jeolojik ve jeofizik verilerle birlikte yorumlanmaktadır. 1967 Karakas depremi sırasında çok ağır hasarın meydana geldiği, Chacao yakınındaki Los Palos Grandes bölgesi, Karakas vadisindeki en büyük sediment kalınlığına sahip bölge olarak tanımlanmaktadır. Deprem sonrası yapılan çalışmalar, oluşan hasar ile zemin şartları arasında yakın ilişki olduğunu göstermiştir. Bu doğrultuda sismik mikrobölgeleme haritaları için yerel zemin şartlarının etkisini yansıtan parametrelerden biri sediment kalınlığı olarak görülmektedir. Karakas vadisinde 90’lı yılların sonuna doğru 500 m lik hücrelerde yapılan çeşitli mikrotremor ölçümlerine ait kayıtlar, Nakamura tekniği ile analiz edilmiştir. Hakim periyot değerlerine göre hazırlanan mikrobölgeleme haritasında, geçmiş çalışmalara dayalı sediment kalınlığının dağılımı da yer almaktadır. Karakas vadisinde 1 s nin üzerinde hakim periyot değerlerine sahip iki ayrı bölge elde edilmiştir. 2.1 s’lik hakim periyot değerlerinin gözlemlendiği Los Palos Grandes bölgesini de kapsayan Chacao bölgesinin bir bölümünde, sediment kalınlığının 300 m nin üzerinde olduğu ve genel olarak ölçülen periyot değerleri ile sediment kalınlığının uyumlu oldukları belirtilmektedir. Los Palos Grandes bölgesinde, 100 m lik hücrelerde gerçekleştirilen detaylı ölçüm sonuçları, sediment kalınlığı ile birlikte hakim periyot ve zemin büyütmesi cinsinden haritalanmıştır. Karakas vadisindeki sediment kalınlığına ait bilgilerin kaynağını yeraltı su seviyesi araştırmaları kapsamındaki jeofizik ve sondaj programları (1950) ile 1967 Karakas depreminin etkisini araştıran sismik kırılma çalışmaları oluşturmaktadır. Orijinal verilerin haritalanmamış olmasından kaynaklanan problemleri gidermek amacıyla sediment kalınlığının dağılımı, yeni değerlendirmelerle tekrar oluşturulmuştur. Los Palos Grandes bölgesinde, 200 den fazla gravimetrik ölçüme dayalı olarak sediment kalınlığı isometrik haritası hazırlanmıştır. Çalışılan bölgede sediment kalınlığı ve

ana kaya profili verilerini desteklemek amaçlı, Temmuz 2001 tarihli sismik kırılma ölçümlerinin ilk analiz sonuçları da önceki çalışma sonuçlarını doğrular nitelikte görülmektedir [86].

San Fernando Vadisi (Los Angeles) için farklı yazarlara ait mikrobölgeleme uygulamalarını içeren çalışma, bölgedeki mikrotremor ve mikrosismik ölçümlerine dayalı haritaların, 1994 Northridge, CA depremindeki hasar ve yer hareketi büyüklüğü dağılımı ile karşılaştırılması konusunda yoğunlaşmaktadır. Bölgede büyük hasara neden olan San Fernando vadisinin hemen altında, orta büyüklükteki 1994 Northridge depremi sırasında ( $M_L=6.4$ ,  $h=18$  km), 200 den fazla istasyonda kaydedilen yer hareketlerinin bir kısmı yakın odaklı kayıtları oluşturmaktadır. Mikrobölgeleme çalışmalarından ilki, 3 km arayla 50 nokta ve bir referans noktasında ölçülen 3-5 saniyelik mikrosismik kayıtlarına dayanmaktadır. Her bir kaydın Fourier spektrumu referans noktasındaki spektrum ile oranlandıktan sonra 3-5 saniye periyot değerleri için ortalama spektral oranlar (MSN) hesaplanmıştır. Elde edilen harita, vadideki sediment tabakalarının büyütme etkisinin ampirik tahmini olarak göz önüne alınabilmektedir. İkinci çalışma aynı şekilde 2 km arayla 74 hücrede ve bir referans noktasında olmak üzere, yüksek periyotlu (0.1-2 Hz) mikrosismik kayıtlarına dayanmaktadır. Bu çalışmada iki spektral oran hesaplanmıştır;  $K_{SR}(f)$  sediment tabakalar için yatay hareket Fourier spektrumunun referans ana kaya noktasındaki oranı ve  $N(f)$  aynı nokta için yatay hareket Fourier spektrumunun düşey hareketinkine oranıdır. Sonuçlar, 4-10 saniye arasındaki periyotlar için  $K_{SR}$  ve  $N$  spektral oranlarını gösteren konturlar cinsinden sunulmaktadır. Bu çalışma kapsamındaki haritalarda, incelenen parametreler Northridge depremine ait hasarı ve yer hareketini gösteren farklı parametrelerle birlikte gösterilmektedir. Kullanılan parametrelerden biri, 24 istasyondan alınan kuvvetli yer hareketi kayıtlarına dayalı olarak  $T=4.4$  s ve  $T=7.5$  s lik periyotlar için hesaplanan yatay hareket spektral hız ( $\log_{10}PSV$ ) değerleridir. Çalışma alanını gri ve beyaz olmak üzere iki bölgeye ayıran diğer bir parametre yazarlara ait önceki bir çalışma sonucuna dayanmaktadır [87]. Sözü geçen çalışma 1994 Northridge depremi sırasında gözlenen ağır hasarlı (red-target) binaların yer aldığı alanlar ile büyük zemin deformasyonlarının bulunduğu bölgeler (su dağıtım sistemlerindeki rapor edilen kırılmalara dayalı olarak belirlenmiş olan) arasındaki ilişkiyi analiz

etmektedir. Analiz sonuçları, maksimum hızın 100–150 cm/s yi aştığı tahmin edilen küçük bir bölge dışında, ağır hasarlı binaların yoğunlaştığı bölgeler (gri bölgeler) ile su borularının kırıldığı bölgelerde (beyaz bölgeler) çakışma olmadığını göstermektedir. Gri bölgeler (red-targed building) sismik dalgaların yüzeye lineer olarak ulaştığı ve bu nedenle yapıların ağır hasara uğradığı bölgeler, beyaz bölgeler ise zeminin lineer olmayan davranışı nedeniyle su borularında kırılmaya neden olan zemin deformasyonlarının yoğunlaştığı alanlar olarak yorumlanmaktadır. Bu sonuçlara dayalı olarak lineer olmayan zemin davranışının hasar seviyesini azaltabileceği göz önüne alınarak geliştirilen Modifiye Mercalli şiddet parametresi kullanılmaktadır. Haritalanan diğer bir parametre, kuvvetli yer hareketi kayıtlarından hesaplanan maksimum hız değeridir. Bu çalışmanın amacını oluşturan, yüksek periyotlu (3-10s) mikrosismik ölçümlerine dayalı MSR,  $K_{SR}$  ve N (spektral büyütme) konturlarının, Northridge depremindeki yakın odaklı kuvvetli yer hareketine ait belirlenen parametrelerle karşılaştırma sonuçları, aralarında bir korelasyon olmadığını göstermektedir. Haritalanan parametrelerin büyüklüğü, frekans içeriği ve anlamı ile yakın odak etkisini taşıyan kayıtlar arasındaki bilinen farklılıklar nedeniyle, bu sonuçların sürpriz olmadığı düşünülmektedir [35].

Romanya'nın başkenti Bükreş, alt-kabuk (60-170 km) Vrancea depremlerinin etki alanı içerisinde kalan alüvyonel bir düzlükte yer almaktadır. Mikrobölgeleme çalışmalarının gerekliliği, şehri tehdit eden 3 önemli depremin en büyüğü olan 4 Mart 1977 Romanya depremi mühendislik raporunda vurgulanmaktadır. Depremde, 105 km dış merkez uzaklığına sahip Bükreş' deki yumuşak zemin şartlarında, pik ivme 0.21 g, pik hız 70 cm/s olarak kaydedilmiştir. Çalışma 1977 ( $M_w=7.5$ ,  $h=109$ km) depremi ile birlikte 1986 ( $M_w=7.2$ ,  $h=133$ km) ve 1990 ( $M_w=7.0$ ,  $h=91$ km) depremlerine ait toplam 24 yer hareketi kaydına dayanmaktadır. Bükreş yer hareketi kayıtları frekans içeriği, davranış spektrumu kontrol periyodu ( $T_c=2\pi EPV/EPA$ ) ile tanımlanmaktadır. Kayıtların frekans içeriklerindeki değişim, istasyon yakınlarındaki zemin tabaka özellikleri (70 ile 170 m arasında değişen derinliklerde) ile birlikte yorumlanmaktadır. İlk aşamada hazırlanan zemin özelliklerine ve yeraltı su seviyesi derinliğine dayalı mikrobölgeleme haritalarının, sismik istasyonların sayısına ve dağılımına çok fazla bağlı olduğu vurgulanmaktadır. Oluşturulan jeolojik kesitlerde özellikle % 80 i kil olan 4. tabakanın kalınlığı ve bu tabakanın yüzeye

yakın olduğu bölgeler ile geçmiş depremlerde gözlenen hasar arasında bir bağıntı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu tabakanın maksimum derinliğe ulaştığı bölgelerde büyük periyot değerleri elde edilmiştir. Bu doğrultuda 4. tabakanın kalınlığı, mikrobölgeleme haritalarındaki parametrelerden biri olarak belirlenmiştir. Etkif pik ivme ve davranış spektrumu kontrol periyodu ( $T_C$ ) haritalanan diğer yer hareketi parametrelerini oluşturmaktadır. Davranış spektrumu kontrol periyoduna dayalı haritalarda şehir, kabaca iki bölgeye ayrılmaktadır:  $T_C=1.0-1.6$  s periyotlu yumuşak zeminlerin ve  $T_C=0.3-1.0$  s periyotlu zeminlerin yer aldığı bu iki bölgeyi ayıran dikey çizginin, şehrin kuzeybatı-güneydoğu istikametinde uzanan nehirlerle neredeyse paralel olduğu belirtilmektedir [88].

Eski İstanbul ve Erzincan şehir bölgelerinde, farklı özelliklere sahip depremlerde, zemin tabakalarının büyütme özelliklerinin değişimi incelenmiş ve bu değişim dikkate alınarak mikrobölgelemeler yapılmıştır. Eski İstanbul'da çeşitli bölgeler için seçilen temsili zemin profillerindeki yeşil kil ve marn tabakalarının plastisitesinin  $I_p=30-100$  arasında değişebildiği bilinmektedir. Plastisite indisindeki olası bu değişimle birlikte, sondaj bilgilerine dayalı olarak belirlenen kayma dalgası hız profilleri ve İstanbul için üretilmiş bir ivme kaydının max değerindeki belirsizliğe dayalı olası farklılıkları göz önüne alan 5 farklı durum için davranış analizleri yapılmıştır. Bu şekilde, herhangi bir büyüklükteki depremde, çeşitli frekanslarda, amplifikasyonların hangi değerleri aşmasının mümkün olmadığı, çeşitli profiller için görülebilir hale gelmiştir. Bölgeler çeşitli frekans aralıkları için ortalama amplifikasyon faktörlerine ve zemin hakim periyotlarına göre oluşturulmuştur. 1894 depreminde meydana gelen hasarların, yüksek plastisiteli ve aşırı konsolide olmuş, kalın, yeşil kil ve marn tabakalarının bulunduğu bölgelerde yoğunlaştığı gözlenmiştir. Analiz sonuçları bu tabakaların, kuvvetli depremlerde dahi önemli bir büyütme potansiyeline sahip olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, hasar kayıtlarının vadiler yerine tepelerde bulunması nedeniyle, topografik ve geometrik faktörlerin uygun şekilde temsil edilmesine imkan veren analiz yöntemlerinin kullanılması gereği belirtilmektedir. Erzincan şehir bölgesinde ise 1992 depremi hasarlarının önemli derecede deprem özellikleri ve yapısal kusurlar etkisinde kaldığı ancak bu etkilerin sistemli şekilde azaltılması sonucu yerel zemin şartlarının

büyütme özellikleri ile deprem hasarları arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılabildiği belirtilmektedir [89].

İtalya merkezinde (Umbria ve Marche bölgeleri), 26 Eylül 1997 depreminin son 20 yıl içindeki en büyük sismik olaylardan biri olarak önemli hasara sebep olması ve odaktan uzak mesafelerde zemin büyütmesi kayıtlarının elde edilmesi doğrultusunda düzenlenen çalışma bir sismik mikrobölgeleme prosedürü sunmaktadır. Sayısal analizler için bir boyutlu SHAKE ve iki boyutlu QUAD4 ile BESOİL programları kullanılmıştır. Sismik büyütmenin temsil edilmesi için yapısal hasar ile diğer yer hareketi parametrelerine nazaran daha ilgili olan spektral şiddet parametresi (SI) seçilmiştir. Spektral şiddet bölgedeki çoğu yapının temel periyot aralığına karşılık gelen 0.1-0.5 saniye arasında hesaplanmıştır. 3 sismik büyütme katsayısı,  $F_a=SI(\text{çıktı})/SI(\text{girdi})$ ,  $F_b=SI(\text{girdi})/SI(\text{yönetmelik})$  ve  $A=F_a.F_b$  formülleriyle hesaplanmıştır. Büyük alanların arazi kullanımının planlanması amacıyla yapılan çalışmalar için uygun bir prosedür olarak görülmektedir [90].

Barselona (İspanya) şehri için zemin davranışı haritaları, Avrupa projesi SERGISAI kapsamında geliştirilen sismik risk değerlendirmesi için bilgisayar programının yerel ölçekteki uygulama sonuçlarını oluşturmaktadır. GIS ve AI (Artificial Intelligence) tekniklerini ve standart yönetmelikleri içeren sismik risk değerlendirme programı, 1 boyutlu zemin davranışı analizlerine dayanmaktadır. Program, bölgesel, alt bölge ve yerel olmak üzere üç farklı ölçekte çalışma imkanı sağlamaktadır. İki nehir arasındaki sediment düzlükte kurulmuş olan şehir, orta dereceli sismik aktivite bölgesinde bulunmasına karşılık, geçmişte düşük frekanstaki hasar verici depremlere ait kanıtlar bulunmaktadır. İlk aşamada, yerel jeoloji (yaş ve litoloji), zemin tabakalanması ve zeminlerin geoteknik özellikleri derlenerek, GIS de 3 boyutlu geoteknik model oluşturulmaktadır. Geoteknik model ana kaya derinliğinin ve kuvarterner tabakalarının değişimini haritalamaktadır. Zeminlerin kayma dalgası hızı ve yoğunluğu mevcut sondajlardan derlenmiştir. İkinci adım, ana kaya seviyesindeki yer hareketinin belirlenmesi için sismik tehlike analizi ve bölgesel azalım ilişkilerinin kullanılmasıdır. Bu aşamada uygun yer hareketi verilerinin eksikliği nedeniyle ampirik green fonksiyonu yöntemi ile referans yer hareketi geliştirilmiştir. Belirlenen yer hareketi geoteknik modelin ana kaya

seviyesinde uygulanarak, bir boyutlu lineer eşdeğer yöntem, SHAKE 91 ile zemin davranış analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına dayalı olarak şehrin mikrobölgeleme haritaları zemin hakim periyodu ve maksimum büyütme oranı parametrelerine göre düzenlenmiştir. Maksimum büyütme oranları impedans oranlarını yansıtırken, zemin hakim periyodu haritası, kuvarterner zeminler için varsayılan kalınlık modeli ile uyum sağlamaktadır. Son aşamada, bu çalışmadan elde edilen zemin hakim periyodu değerleri, önceki çalışmalarda mikrotremor ölçümlerine dayalı olarak elde edilen ampirik değerlerle, jeolojik birimler ve geoteknik özellikler de göz önüne alınarak detaylı bir şekilde karşılaştırılmaktadır [39].

İstanbul, Bağcılar ilçesi için yapılan mikrobölgeleme çalışmasının ilk aşamasını, bölgenin depremselliğinin olasılıksal yöntemlerle belirlenmesi ve ana kaya seviyesindeki tasarım depremi özelliklerinin bulunması oluşturmaktadır. İkinci aşamada, 1 boyutlu sayısal analiz ile bulunan bölgeye ait yüzeydeki yer hareketi karakteristikleri farklı parametrelere dayalı olarak haritalanmaktadır. Bu parametreler, "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik" uyarınca yerel zemin sınıfları, sismik deneylere ve SPT-N sayılarına dayalı olarak belirlenen eşdeğer kayma dalgası hızı, en büyük ivmenin % 70 ine karşılık geldiği varsayılan etkin ivme değeri, sayısal analizlerden elde edilen spektral büyütme katsayısı, mikrotremor kayıtlarından hesaplanan, zemin hakim periyodu ve spektral büyütme katsayısıdır. Hazırlanan haritalar 1999 Kocaeli depremi nedeniyle bölgede oluşmuş hasar dağılımları ile karşılaştırılmaktadır. Haritalarda kullanılmış olan tüm parametreler mikrobölgeleme çalışmalarında etkin olmakla birlikte, ana amacın yapısal hasarı en aza indirmek olması nedeniyle, bölgeleme kriterleri deprem kuvvetlerine karşı yapı tasarımında kullanılan spektral ivme ve zemin hakim periyodu olarak tercih edilmektedir. Sonuç olarak düzenlenen haritalar, her iki parametreye ait dağılımın birleştirilmesine dayanmaktadır [9].

Dinar depreminden sonra meydana gelen hasarın, yerel zemin koşulları ile ilişkisini inceleyen çalışma, coğrafi bilgi sistemleri ile zemin büyütmelerine göre mikrobölgeleme yöntemleri ve bunların geçerliliğini araştırmaktadır. Yerel zemin şartlarının belirlenmesi için yürütülen arazi çalışmaları; sondajlar, standart



penetrasyon deneyleri, koni penetrasyon deneyleri, PS logging ve mikrotremor ölçümlerini kapsamaktadır. Zeminlerin dinamik davranış analizleri için SHAKE programının kullanıldığı çalışmada, 1 Ekim 1995 Dinar depremi ana kaydı kullanılmıştır. Deneysel ve analitik çalışmalar arasındaki korelasyon ilişkileri ile bu çalışmalardan elde edilen büyütme parametreleri ve derlenen detaylı hasar verisine dayalı olarak belirlenen sismik bölgeleme çalışmaları arasındaki ilişkiler incelenmektedir [91].

1997 yılındaki ilk mikrobölgeleme çalışması sonuçlarına göre, Santa Fe De Bogota-Colombia şehri için, ana kaya seviyesinde 475 yıllık dönüş periyoduna karşılık maksimum yatay ivme değeri 0.20 g olarak elde edilmiştir. Zemin tipleri ile birlikte 1 ve 2 boyutlu analiz sonuçlarına göre şehir, tipik tasarım ivme spektrumlarına dayalı olarak 6 farklı bölgeye ayrılmaktadır. Bu mikrobölgeleme haritası, sismik bina yönetmelikleri ve şehrin planlama gelişimi için bir temel oluşturmakla birlikte sonuçların ampirik deprem verileri ile desteklenmemiş olması bir eksiklik olarak görülmektedir. Bu doğrultuda 1999 yılında kurulan ağda, 32 ivmeölçer ilk mikrobölgeleme haritasını göz önüne alan bir dağılımda yerleştirilmiştir. 3 ivmeölçerde hem yüzeyde hem de derinde (115m, 126m, 184m) kayıt alınabilmektedir. Haziran 1999 tarihinden itibaren kaydedilen 15 sismik olay ( $4.4 < M_L < 6.5$  ve dışmerkez uzaklıkları 55 km ile 510 km arasında değişen)  $10 \text{ cm/s}^2$  lik küçük ivmelerle zayıf yer hareketi niteliğini taşımaktadır. Bu kayıtlar ile birlikte her istasyonun yakınında ölçülen mikrotremor kayıtlarına dayanan çalışmada, SH dalgasına ait %5 sönümlü ivme spektrumları hesaplanmış ve normalize edilen spektrumların gruplanması sonucu 6 ayrı bölge elde edilmiştir. Elde edilen spektrumların ilk mikrobölgeleme çalışmasında önerilen tipik tasarım ivme spektrumları ile karşılaştırılması sonucu bazı bölgelerde, spektral büyüklük ve spektral şekiller açısından önemli farklılıkların bulunduğu belirtilmektedir. Düşey ölçümlerin yapıldığı üç noktada, ana kaya kaydı, modellenen zemin profili için Shake 91 programı ile yüzeye taşınmış ve hesaplanan elastik tasarım ivme spektrumları yüzeydeki kaydın ivme spektrumları ile karşılaştırılmıştır. Bu modellenen ve kaydedilen spektrumlarda hakim periyotlar benzerlik göstermekle birlikte, 0.8 s'nin altındaki periyotlar için, modellenen zemin büyütmesinin daha düşük olduğu belirtilmektedir. Mikrobölgeleme haritaları, mikrotremor kayıtlarının

Nakamura yöntemine göre analizinden bulunan hakim periyot değerleri ve yer hareketi kayıtlarına ait spektrumlardan elde edilen hakim periyot değerlerine dayalı olarak oluşturulmuştur. Zayıf yer hareketi ve mikrotremor kayıtlarından elde edilen hakim periyot değerlerinin, birbirleriyle ve ilk mikrobölgeleme haritasındaki zemin tipleri ile güçlü bir korelasyon gösterdiği belirtilmektedir. Çalışma, çoğunlukla lineer zemin davranışına neden olan zayıf yer hareketi kayıtlarının kullanılması nedeniyle yeni analizlerin gerekliliğini vurgulamaktadır [92].

Büyük bir kısmı sediment havzada yer alan Bursa şehri civarı için olası yer hareketini belirlemek amacıyla yapılan çalışma, farklı jeolojik birimlerden kaynaklanan zemin büyütmesi kadar zemin tipi ve derinliği etkisini de içeren stokastik bir model kullanmaktadır. Jeolojik tabakalanma, sismik kırılma deney sonuçları ve sondaj verilerinden faydalanılarak kayma dalgası hızı, derinliğin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Hipotetik bir depreme dayalı tehlike haritaları, 0.02 ile 4 saniye aralığındaki 10 periyot değeri için %5 sönümlü spektral ivmeler cinsinden sunulmaktadır [93].

Stokastik yer hareketi modellemesine dayalı geliştirilen bir simülasyon yöntemi ile üç Orta Amerika şehri için, yapıların performanslarının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere yer hareketleri üretilmiştir. Yapay yer hareketi kayıtlarına dayalı olarak elde edilen eş tehlike davranış spektrumlarının FEMA 273 deki spektrumlarla uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ancak bu çalışma gibi büyük ölçekli simülasyonlarda kullanılmak üzere lineer olmayan zemin davranışını modelleyen etkili yöntemlerin gerekliliği belirtilmektedir [94].

#### **2.4.4 Mikrobölgelemede Kullanılan Yer Hareketi Parametreleri**

Yer hareketinin en önemli karakteristikleri olan genliği, frekans içeriği ve süresi çeşitli yer hareketi parametreleri ile tanımlanabilir. Bu parametrelerin bir kısmı yer hareketine ait tek bir özelliği tanımlarken bir kısmı da birden fazla özelliği yansıtabilmektedir. Mikrobölgeleme çalışmaları için en uygun parametre, uygulanan yaklaşım doğrultusunda değişebilir. Bu parametreler, bir önceki bölümde derlenmiş

literatürdeki mikrobölgeleme yaklaşımlarına ait örneklerde geniş bir şekilde görülmekle birlikte, bu bölümde de farklı bazı örnekler ile açıklanmaktadır.

Yer hareketinin büyüklüğünün ölçülmesinde kullanılan pik ivme değeri mikrobölgeleme parametresi olarak kullanılabilir [88]. Yüksek pik ivmelere sahip yer hareketleri düşük pik ivmeli yer hareketine göre genel olarak daha yıkıcı olurlar. Ancak bu durum her zaman geçerli olmayabilir, çok yüksek frekanslardaki yüksek pik ivmeler çoğu yapı tipinde az bir hasara neden olur. Pik ivme çok faydalı bir parametre olmasına karşılık, hareketin frekans içeriği ve süresi ile ilgili bilgi sağlamamaktadır [16]

Tayvan örneğinde, HAZUS 97- Sismik Kayıp Tahmin Programı çerçevesinde hazırlanan, HAZ-Tayvan programı sismik tehlike analizinden elde edilen pik ivme (PGA) dağılımı, 1999 Chi-Chi depremi parametresi ile uyumlu sonuçlar vermemektedir. Bu depreme dayalı olarak Tayvan için sismik bölgeleme ve bina yönetmeliğindeki sismik bölge faktörleri yenilenmiş ve yakın odak etkisi için sismik tasarım spektrumları düzenlenmiştir. Yakın odak etkisi parametresi olarak ise PGV/PGA oranları, incelenmektedir [95]. Pik hız (PGV) ve pik ivmeler (PGA) genel olarak farklı frekans hareketlerinde görüldüklerinden PGV/PGA oranının, hareketin frekans içeriği ile ilgili olabileceği düşünülmektedir [16].

Daha çok Ampirik-Deneysel yöntemlere dayalı yaklaşımların uygulandığı mikrobölgelemelerde kullanılan bir diğer parametre zemin hakim periyodudur [9,79, 82,83,85,86]. Ancak Emilia-Romagna (İtalya) uygulamasında olduğu gibi teorik yöntemlere dayalı olarak da belirlenmektedir. Bu çalışmada haritalanan mikrobölgeleme parametreleri; zemin hakim periyodu, 474 yıllık dönüş periyodu için pik ivme ve 0.2, 0.5, 1 sn periyotlarındaki spektral ivme büyütme faktörleridir. Uygulanan mikrobölgeleme yaklaşımı, sismik tehlike analizine dayalı olarak belirlenen yer hareketi için bölgedeki zeminlerin lineer davrandığını varsaymaktadır [96].

Sismik tehlike analizinde, kullanılan yöntemlerin dışında haritalama tekniklerinin de etkili olduğunun, İskoçya' daki uygulama ile vurgulandığı bir

çalışmada, harita kullanıcıları ve kullanımı dikkate alındığında, yer hareketi parametresi olarak şiddetin kullanılmasının uygun olabileceği belirtilmektedir [97].

Benzer bir diğer uygulamada, Basel (İsviçre) şehri için sunulan hasar senaryosu tekniğinde, mikrobölgeleme haritaları nitel bir değere dayanmaktadır. Bu değer, yer hareketi büyütmesine sebep olabilecek 7 yerel zemin parametresinin etkisini dikkate almaktadır. Bu parametreler, kuvarterner ve prekuvarterner sedimentlerinin konsolidasyonu, tipi, kalınlığı ve sıvılaşma potansiyelini içermektedir. Yerel zemin şartlarının büyütme karşı hassasiyetini tanımlayan değer, son 100 yıl boyunca gözlenen makrosismik şiddet verisinin dağılımı temel alınarak, ortalama bölgesel yoğunluk değerine göre  $\pm 1$  şiddet dereceleri aralığında değerlendirilmektedir [73].

Detaylı geoteknik incelemelerin olmaması durumundaki bir mikrobölgeleme çalışması, litoloji, tahmini rijitlik ve tabaka derinliği gibi mühendislik jeolojisi özelliklerine dayalı olarak sismik yönetmelik kriterlerine dayanmaktadır. Atina (Yunanistan) için önerilen bölgeleme, 1999 Atina depremi ( $M=5.9$ ) hasar dağılımı ve sınırlı sayıdaki nokta için gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları ile de kontrol edilmektedir [98].

Depremler sırasında yapısal hasarı ve diğer kayıpları etkileyen ana faktör, yetersiz yapısal tasarım ve yapım tekniklerinden kaynaklanan yapısal kusurlar tarafından kontrol edilen bina hassasiyetidir. Diğer taraftan, yapısal eksikliklerin etkisi deprem kaynak ve zemin şartlarının kontrol ettiği yer hareketi karakteristikleri ile ilgili diğer faktörler tarafından artırılmaktadır [68]. Bu doğrultuda mikrobölgeleme çalışmalarında önceden gözlenen yapısal hasar ile uyumlu ve yapıların mühendislik tasarımında uygulanabilir, uygun yer hareketi parametrelerinin seçilmesi büyük önem taşımaktadır [8].

Deprem mühendisliğinde yapı davranışı çok büyük bir öneme sahiptir ve bu doğrultuda davranış spektrumunun, yer hareketi karakterizasyonunda önemli ve faydalı bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Aslında davranış spektrumu yapının davranışı ile filtrelenmesi nedeniyle yer hareketi karakteristiklerini dolaylı olarak

yansıtmaktadır [16]. Ancak, yer hareketinin yapılar üzerindeki potansiyel etkisini göstermesi nedeniyle mikrobölgeleme çalışmalarında özellikle son zamanlarda farklı spektral parametreler tercih edilmektedir. Bu parametreler aynı zamanda yer hareketinin genliği, frekans içeriği ve süresi ile ilgili birden fazla karakteristiği yansıtmaktadır.

Örneğin Larissa (Yunanistan) şehri sismik mikrobölgeleme haritaları, benzer davranış spektrumu şekillerine dayanmaktadır. SHAKE programı ile yapılan analizlerde, ana kaya seviyesindeki 4 tasarım depremi, sismik tehlike analizleri sonucu önerilen olası iki deprem senaryosu (yakın odaklı-sığ ve uzak-ortalama derinlikte) ile uyumlu, benzer sismotektonik bölgelerdeki gerçek kayıtlardan seçilmiş ve ölçekleme yöntemi ile belirlenmiştir [99].

Mikrobölgeleme haritalarında çoğunlukla kullanılan spektral parametrelerin, spektral ivmeler veya spektral büyütme olduğu söylenebilir [9,89,91,93]. Genel olarak tercih edilen bir diğer parametrenin ise spektral şiddet olduğu görülmektedir. Garfagnana bölgesinde (İtalya) sismik davranışın belirlenmesinde, 2 boyutlu eşdeğer-lineer analiz sonuçlarına dayalı olarak zemin büyütme katsayısı ile 1 ve 2 boyutlu analiz sonuçlarının karşılaştırılmasına dayalı topografik katsayı parametreleri kullanılmıştır. Zemin büyütme katsayısı, ana kaya ile yüzeydeki spektral şiddetin oranı olarak tanımlanmaktadır. Spektral şiddetler, bölgedeki mevcut bina ve altyapının temsil edilebileceği, 0.1 ve 0.5 saniye periyot aralığındaki hız spektrumunun integrali alınarak hesaplanmıştır. Topografik büyütme katsayısı ise 0.2 ya da 0.4 saniye periyodundaki spektral ivmelerin oranı olarak belirlenmektedir [60].

Japonya'da depremden etkilenecek bölgeler için, JMA (Japon Meteorological Agency) sismik şiddeti, yapısal hasarın tahmininde ve kriz yönetiminde kullanılan önemli bir parametredir. Bu parametrenin pik ivme (PGA), pik hız (PGV) ve spektrum şiddeti (SI) ile korelasyon ilişkileri, Japonya, Birleşik Devletler ve Tayvan'daki 20 depremden seçilen veri setine dayalı olarak incelenmiştir. Analiz sonuçları, JMA sismik şiddet değerinin en yüksek korelasyonu spektrum şiddet ile sağladığını göstermektedir. İki parametrelili analiz sonuçlarında, PGA ve SI birleşiminin, tek

parametrelili çözümlere göre daha yüksek korelasyonlar gösterdiği belirtilmektedir. Aynı zamanda, spektrum şiddetinin yapısal hasar ile diğer yer hareketi parametrelerine oranla çok yüksek bir korelasyon gösterdiği, 1995 Kobe depremini de kapsayan bir başka çalışmanın sonucudur. Spektrum şiddetinin 60 cm/s değeri, Japonya’ da deprem sonrası doğal gaz kaynaklarının zorunlu olarak kapatılması için sınır bir değer olarak belirlenmiş olup, bu amaçla SI-sensörleri kullanılmaktadır [100].

Umbria-Marche (İtalya) mikrobölgeleme çalışmasında ise bir çok yapı için temel periyot aralığı olduğu düşünülen 0.1-0.5 sn arası için, yüzeydeki ve ana kayadaki spektral şiddet oranı olarak tanımlanan amplifikasyon katsayısı kullanılmaktadır [101]. İtalya’daki farklı bir bölge için diğer bir çalışma da, spektral şiddet oranı, 0.1-0.5sn ve 1.1-2.5sn olmak üzere iki periyot aralığı için hesaplanmaktadır. Yazarlar, spektral şiddet oranının, yapısal hasarı diğer yer hareketi parametrelerine göre daha iyi temsil ettiğini belirtmektedirler [102].

Diğer taraftan farklı mühendislik problemlerinin, farklı yer hareketi karakteristiklerinden etkilenmeleri nedeniyle mikrobölgeleme çalışmaları için seçilecek yer hareketi parametreleri de değişmektedir. Los Angeles şehrinde, köprü, tünel ve yeraltı boruları gibi zemindeki farklı deformasyonlara hassas yapıların tasarımı için farklı aşılma olasılıkları için düzenlenen mikrobölgeleme haritalarında, normalize pik deformasyon parametresi kullanılmaktadır. Yöntemin metodolojisi, lineer zemin davranışı için geçerli olabilecek, deformasyon ve hız arasındaki basit ilişkiye dayanmaktadır [103].

Mikrobölgeleme çalışmalarında, hedefler doğrultusunda en uygun parametrenin seçilmesi, uygulamada kullanılabilir önerilerin belirlenmesi açısından en önemli noktalardan birini oluşturmaktadır. Diğer taraftan seçilen parametrelerin haritalanmasında gelişen bir yaklaşım, sonuçların göreceli olarak yorumlanmasıdır. Türkiye’deki farklı bölgeler için uygulanmış mikrobölgeleme yöntemlerinde, elde edilen zemin büyütmesi parametrelerinin, incelenen bölgedeki frekans dağılımlarını dikkate alan bir yaklaşımla relatif olarak 3 ayrı bölge tanımlanmaktadır [11, 48, 49]

### **3. İNCELEME ALANLARININ JEOLJİSİ VE MEVCUT REZİSTİVİTE ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

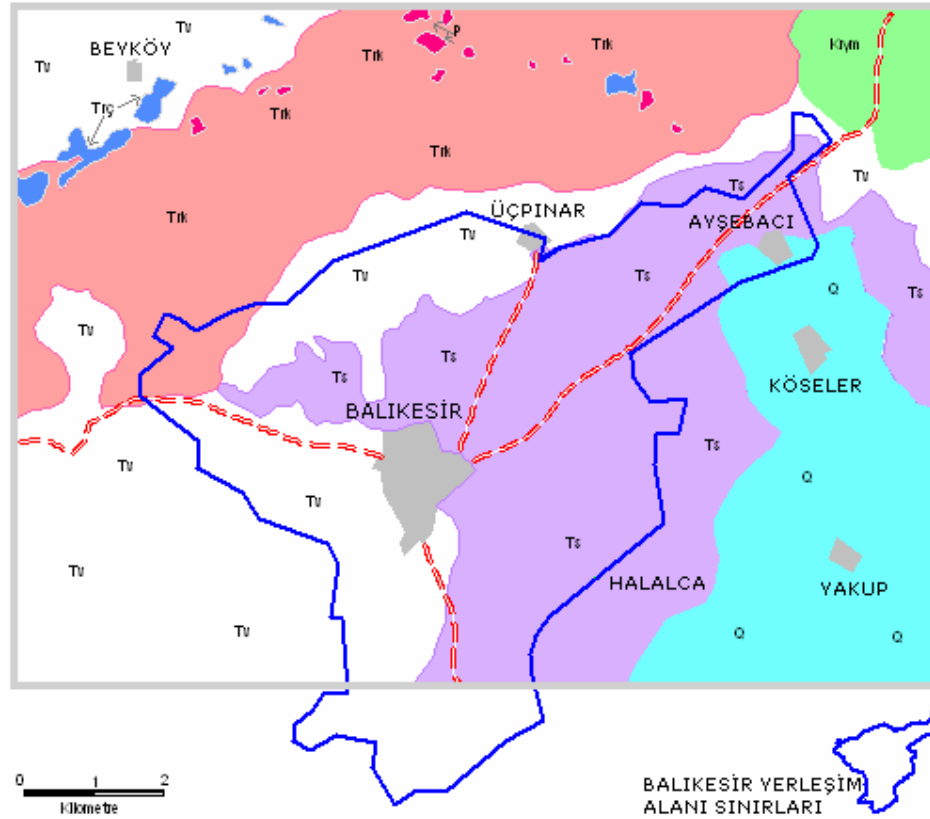
#### **3.1 Giriş**

Bu bölümde, Balıkesir il merkezindeki inceleme alanlarının jeolojisi, 1/2000 [1] ve 1/5000 [2] ölçekli iki farklı çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda özetlenmiştir. Ayrıca, Balıkesir yerleşim alanı sınırları içindeki DSİ ve MTA' dan derlenen 16 derin su sondajındaki [2, 3] litolojik kesitler değerlendirilmiştir.

Aktif kaynak sinyallerinin uygulandığı jeofizik yöntemlerden biri olan rezistivite sondajları, elektrik öz direncin derinlikle değişimini belirlemektedir. İletkenliğin tersi olan elektrik öz direnç, dirençten farklı olarak temel bir malzeme özelliğidir. Bu bölümde, inceleme alanlarındaki mevcut rezistivite sondaj verileri, derlenen jeolojik ve geoteknik veriler dikkate alınarak yorumlanmaya çalışılmıştır. Öncelikle, jeolojik malzemeler için yaygın rezistivite değerlerindeki değişim ve rezistivite yönteminin kullanım alanlarına dayalı olarak nasıl yorumlandığı konularını kapsayan literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Bu doğrultuda ilk aşamada, BPH bölgesindeki her rezistivite sondajının etrafındaki 250 m çaplı alan içinde kalan laboratuvar deneylerine dayalı olarak, rezistivite ile zemin sınıfı, ince tane oranı ve plastisite indisi arasında korelasyon olup olmadığı araştırılmıştır. İkinci aşamada, rezistivite sondaj profilindeki değişim, rezistivite noktalarının oluşturduğu düşey kesitler göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve bu aşamada, belirlenen rezistivite değer aralıkları ile temsil edilebilecek 4 farklı tabakanın kesitlerdeki değişimi, jeolojik bilgiye dayalı olarak yorumlanmıştır.

### 3.2 İnceleme Alanlarının Jeolojisi

Balıkesir yerleşim alanı ve çevresinin 1/50.000 ölçekli bir çalışmaya dayalı jeolojisi, Şekil 3.1’ de gösterilmektedir. Balıkesir yerleşim alanı sınırlarının da görüldüğü haritada; inceleme alanlarından BPH (Bahçelievler, Plevne ve Hasan Basri Çantay mahallelerini kapsayan alan) ve 18-02 bölgesinin büyük bir çoğunluğu, Neojen yaşlı, konglomera, kumtaşı, marn, kiltası, killi kireçtaşı ve kireçtaşı ardalanmasından meydana gelmiş, eş zamanlı tuf, aglomera ve lavlar ile yanal ve düşey geçişli, sediment birimlerle tanımlanmaktadır. Akıncılar mahallesi ve 18-02 bölgesi dahilindeki Ayşebacı bölgesi, 3-5 m arasında değişen derinliklerde Kuvarterner alüvyon olarak belirtilmektedir. Balıkesir yerleşim alanı sınırları içinde, topoğrafik olarak daha yüksek olan batı ve kuzeybatı bölgelerinde ise, Neojene ait volkanik kayalar yer almaktadır [1].



Şekil 3.1 Balıkesir yerleşim alanı ve çevresinin jeolojisi





İnceleme alanlarındaki (BPH Bölgesi, 18-02 Bölgesi, Akıncılar Mahallesi) 1/2000 ölçekli çalışma [1], Balıkesir Belediyesi tarafından yaptırılan yerleşime uygunluk amaçlı proje kapsamındaki, sondajlara ve jeofizik deneylere dayanmaktadır. BPH bölgesi, kuzey sınırındaki dar bir şerit halindeki Kuvarterner yaşlı alüvyon birimi (*SK56, SK49, 1.5-4m derinliğinde*) dışında, genelinde tüfit olmak üzere aglomera (*doğuda, SK56, SK50, SK37 ve SK26 sondajları ile sınırlı alanda, 2,5-4,5m derinliğinde*) ve killi kireçtaşı-kiltaşı (*güneydoğuda SK06 ve SK07 sondajları ile sınırlı dar bir alanda, 6-15m derinliğinde*) birimleri ile tanımlanmaktadır. 18-02 bölgesinde, Ayşebacı mahallesindeki kalınlığı genel olarak 1-4.5m arasında değişen alüvyon ve Üçpınar köyünün güneyindeki (*SK21,SK22 ve SK09 sondajlarının oluşturduğu üçgen dar bir alanda*) killi kireçtaşı-kiltaşı dışında, bölgenin tamamı tüfit olarak belirlenmiştir.

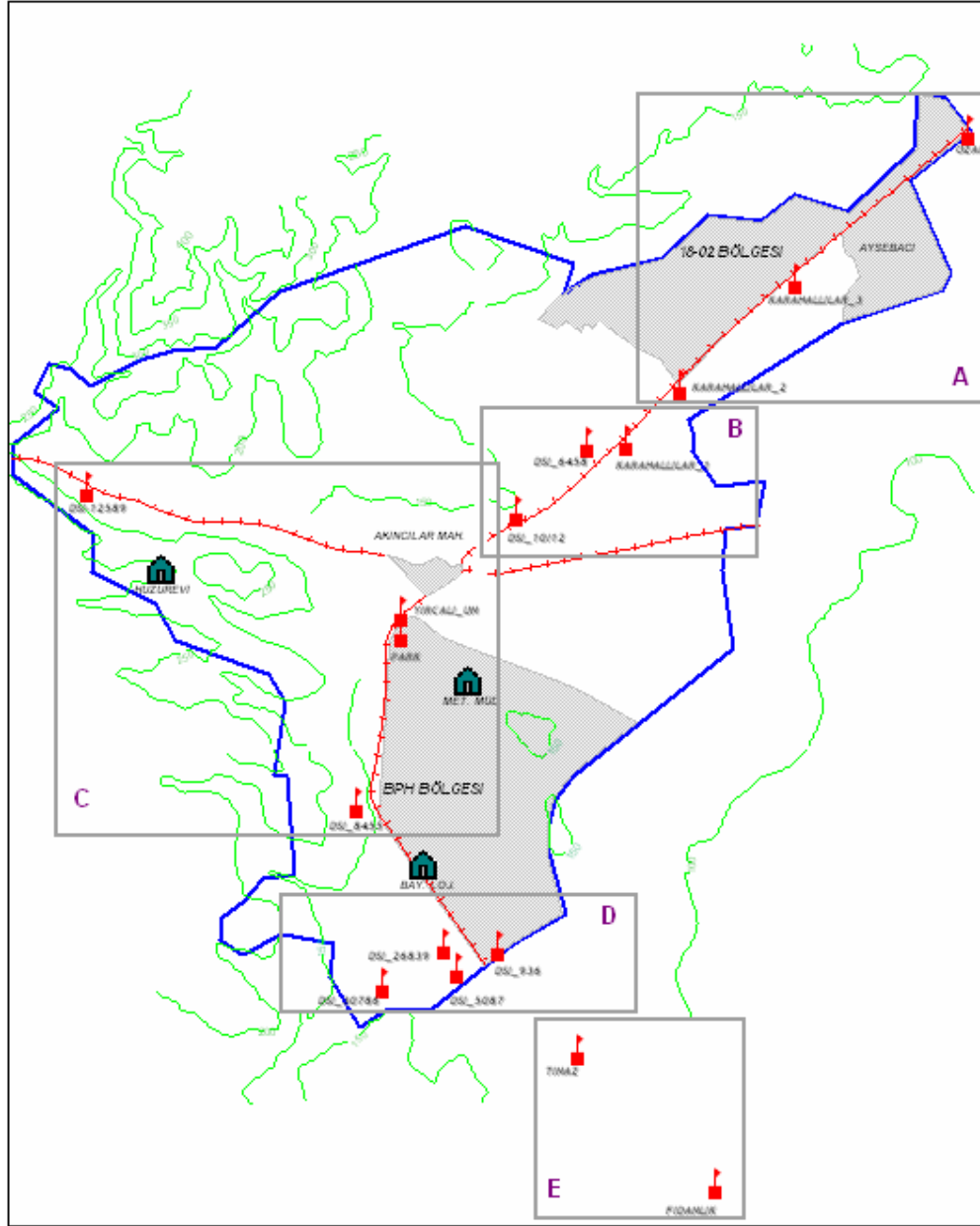
18-02 bölgesi için MTA tarafından hazırlanan 1/5000 ölçekli çalışma [2], inceleme alanı sınırları içinde kalan tüm alanı alüvyon olarak tanımlamaktadır. Kuzey-güney doğrultusundaki jeolojik kesitlerde, 1m den 10-15 m ye kadar artan alüvyon tabakası altında tersiyer volkanitleri ile yanal geçişli Soma Formasyonu yer almaktadır. Neojen yaşlı sediment kayalar niteleyen bu formasyon, tüfit (*gölsel ortama volkan tüflerinin dolmasıyla oluşmuştur ve andezit bileşimindedir*), konglomera, kumtaşı, silttaşı, killi kireçtaşı, volkanik malzemeli çamurtaşı ve aglomera gibi değişik litolojideki birimlerin ardalanmasından oluşmaktadır. Bölgesel olarak birçok birimin ardalanmasından ve karışımından oluşan Soma Formasyonu'nun, etüd sahasındaki daha baskın birimleri, tüfit, aglomera, ince kumtaşı-silttaşı yer yer killi kireçtaşı ve nadiren kiltaşı, çamurtaşı olarak belirtilmektedir.

Bu çalışmaların dışında Balıkesir'in yerleşim alanı sınırları içindeki DSİ ve MTA' ya ait toplam 16 derin su sondajının konumları Şekil 3.2' de görülmektedir [2, 3]. Şekil 3.3' de kesitleri görülen ve eş zamanlı olmayan iki ayrı kuruma ait bu sondajlar, doğal olarak detayda ve litolojik tanımlamalarda farklılıklar göstermektedir.

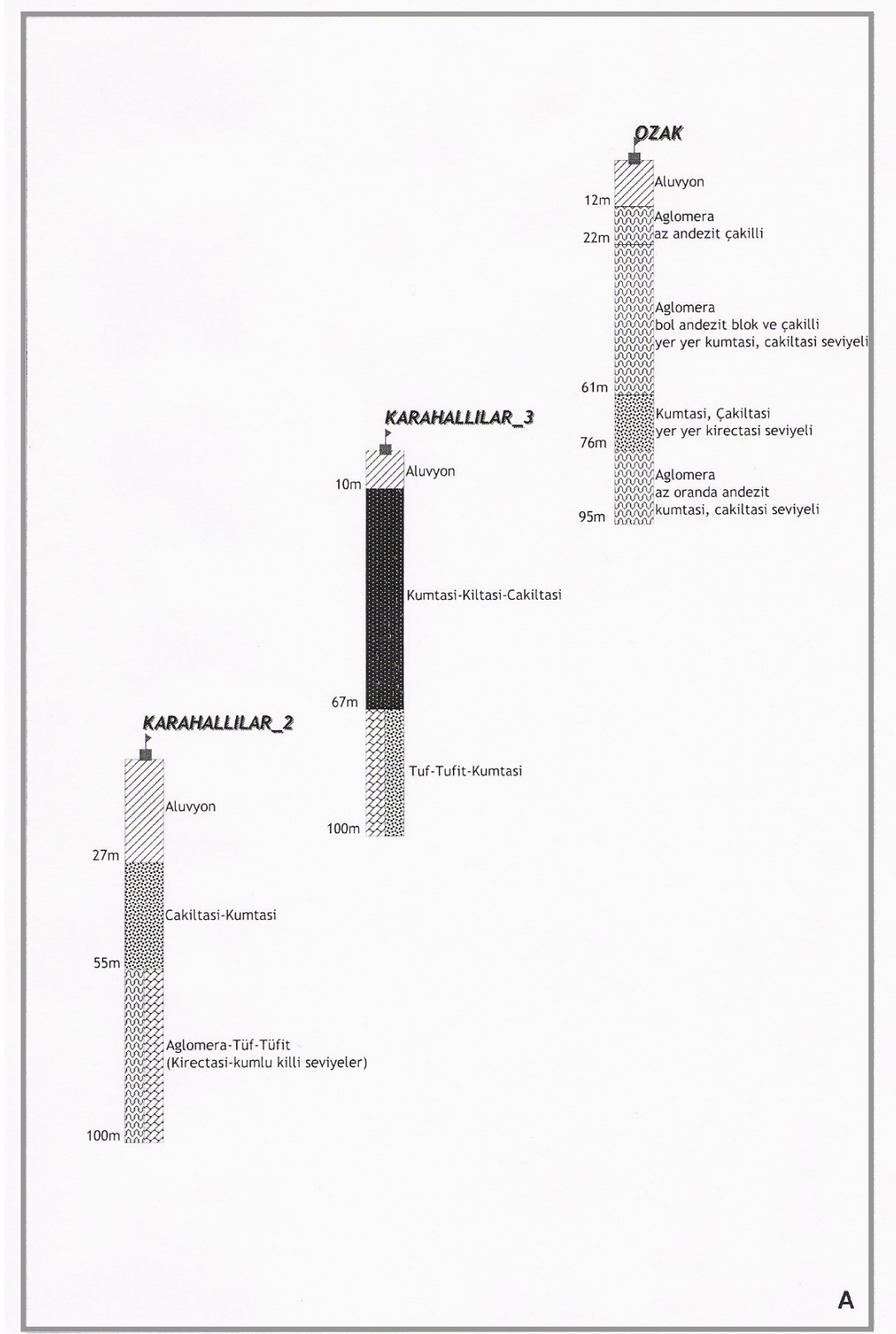
18-02 İnceleme alanı içindeki ve yakınındaki 4 sondaj (Özak, Karahallılar\_3, Karahallılar\_2 Karahallılar\_1) MTA çalışması olup, benzer detay seviyesinde litolojik tanımlamalar içermektedir. Buna göre inceleme alanında aynı doğrultuda yer alan bu 4 sondajda, yüzeyden itibaren 10m ile 27m arasında değişen derinliklerde alüvyon tabakası tanımlanmaktadır. Alüvyon tabakasının altında 25, 55 ve 75m derinliğe kadarki birimlerde, aglomera, kumtaşı ve çakıltası ardalanmasının hakim olduğu söylenebilir. Bu derinliğin altında, kumtaşı ve aglomera ile ardalanmalı olarak tüfit yer almaktadır.

BPH inceleme alanı sınırındaki öncelikle göz önüne aldığımız üç sondajda (kuzeyde Yırcalı\_un ve Park, güneyde DSİ\_936), 6-8m lik alüvyon tabakasının altında killi zeminlerin hakim olduğu söylenebilir. 50-70 m seviyesinin altında, marn-kireçtaşı ve marn-tüfit ardalanması olarak tanımlanan birimler yer almaktadır. Bölgenin güneyindeki yakın diğer sondajlarda da (DSİ\_5087, DSİ\_26839, DSİ\_30786, Tınaz) marn ile birlikte killi zeminler çoğunlukta olmakla birlikte, konglomera tabakaları da ardalanmalı olarak gözlenmektedir.

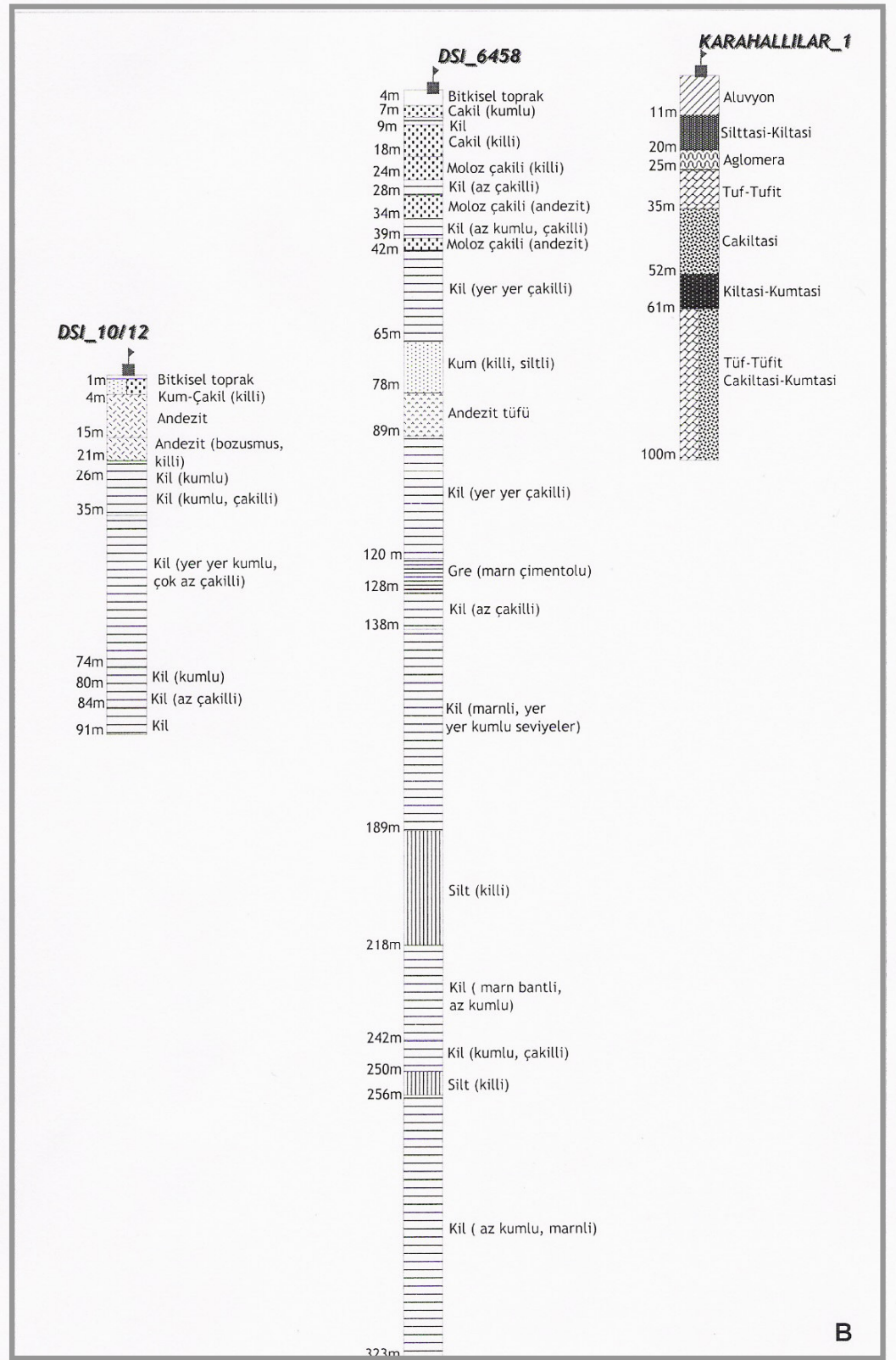
İnceleme alanlarının içinde ve yakınında yoğunlaşmış olan derin sondajlar, 1/25000 ölçekli topoğrafik verilere göre, 100 m ile 150 m lik eşyüksekti eğrileri arasındaki yaklaşık olarak düz bir alanda yer almaktadır. 90 m ile 323 m arasında değişen derinliklerdeki bu sondajlar içinde, yalnız DSİ\_30786 sondajında 234 m seviyelerinde volkanik bir kayaç olan andezit görülmektedir. Yerleşim alanının batı sınırındaki tek sondajda (DSİ 12589), andezit birimi 25 m derinlikte başlamaktadır.



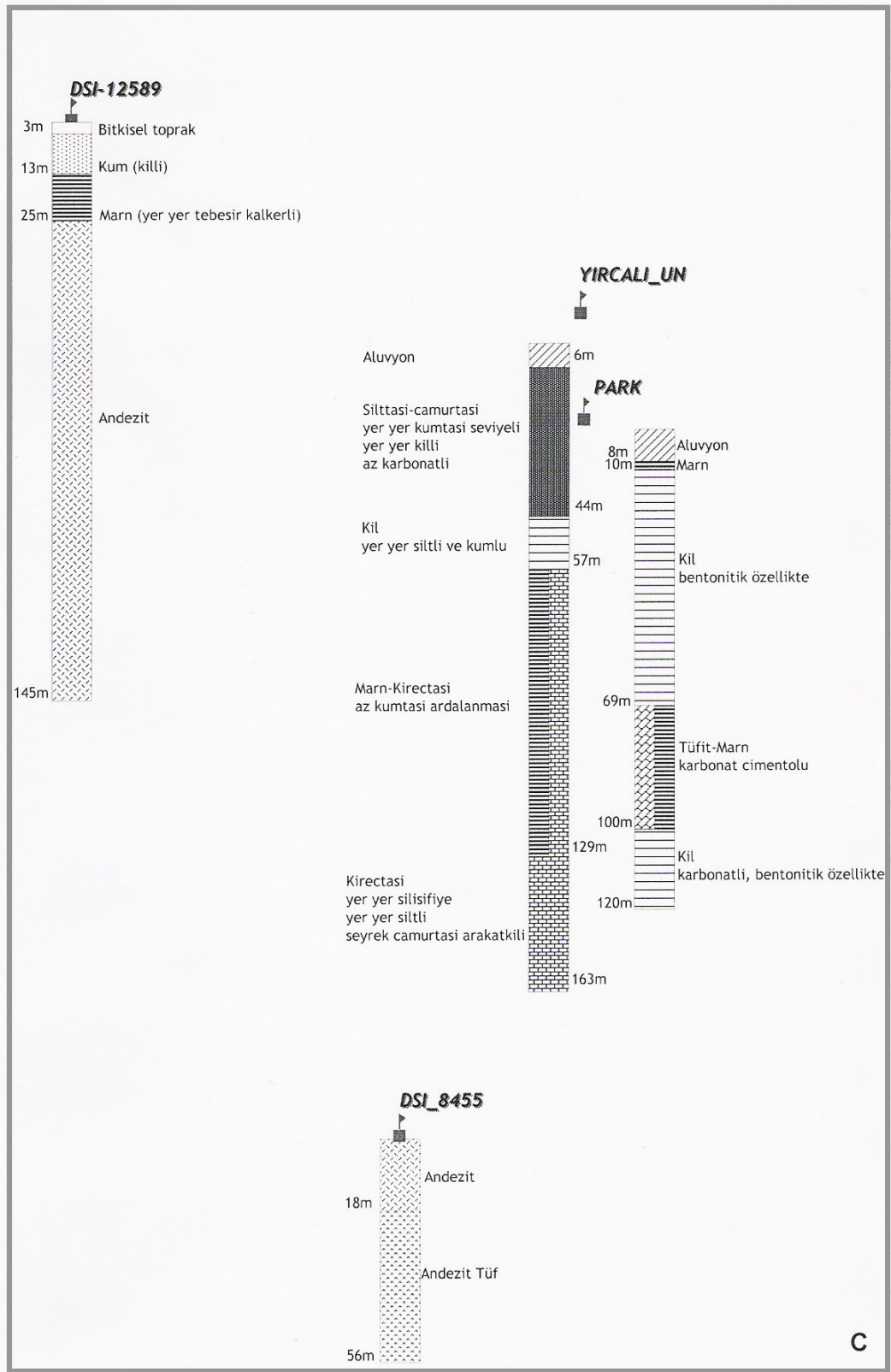
Şekil 3.2 Balıkesir yerleşim alanı sınırları içindeki DSİ ve MTA' ya ait 16 derin sondajın dağılımı



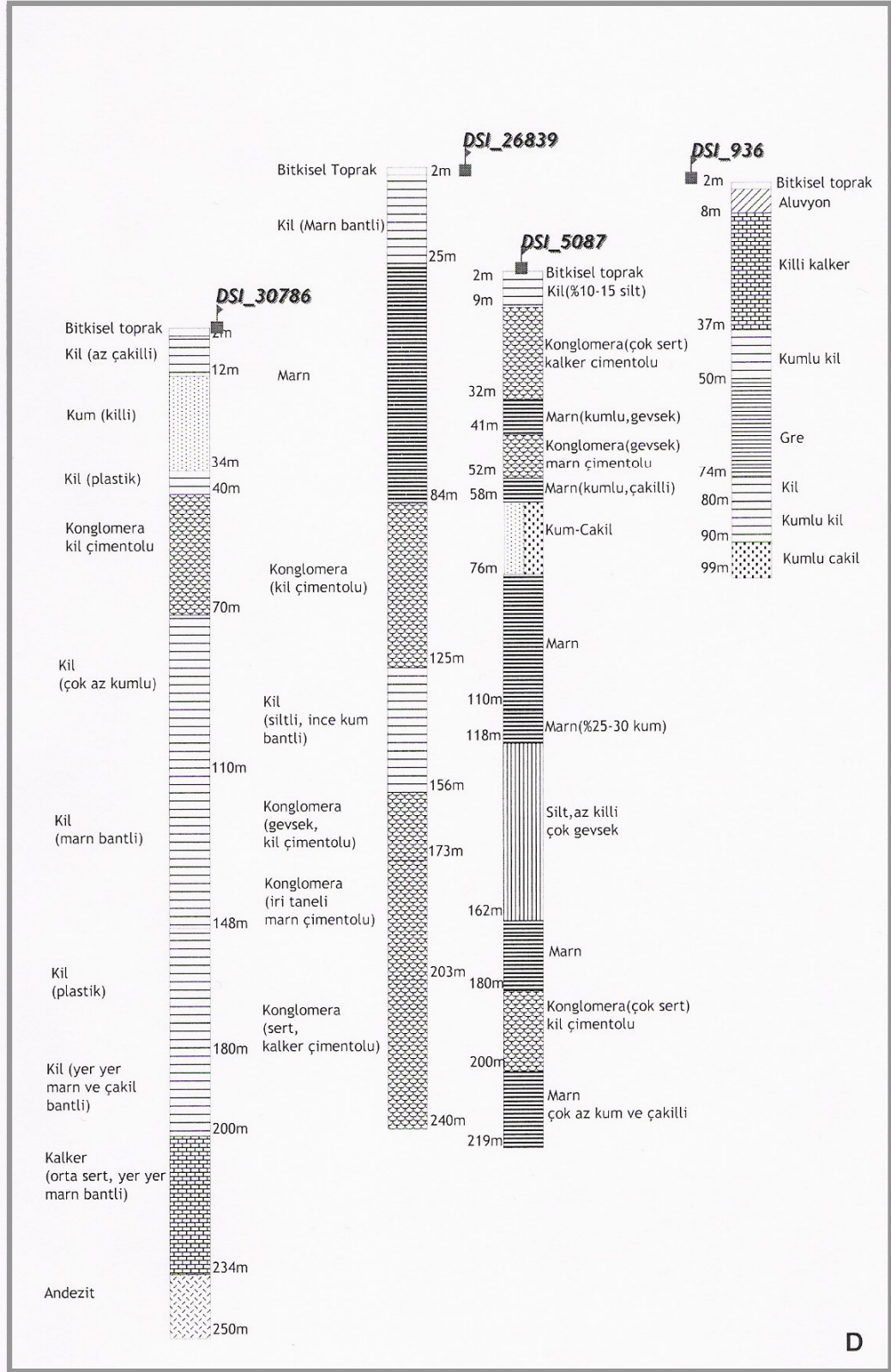
Şekil 3.3.a Derin sondaj kesitleri (A)



Şekil 3.3.b Derin sondaj kesitleri (B)

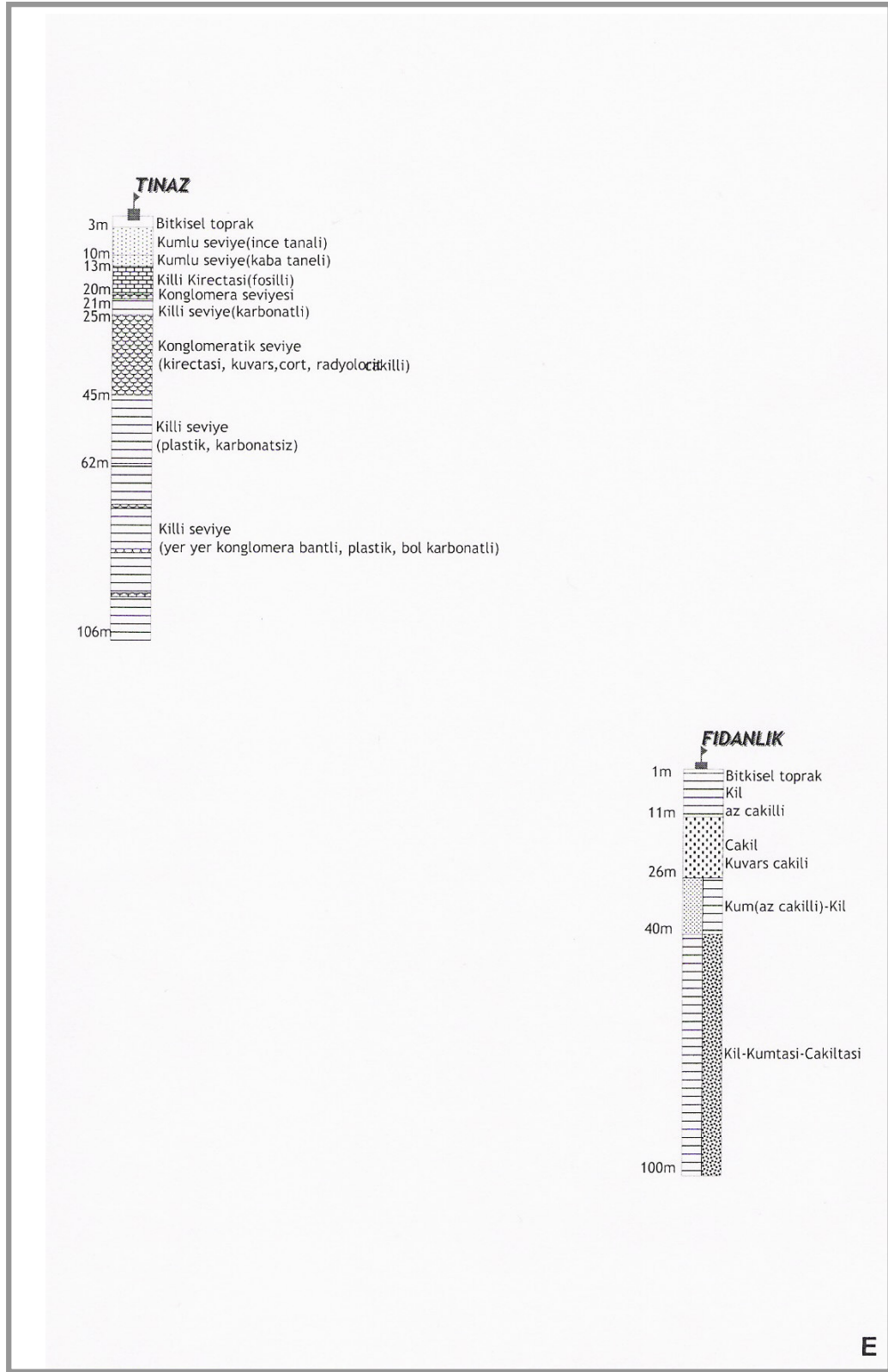


Şekil 3.3.c Derin sondaj kesitleri (C)



Şekil 3.3.d Derin sondaj kesitleri (D)





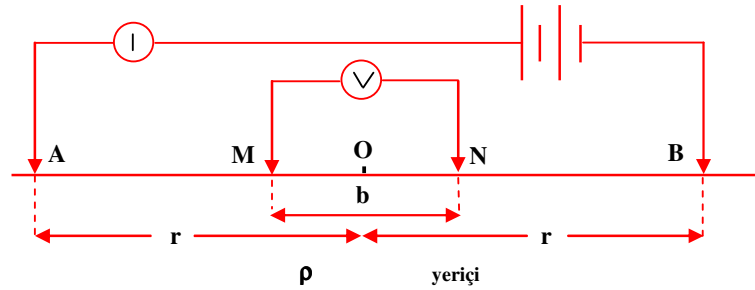
Şekil 3.3.e Derin sondaj kesitleri (E)

### 3.3 Rezistivite Çalışmalarının Değerlendirilmesi

#### 3.3.1 Rezistivite (Elektrik Özdirenç) Yöntemi

Elektrik özdirenç metodu (DC Resistivity), aktif kaynak sinyallerinin uygulandığı jeofizik inceleme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, yüzeye yerleştirilen iki elektrod aracılığıyla yer içinde oluşturulan akımın neden olduğu gerilim farkı, farklı konumdaki iki elektrod yardımıyla ölçülmektedir. Elektrik özdirenç yöntemindeki inceleme şekilleri; derinlikle değişimin incelendiği düşey elektrik sondajı (resistivity sounding) ve yanal değişimin gözlemlendiği özdirenç profilleri (resistivity profiles) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Yöntemde, uygulanan akım ( $I$ , amper) ve ölçülen gerilim ( $V$ , volt) değerleri ile birlikte, uygulanan elektrod diziliminin geometrik faktörü ( $K$ ) kullanılarak, mevcut ölçü konumu için görünür özdirenç (ohm-m) değerleri hesaplanmaktadır. Jeolojik problemlerin türüne bağlı olarak farklı elektrod dizilimleri mevcut olmakla birlikte, düşey elektrik sondajı tekniğinin kullanılmasında yaygın olarak Wenner ve Schlumberger simetrik dizilimleri uygulanmaktadır.



Şekil 3.4 Schlumberger elektrod dizilimi

Şekil 3.4' de Balıkesir' de yapılan düşey elektrik sondajı ölçümlerinde uygulanan Schlumberger elektrod diziliminin görünümü örneklenmiştir. Arttırılan akım elektrodları aralığının ( $AB/2$ ) fonksiyonu olarak ölçülen görünür özdirenç

değerleri, dizilimin merkezine (O noktasına) atanmaktadır. Ölçülen görünür özdirenç değerleri, ancak homojen tek bir tabaka durumunda, elektrod diziliminin değişiminden etkilenmeyecek ve gerçek özdirenç eşit olacaktır. Heterojen yapılarda ise elektrod dizilimine göre değişen görünür özdirenç değerleri, farklı tabakalara ait geometrilerine de bağlı toplamsal etkiyi yansıtmaktadır.

Düşey elektrik sondajı (DES) arazi verisi, yatay ekseninde elektrod aralığı (AB/2), düşey ekseninde görünür özdirenç değerleri (ohm-m) olmak üzere çift logaritmik eksen takımında gösterilmektedir. DES arazi eğrilerinin, bir takım taslak kuramsal eğri gruplarına (master curves) uydurularak ya da sayısal inversion yöntemlerine (forward modelling ve inversion methods) dayalı analizlerle yorumlanması sonucu; yatay elektrik tabakalaşma modelleri elde edilir.

Elektrik özdirenç (resistivity), iletkenliğin (conductivity) tersi olup, dirençten (resistance) farklı olarak, temel bir malzeme özelliğidir. Birçok kaya için bu değer, boşluk geometrisi ve boşluk sıvısı tarafından kontrol edilmektedir. Mineral dağılımının katkısı az olmakla birlikte, jeolojik malzemelerin rezistivite değerleri çok geniş bir aralıkta ( $10^{24}$ ) değişim göstermektedir. Tortul kayalarda, tüm kayanın rezistivitesini kontrol eden belki de en önemli tek parametre boşluk suyunun rezistivite değeridir. Boşluk suyunun rezistivitesi ise çözülmemiş tuzlar tarafından kontrol edilmekte olup, tuzlu yeraltı suyu için 0,05 ohm-m ile erimiş buz suyu için 1000 ohm-m arasında değişebilmektedir.

Jeolojik malzemeler ve kayalar için yaygın rezistivite değerlerindeki değişimler incelendiğinde; zeminler için boşluk suyunun miktarı ve niteliği yanında etkili diğer bir parametre olarak “kil içeriği” gözlenmektedir. Genel olarak yüksek kil içeriği, kayanın rezistivitesini düşürmektedir [104-107].

### **3.3.2 Literatürdeki Çalışmalar**

Rezistivite yöntemine ait detaylı araştırmalar, yeraltındaki su taşıyan tabakaların (akifer kalınlığı), zemin ve yeraltı suyu kirliliğinin, arazi dolgusunun ve

gömülü yıkıntuların, karstik sahaların, madenlerin, kırık ve fayların, ana kaya derinliğinin, litolojik yapının ve killi tabakaların belirlenmesi gibi farklı amaçlara yönelik çok sayıda çalışma alanını göstermektedir. Bunların arasından, elektriksel parametrelere dayalı olarak zemin özelliklerinin belirlenmesi ve düşey elektrik sondajı uygulaması içeren çalışmalar incelenmiştir. Elektriksel parametreler ile zemin özellikleri arasında korelasyonu amaçlayan çalışmalar çoğunlukla kumlu zeminler ve sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Bu çalışmalardan biri [108], arazi ölçümlerinde elektrik sonda kullanımına dayanmaktadır. Kumların dane ve kütle özelliklerinin, elektriksel parametrelere dayalı olarak tanımlanmasını amaçlayan çalışmada, kullanılan elektrik sonda da tanıtılmaktadır. Çalışma kapsamında önerilen yöntemde, kum partiküllerinin şeklini, poroziteyi ve anizotropiyi göz önüne alan kompozit bir elektriksel parametre tanımlanmaktadır. Bu elektriksel parametreler ile relatif sıklık ve sıvılaşmanın başlaması için gerekli tekrarlı gerilme oranı (5, 10, 15, 30 ve 50 çevrimde) arasında kurulan korelasyonlar dışında, maksimum kayma modülünün tahmini için de bir yöntem sunulmaktadır. Elektrik sondanın ve önerilen korelasyonların uygulanabilirliği, üç büyük deprem bölgesindeki kumların sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesiyle gösterilmektedir.

Kumlu zeminler için yapılan bir diğer çalışmada [109], laboratuvar ölçeğinde rezistivite koni penetrasyon sondası kullanılmaktadır. Atıkların neden olduğu kirliliğin zemin özellikleri ile rezistivite arasındaki ilişkiyi araştıran bu çalışmada; 3 tip kumlu zemin (bir tanesi %8 oranında siltli kil içermektedir) için rezistivite değerleri, zeminin su içeriği, birim ağırlığı, doygunluk derecesi ve kirlilik konsantrasyonu cinsinden gözlenmiştir. Parametrik çalışma sonuçlarına göre, ölçülen rezistivite değerlerinin değişimi üzerinde, zeminin su içeriği ve su niteliği ile birlikte kirliliğin, zemin tipi ve birim ağırlığından daha fazla etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca %8 oranında siltli kil içeren kum numune için, birim hacim ağırlığı, doygunluk derecesi ve su içeriğine bağlı olarak rezistivite değerlerindeki değişimin, diğer kum numunelerin davranışlarına oranla farklı olduğu gözlenmektedir. Özellikle su içeriğindeki artışa dayalı olarak rezistivite değerinde, diğer kum numunelerdeki gibi belirgin bir azalma saptanamamıştır. Bu durum, zemindeki kil içeriğinin rezistivite

değerini etkileyen önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Çalışma bu tip zeminler için kirlilik ile doğrudan bir korelasyonun mümkün olmadığını kanıtlamakla birlikte, rezistivite ölçümlerini, yeraltındaki kirliliğin izlenmesi ve tasvir edilmesi için uygun bir yöntem olarak önermektedir.

Düşey elektrik sondajı uygulaması içeren çalışmalardan biri, 1995 ve 1996'da USGS tarafından yapılmıştır Schlumberger diziliminde 61 adet sondajın uygulandığı çalışmanın [110] amacı; bir dolgu zemine doğru hareket ettiği düşünülen kirliliğin yatayda ve düşeydeki durumunu belirlemektir. Yatay elektrik tabakalaşma modelleri elde edilen tekil sondaj serileri, öncelikle düşey kesitlerin oluşturulması amacıyla birleştirildikten sonra yatayda interpolasyon uygulanarak öngörülen derinliklere ait yeraltının yatay kesitleri elde edilmiştir. Bu kesitlerdeki tabakalar bilinen jeolojiye de dayalı olarak; rezistivite 300 ohm-m'nin üzerindeki kuru kum, 45-300 ohm-m arasında olan relatif olarak daha iyi kalitedeki su ile doygun durumdaki kum ve 45 ohm-m'nin altındaki kil yada kötü kalitede su ile doygun kum şeklinde yorumlanmaktadır. Kirliliğin öngörüldüğü bazı bölgelerde ise 10 ohm-m'nin altında düşük rezistivite anomalileri tespit edilmiştir.

Düşey elektrik sondajı (Schlumberger diziliminde) ile birlikte, elektrik profil ve radyometrik ölçümlere dayalı yöntemlerin de uygulandığı bir başka çalışmada, Kuvaterner yaşlı sediment birimler (çakıl, silt ve kil) ile kaplı Pokhara vadisindeki (Nepal) karstik boşluklar belirlenmeye çalışılmaktadır [111]. Çalışmanın hedefleri içinde, rezistiviteye dayalı olarak litolojinin büyük ölçekli yatay ve düşey değişiminin belirlenmesi ve karstik özelliklerin relatif olarak küçük ölçekteki rezistivite-derinlik modeli üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi yer almaktadır. Bu hedefler doğrultusundaki sonuçlar, bilinen detaylı jeolojik bilgi ve diğer araştırma yöntem sonuçları ile birlikte yorumlanmaktadır. Elektrik sondajı eğrilerinin yorumlanmasında kullanılacak model farklılığı nedeniyle ortaya çıkan tabaka parametrelerindeki (tabaka kalınlığı ve rezistivitesi) değişime dikkat çeken çalışma, sondajlar ya da detaylı yeraltı gözlemleri olmadan karstik özelliklere ait derinlik tahminlerinin kesin olamayacağını belirtmektedir.

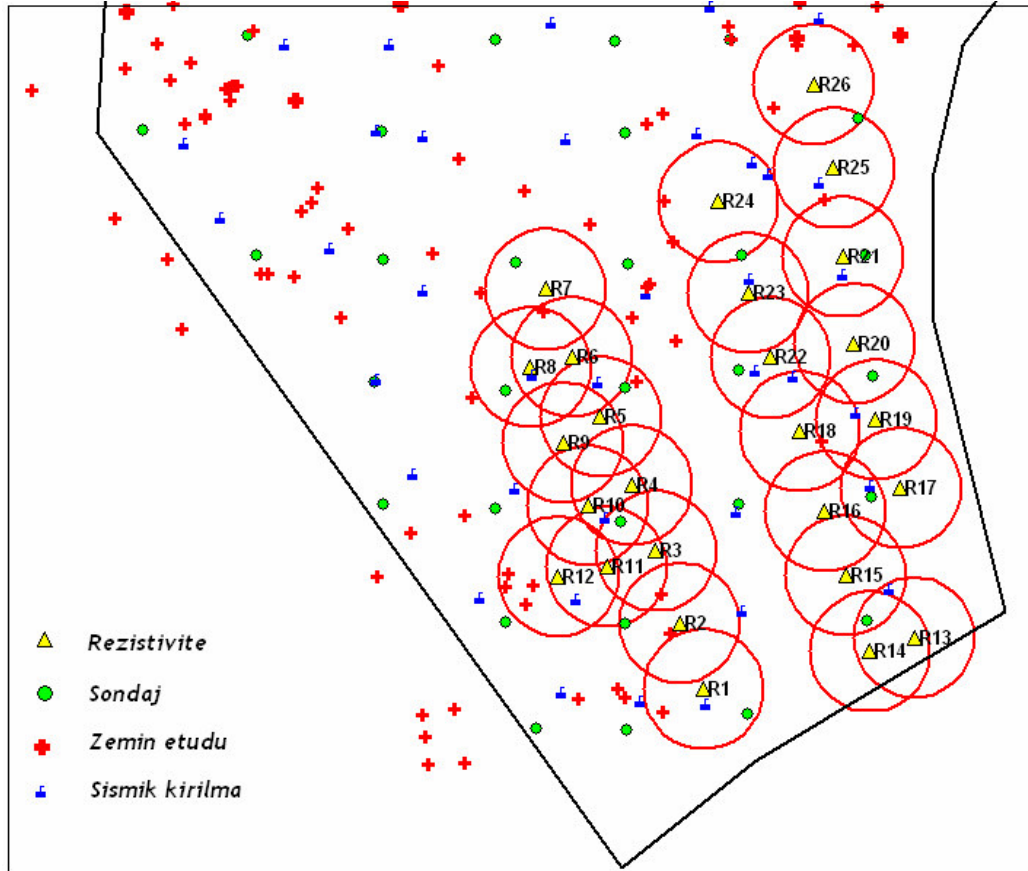
Düşey elektrik sondajlarının yapıldığı diğer iki çalışmanın sonuçları ise genel olarak zemin tabakalarındaki rezistivite zıtlığını değerlendirmektedir. Bu çalışmaların ilkinde [112], elektrik sondaj ve profil tekniklerini birleştiren ve bir hat üzerindeki çok sayıda elektrodun eş zamanlı kullanımına dayanan bir sistem ile (multi-electrode imaging systems), bilinen çakıl yığını geometrisi kalibre edilmiş ve aynı zamanda çakıl potansiyeline sahip farklı bölgeler de incelenerek, sonuçlar sondajlarla doğrulanmıştır. Sistemin denendiği bölgelerden birinde, iri malzemenin rezistivitesi mevsimlere bağlı su içeriği değişimine dayalı olarak 300 ohm-m (Nisan 2001) ile 1500 ohm-m (Kasım 2000) arasında değişmekle birlikte; çevresindeki malzeme ile rezistivite zıtlığı değişmemiştir. Bu sonucun, rezistivite zıtlığının doygunluk derecesi yerine litoloji ve malzeme özellikleri tarafından kontrol edildiğini gösteren önemli bir gözlem olduğu düşünülmektedir.

İkinci çalışmada da [113] düşey elektrik sondajı ve rezistivite profilleri, alüvyonla kaplı bir bölgede yüksek rezistiviteye sahip genç, aşınmamış çakıl yığınının sınırlarını belirlemek amacıyla uygulanmıştır. Farklı aşınma derecesindeki üç ayrı tabakanın tanımlandığı bölgede, rezistivitelerin aşınmaya bağlı olarak porozitedeki farklılıkları yansıtacağı düşünülmüştür. Ancak sonuçlar bölgeye ait farklı jeolojik ve jeofizik çalışmalar ile desteklenerek yorumlanmakta ve özellikle tabakalar arasında yeterli rezistivite zıtlığının olmadığı durumlarda, rezistivitelerin ve derinliklerin doğru olarak belirlenmesindeki zorluk vurgulanmaktadır.

### **3.3.3 İnceleme Alanlarındaki Rezistivite Verisinin Değerlendirilmesi**

Düşey elektrik sondajı eğrilerinden elde edilen tabakalaşma modelindeki gerçek rezistivitelerin, belirli bir zemin ya da kaya tipi için, öncelikle su miktarı, niteliği ve kil içeriğine bağlı olarak değiştiği göz önüne alındığında; ilk aşamada BPH bölgesindeki her rezistivite profili, etrafındaki 250 m çaplı alan içinde kalan sondaj verilerine dayalı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 3.5). BPH bölgesi içinde sınırlı bir alanda homojen sayılabilecek bir dağılımda, Schlumberger diziliminde ( $AB/2=150$  m alınarak) uygulanmış 26 adet düşey elektrik sondajı yer almaktadır.

Profiller çoğunlukla, rezistiviteyi 1 ohm-m ile 119 ohm-m arasında değişen, 3 yada 4 yatay tabakadan oluşmaktadır. Rezistivite zıtlığının gözlendiği az saydaki tabaka dışında, tabakaların rezistivite değerlerindeki değişim 1 ohm-m ile 33 ohm-m arasında kalmaktadır.



Şekil 3.5 BPH Bölgesi rezistivite profilleri ve etrafındaki 250 m çaplı alan içinde kalan sondajlar, zemin etüdüleri ve sismik kırılma deneyleri

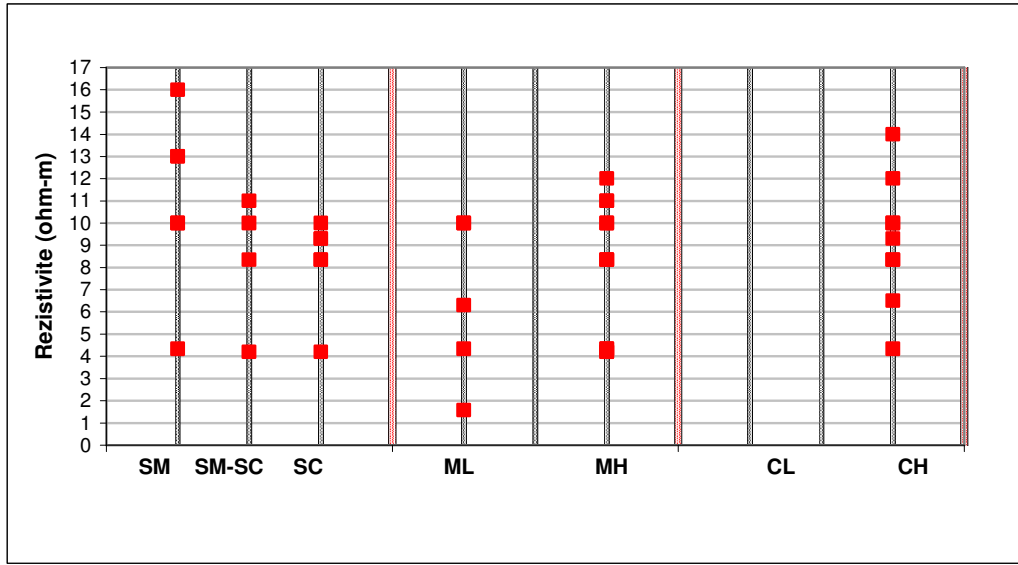
150 m derinliğindeki rezistivite profillerine karşılık sondaj derinlikleri genel olarak 15-20 m ile sınırlı kalmaktadır. Seçilen alanlarda, laboratuvar deneyleri ile zemin sınıflarının belirlendiği derinlikler için; rezistivite ile zemin sınıfı, ince tane oranı ve plastisite indisi arasında korelasyon olup olmadığı araştırılmıştır (Tablo 3.1).

Tablo 3.2 BPH Bölgesindeki rezistivitelerin, etrafındaki laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılması

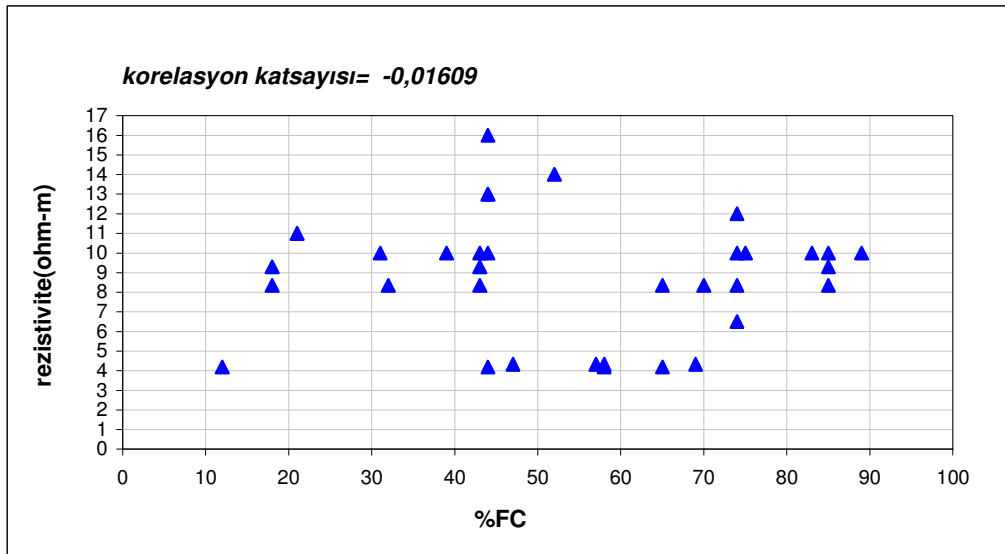
| Nokta | H (derinlik) / (sondaj no) | Uzaklık | Rezistivite | Zemin sınıfı | % FC | PI | YASS  | Açıklama                       |
|-------|----------------------------|---------|-------------|--------------|------|----|-------|--------------------------------|
| R1    | 2m (Z_245)                 | 94m     | 14,00       | CH           | 52%  | 26 | 4m    |                                |
| R1    | 6,5m (SK01)                | 100m    | 11,00       | SM-SC        | 21%  |    | 4m    |                                |
| R2    | 3m (SK05)                  | 115m    | 8,35        | SC           | 18%  | 15 |       |                                |
| R2    | 3,5m (Z-456)_3             | 30m     | 8,35        | CH           | 70%  | 27 |       |                                |
| R2    | 5m (Z-456)                 | 30m     | 8,35        | SM-SC        | 32%  |    |       |                                |
| R2    | 2,5m (Z-530)               | 75m     | 8,35        | SC           | 43%  | 20 |       |                                |
| R2    | 3m (Z-530)                 | 75m     | 8,35        | CH           | 85%  | 26 |       |                                |
| R3    | 2,5m (Z-530)               | 90m     | 10,00       | SC           | 43%  | 20 |       | R11_100m (9,3 ohm-m)           |
| R3    | 3m (Z-530)                 | 90m     | 10,00       | CH           | 85%  | 26 |       | R11_100m (9,3 ohm-m)           |
| R3    | 10,5m (SK09)               | 95m     | 10,00       | SM           | 44%  | 41 |       | R11_100m (13 ohm-m)            |
| R4    | 10,5m (SK09)               | 80m     | 13,00       | SM           | 44%  | 41 |       | R10_100m (16 ohm-m)            |
| R5    | 3.5m (SK-14)               | 81m     | 10,00       | ML           |      |    |       | R9_95m (11ohm-m)               |
| R5    | 2m (A-100)                 | 106m    | 10,00       | MH-ML        | 83%  | 17 |       | R9_95m (11ohm-m)               |
| R6    | 3.5m (E-140)               | 115m    | 6,50        | CH           | 74%  | 33 |       | R8_90m (10 ohm-m)              |
| R6    | 3.5m (SK-14)               | 125m    | 6,30        | ML           |      |    |       | R8_90m (10 ohm-m)              |
| R7    | 3.5m (E_140)               | 46m     | 12,00       | CH           | 74%  | 33 |       |                                |
| R7    | 4m (SK-20)                 | 86m     | 12,00       | MH           |      | 21 |       |                                |
| R7    | 8m (SK-20)                 | 86m     | 11,00       | MH           |      | 12 |       |                                |
| R8    | 6m (SK_13)                 | 70m     | 10,00       | SM-SC        | 39%  |    |       | R6_90m (6.3 ohm-m)             |
| R8    | 3.5m (E_140)               | 120m    | 10,00       | CH           | 74%  | 33 |       | R6_90m (6.3 ohm-m)             |
| R9    |                            |         |             |              |      |    |       | R5_95m                         |
| R10   | 10.5m (SK-9)               | 75m     | 16,00       | SM           | 44%  | 41 |       | R4_100m (13 ohm-m)             |
| R11   | 10.5m (SK-9)               | 100m    | 13,00       | SM           | 44%  | 41 |       |                                |
| R11   | 3m (SK-5)                  | 122m    | 9,30        | SC           | 18%  | 15 |       |                                |
| R11   | 2.5m (Z_530)               | 125m    | 9,30        | SC           | 43%  | 20 |       | R3_108m(10),<br>R12_103m(4.18) |
| R11   | 3m (Z_530)                 | 125m    | 9,30        | CH           | 85%  | 26 |       | R3_108m(10),<br>R12_103m(4.18) |
| R12   | 2m (A_108)                 | 55m     | 4,20        | SC           | 44%  | 40 | 4,5m  | R11_102m (9,3 ohm-m)           |
| R12   | 3.5m (A_447)               | 113m    | 4,20        | MH           | 58%  | 35 | 5,5m  | R11_102m (9,3 ohm-m)           |
| R12   | 2m (J_644)                 | 105m    | 4,20        | MH           | 65%  | 24 | 3,5m  | R11_102m (9,3 ohm-m)           |
| R12   | 6.5m (J_644)               | 105m    | 4,20        | SM-SC        | 12%  |    | 3,5m  | R11_102m (9,3 ohm-m)           |
| R23   | 9m (SK-18)                 | 81m     | 11,00       | MH           |      | 15 |       |                                |
| R24   | 9m (SK-18)                 | 120m    | 8,35        | MH           |      | 15 |       |                                |
| R24   | 3.45m (J_593)              | 112m    | 8,35        | MH           | 65%  | 20 |       |                                |
| R24   | 2m (A_153)                 | 125m    | 8,35        | MH           | 74%  | 35 | 3m    |                                |
| R25   | 13m (SK-26)                | 115m    | 1,57        | ML           |      | 12 |       |                                |
| R25   | 1m (Z_388)_1               | 68m     | 10,00       | MH           | 75%  | 36 | 6.5m  |                                |
| R25   | 1.5m (Z_388)_2             | 68m     | 10,00       | MH           | 89%  | 37 | 6.5m  |                                |
| R25   | 1.5m (Z_388)_3             | 68m     | 10,00       | SM           | 31%  | 38 |       |                                |
| R26   | 13m (SK-26)                | 116m    | 4,33        | ML           |      | 12 |       |                                |
| R26   | 3m (Z_270)                 | 96m     | 4,33        | MH           | 58%  | 21 | 10m   |                                |
| R26   | 3m (E_130)                 | 89m     | 4,33        | SM           | 47%  | 16 | 11.5m |                                |
| R26   | 3-6m (Z_784)               | 105m    | 4,33        | MH           | 69%  | 34 | 7m    |                                |
| R26   | 2m (Z_580)                 | 118m    | 4,33        | CH           | 57%  | 27 |       |                                |



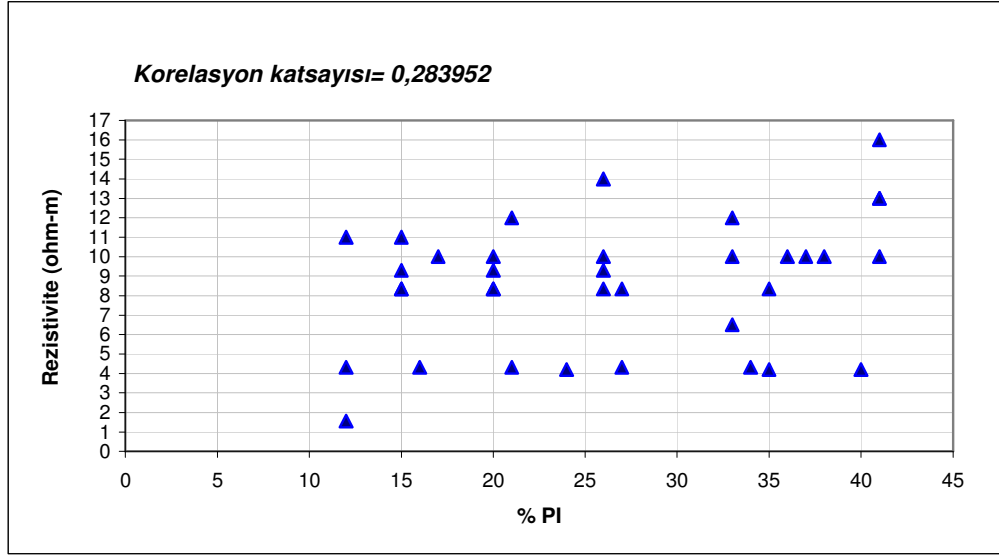
Bu çalışma kapsamında Şekil 3.6-8 deki grafikler, rezistivite değerleri ile zemin sınıfı, ince dane oranı ve plastisite indisi arasında korelasyon bulunmadığını göstermektedir. Laboratuvar deneylerinin yapıldığı derinliğin 13m ile sınırlı olmasının yanında, rezistivitelerin değişimi de 1-16 ohm-m gibi çok dar bir aralıkta kalmaktadır.



Şekil 3.6 Rezistivitenin zemin sınıfı ile değişimi



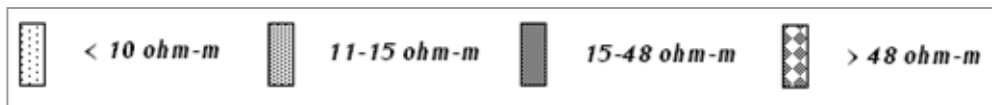
Şekil 3.7 Rezistivitenin ince dane oranı ile değişimi



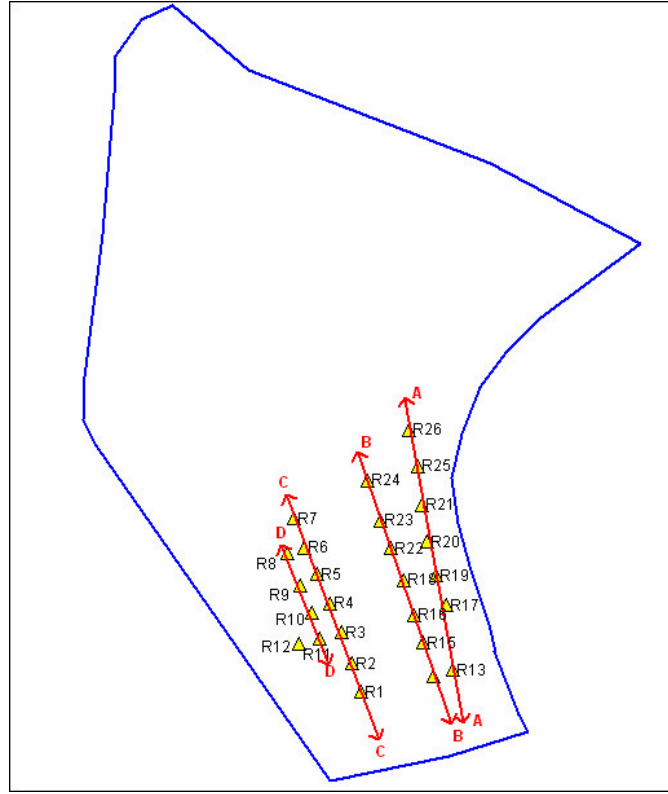
Şekil 3.8 Rezistivitenin plastisite indisi ile değişimi

İkinci aşamada; rezistivite profillerindeki değişimler, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'da görülen kesitler göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. BPH Bölgesinde rezistivite zıtlığının gözleendiği az sayıdaki tabaka dışında, tabakaların rezistivite değerlerindeki değişim 1ohm-m ile 33 ohm-m arasında kalmaktadır. 18-02 bölgesi için ise bu aralık 1 ohm-m ile 48 ohm-m arasındadır. Literatürdeki yaygın rezistivite değerlerine göre; bilinen kaya tipleri için rezistivite değer aralığı 10 ohm-m nin altına düşebilen jeolojik malzemelerin, kil zeminler, kumtaşları ve marn ile sınırlı olduğu söylenebilir.

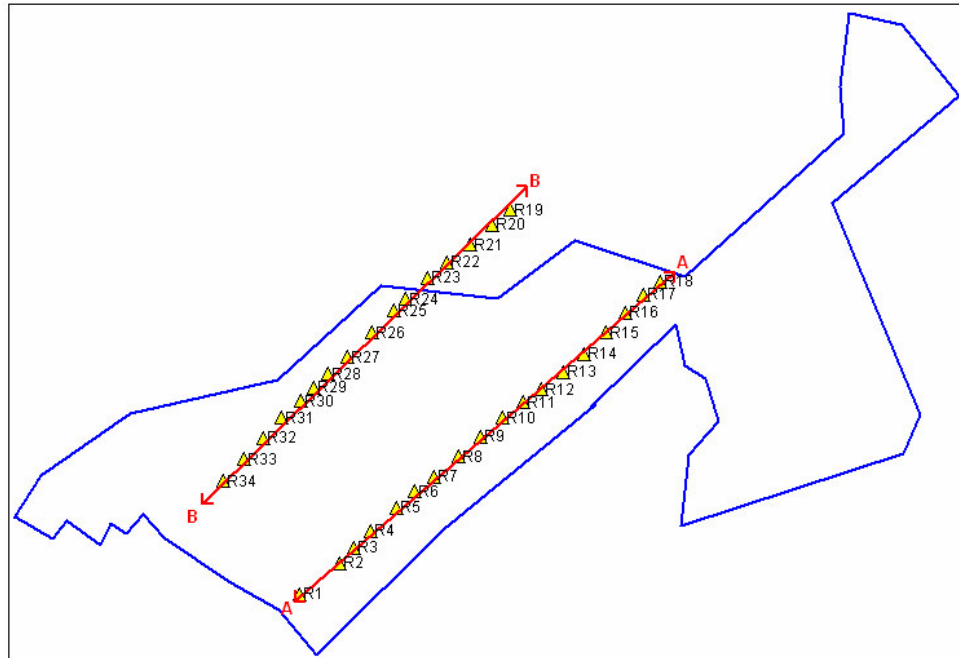
Bu doğrultuda, ilk olarak kesitlerdeki 10 ohm-m den düşük rezistiviteye sahip tabakalar belirlenmiştir. 10 ohm-m ye yakın değerlerin çokluğu nedeniyle, 11-15 ohm-m arası geçiş değer aralığını oluşturmaktadır. Diğer değer aralıkları ise genel olarak 15-48 ohm-m arasında değişen ve zıtlık yaratan 62-626 ohm-m arasındaki değerler olarak seçilmiştir (Şekil 3.9, Şekil 3.12-17).



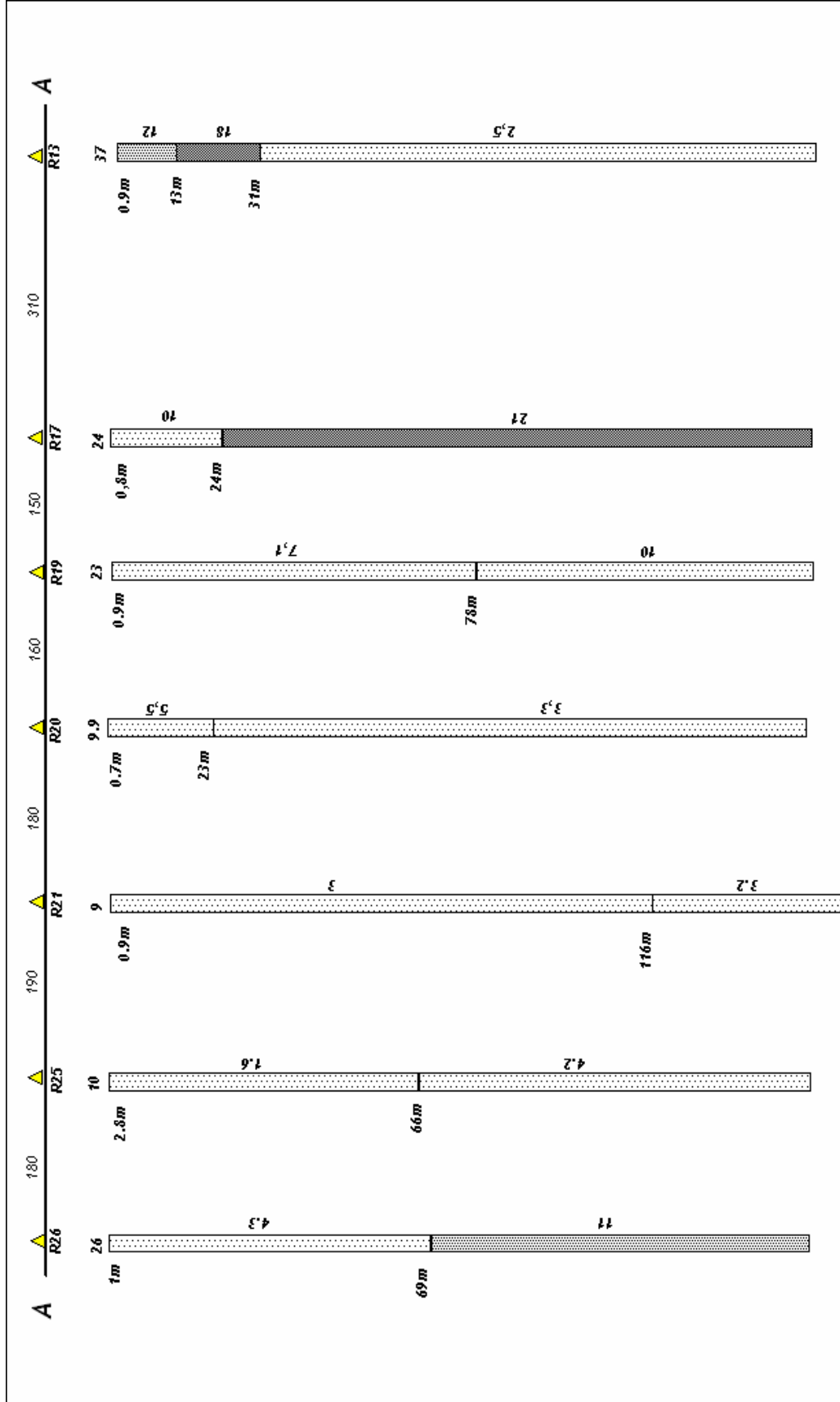
Şekil 3.9 Rezistivite profilleri için seçilen değer aralıkları



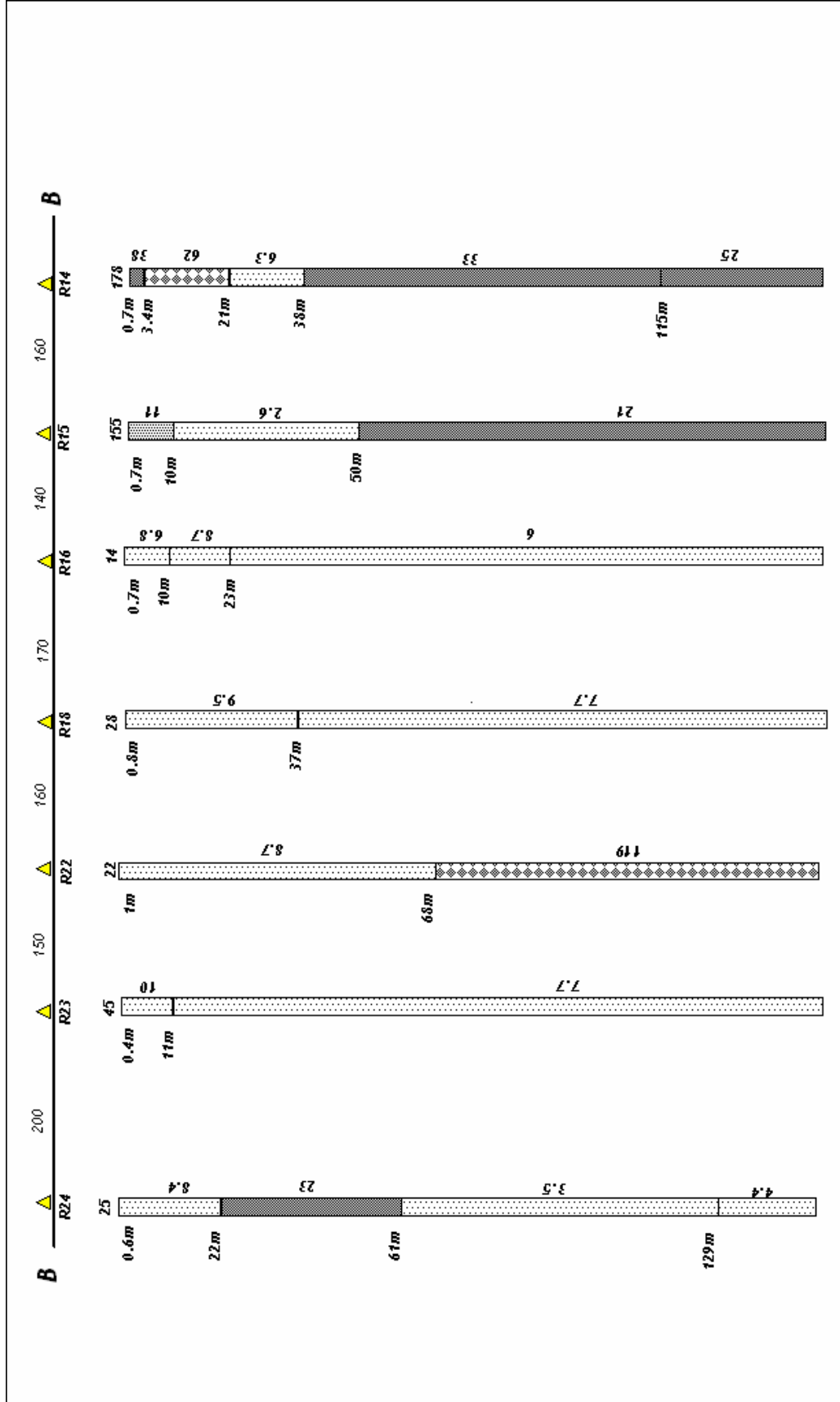
Şekil 3.10 BPH Bölgesi resistivite noktalarının oluşturduğu kesitler



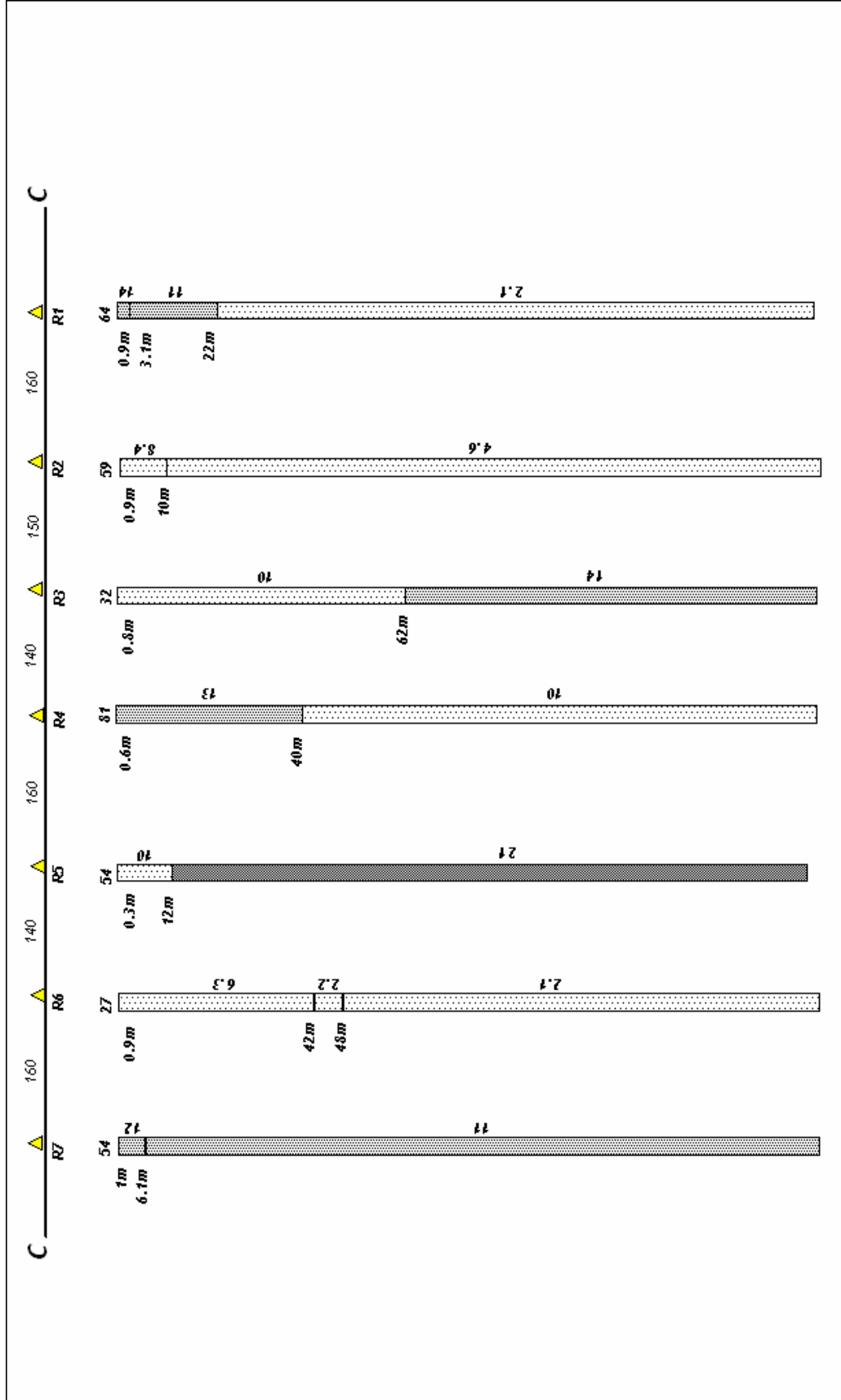
Şekil 3.11 18-02 Bölgesi resistivite noktalarının oluşturduğu kesitler



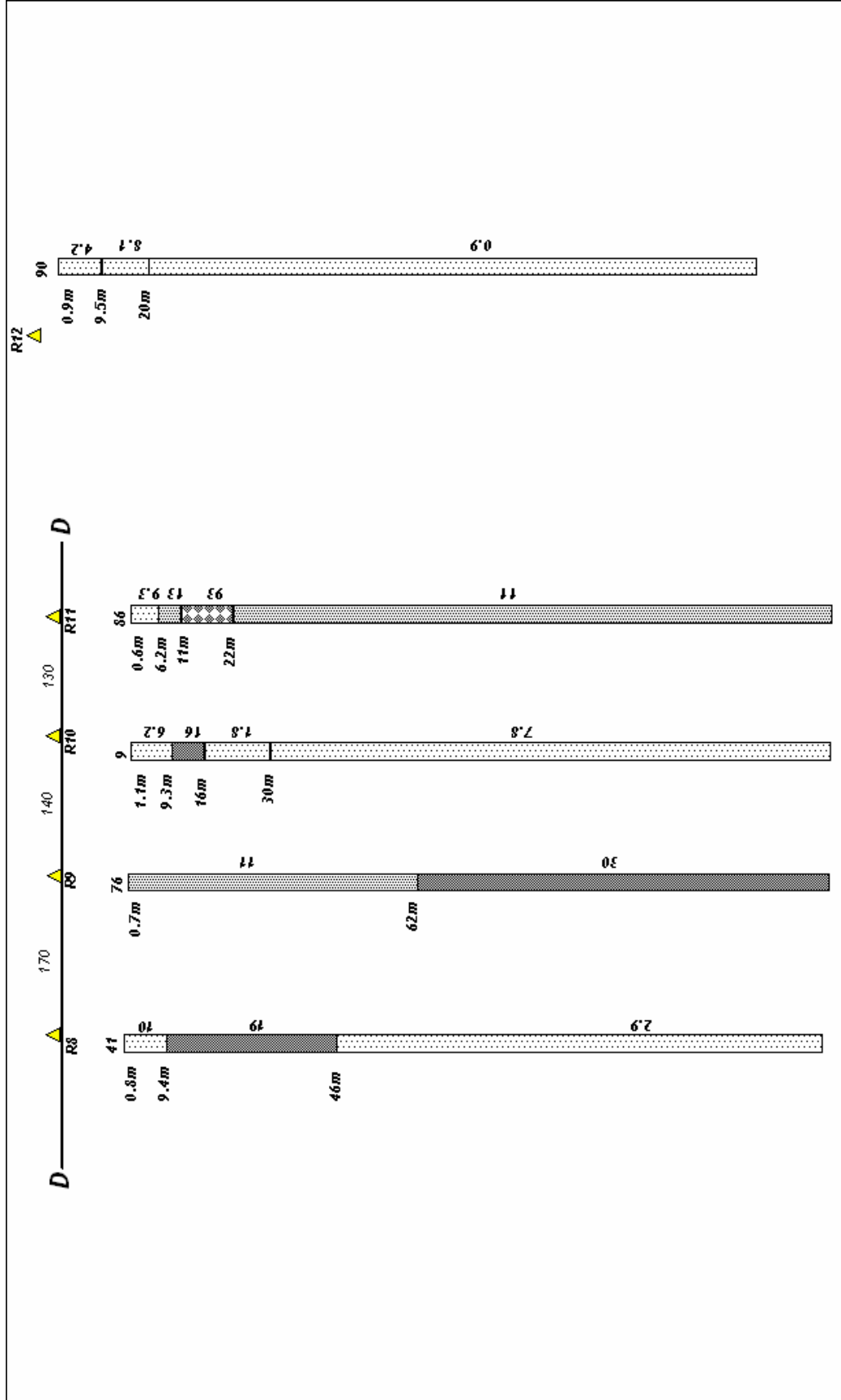
Şekil 3.12 BPH Bölgesi, A-A kesiti rezistivite profilleri



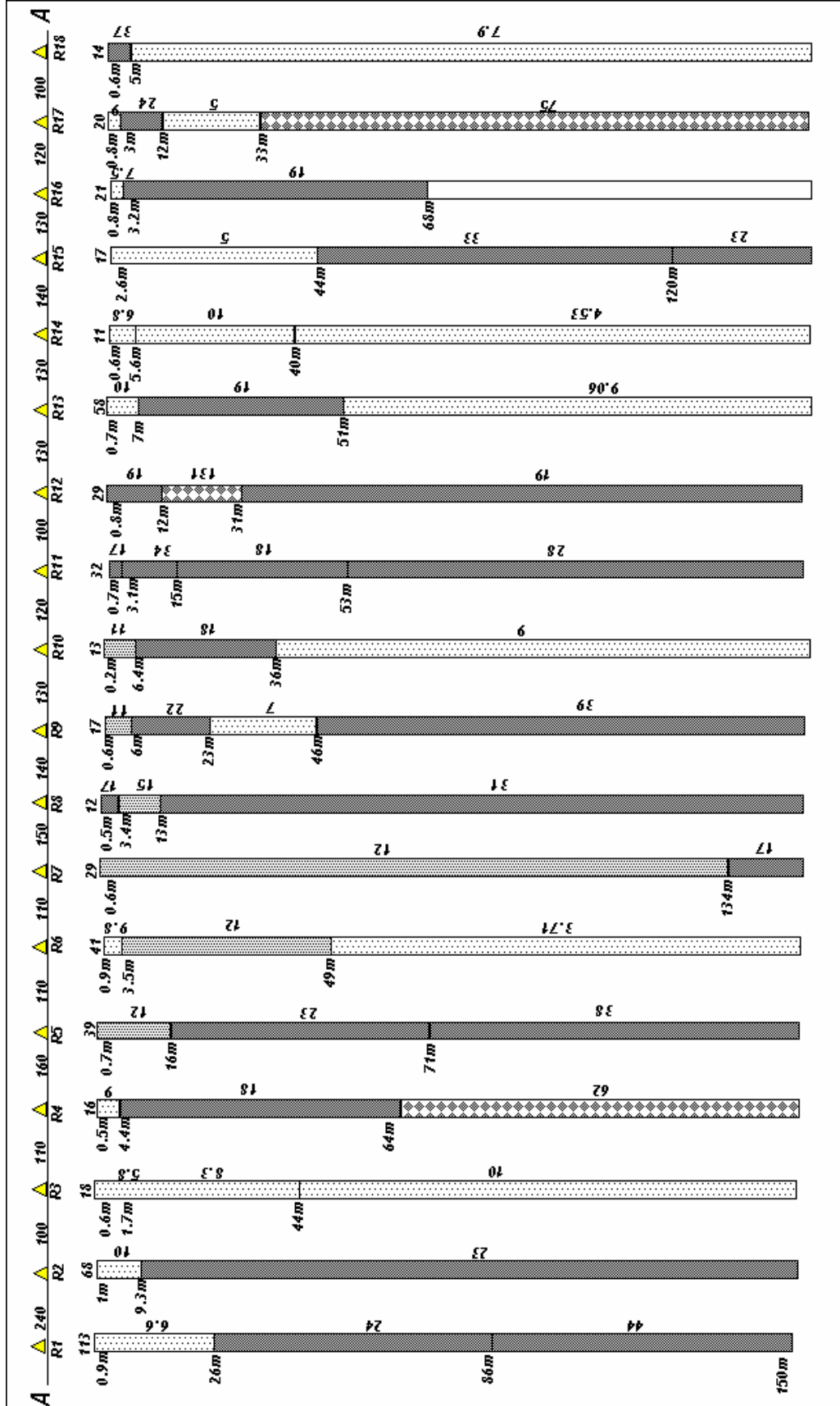
Şekil 3.13 BPH Bölgesi, B-B kesiti rezistivite profilleri



Şekil 3.14 BPH Bölgesi, C-C kesiti rezistivite profilleri

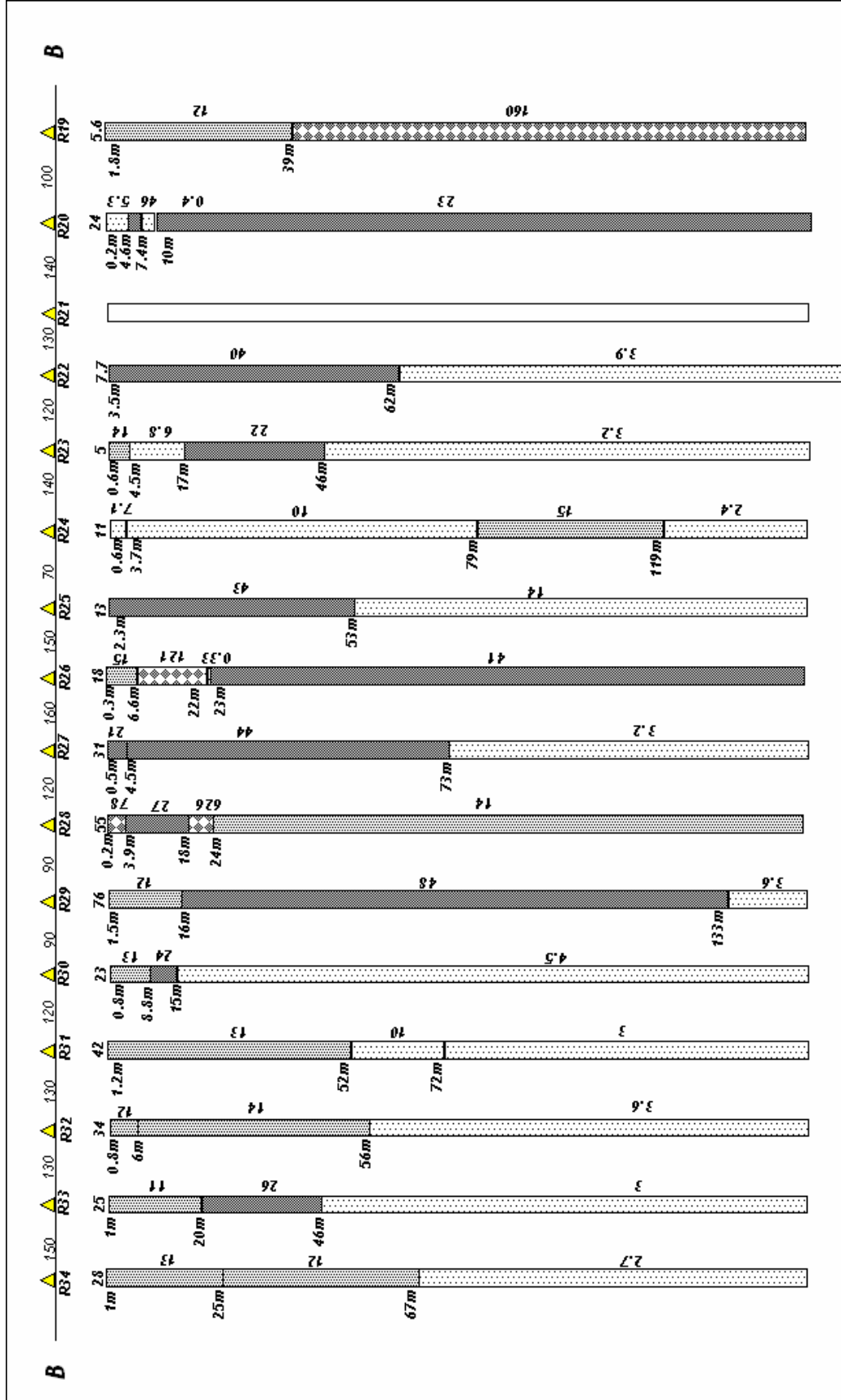


Şekil 3.15 BPH Bölgesi, D-D kesiti rezistivite profilleri



Şekil 3.16 18-02 Bölgesi, A-A kesiti rezistivite profilleri





Şekil 3.17 18-02 Bölgesi, B-B kesiti rezistivite profilleri

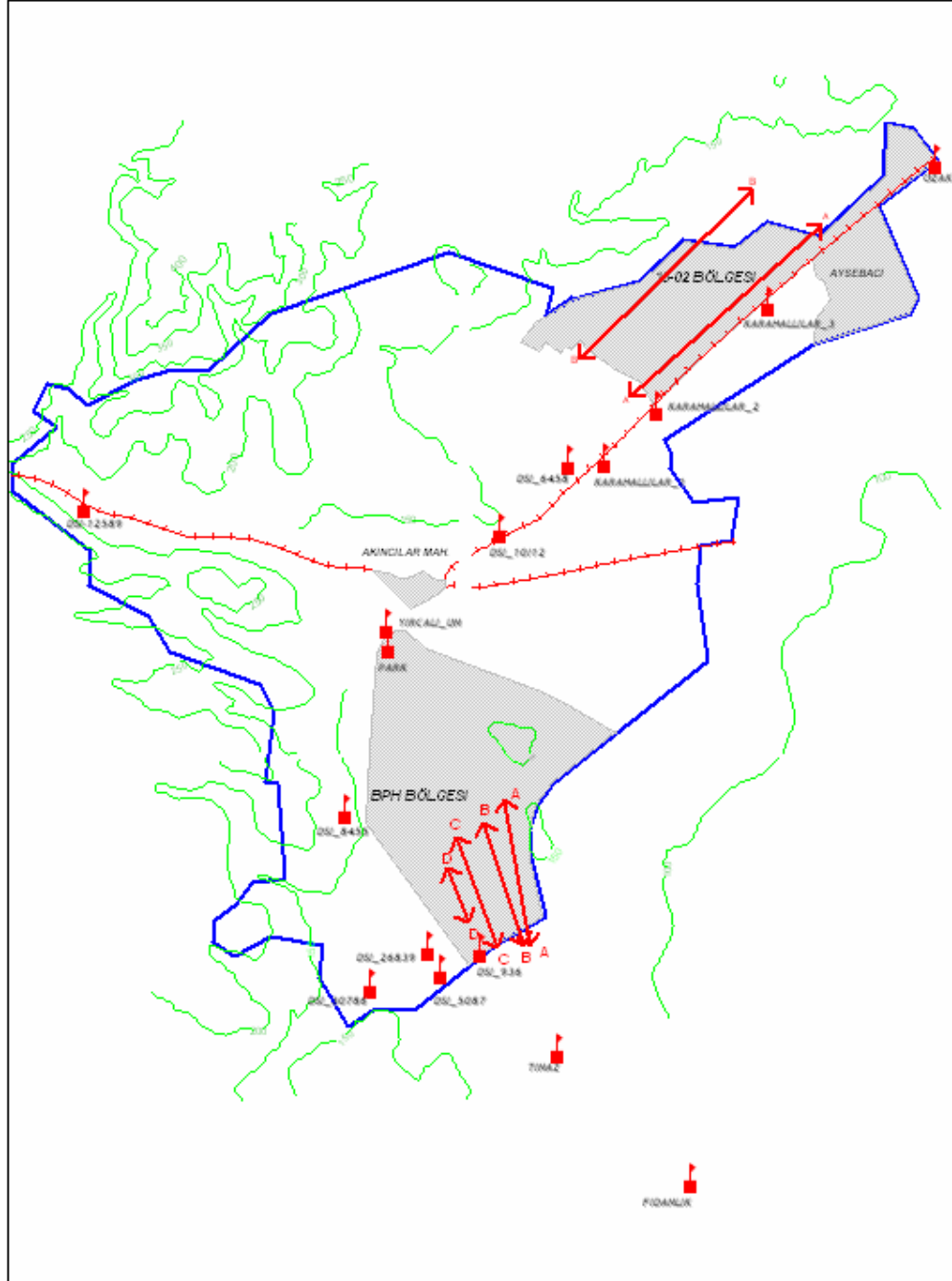
Her iki inceleme alanındaki rezistivite profillerinin, belirlenen kesitler doğrultusunda seçilen değer aralıklarına dayalı olarak incelenmesi sonucu, inceleme alanları ve kesitler arasında bazı farkların olduğu söylenebilir:

- BPH bölgesindeki toplam 26 profilde, rezistivitesi 10 ohm-m'nin altındaki tabakalar çoğunlukta iken, 18-02 bölgesindeki 34 profilde rezistivitesi 10 ohm-m' den küçük ve büyük tabakalar eşit orandadır.
- 18-02 bölgesi A-A kesitindeki profillerde, rezistivitesi 15-48 ohm-m olan tabakalar, B-B kesitine oranla daha fazladır.
- 18-02 bölgesi B-B kesitindeki profillerin çoğunda 46 m' den sonraki farklı derinliklerde, rezistiviteler 2,5- 4,5 ohm-m seviyelerine düşmektedir. Farklı olarak A-A kesitindeki profillerde rezistivitesi 4 ohm-m nin altında tabaka bulunmamaktadır.

Belirlenen bu bölgesel farklılıklar, derlenen jeolojik bilgiye dayalı olarak sorgulanabilir (Şekil 3.18). Derlenen çalışmalarda inceleme alanlarındaki jeolojik birimlerin tanımlanmasında farklılıklar olmasına karşılık, derin su sondajları ile sığ sondajlar arasında zemin sınıflarına dayalı olarak bir uyumsuzluk gözlenmemektedir.

18-02 bölgesi A-A kesiti ile aynı doğrultuda yakın iki derin sondajı (Karahallılar\_2, Karahallılar\_3) göz önüne alırsak; 10 ve 27 m'lik alüvyon tabakasının altında kumtaşı, çakıltaşı, aglomera birimlerinin baskın olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, A-A kesitindeki R1-R13 arasındaki profillerin çoğunda rezistiviteler 10 ohm-m'nin üstündedir. Karahallılar\_2 sondajına en yakın R1 profilinde, 27 m seviyesindeki rezistivite zıtlığının, alüvyondan sonra gelen çakıltaşı, kumtaşı, aglomera birimleri ile uyumlu olduğu düşünülebilir. Karahallılar\_3 sondajına yakın R11, R12 ve R23 profilleri için de tabaka sınırları ile birlikte benzer bir uyum görülmektedir.

BPH bölgesine en yakın üç sondaj için (Yırcalı\_un, Park, DSİ936) 6-8m'lik alüvyon tabakasının altında killi zeminlerin hakim olduğu ve 50-70m seviyesinin altında marn-kireçtaşı ve marn-tüfit aralanması olarak tanımlanan birimlerin yer aldığı belirlenmişti. Bu durum bölgedeki profillerin tamamına yakın bir bölümünde rezistivitelerin 10 ohm-m'nin altında olması ile uyumlu görülmektedir.



Şekil 3.18 Rezistivite profili kesitlerinin ve derin sondajların Balıkesir Belediyesi sınırları içindeki yerleşimi

### 3.4 Sonuçlar

Balıkesir yerleşim alanı sınırları içinde, farklı ölçeklerde jeolojik çalışmalar içeren iki ayrı kaynak bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, topoğrafik olarak daha yüksek olan bölgelerdeki jeolojik birimler, Neojen yaşlı volkanik kayalar olarak tanımlanmaktadır. BPH ve 18-02 Bölgesi ile Akıncılar mahallesinden oluşan inceleme alanları, şehrin topoğrafik olarak düz kısmında yer almaktadır ve bu bölgeler için yapılan litolojik tanımlamalar iki ayrı kaynak için farklılıklar göstermektedir. MTA kaynaklı çalışmalar, inceleme alanlarının tümü için yüzeydeki birimleri alüvyon olarak tanımlarken, yerleşime uygunluk amaçlı alışmalar, BPH ve 18-02 Bölgelerinin büyük bir kısmının Neojen sediment birimlerle (tüfit) kaplı olduğunu belirtmektedir.

Jeolojik çalışmalara ek olarak derlenen, Balıkesir merkezindeki DSİ ve MTA’ dan alınan 16 derin su sondajı da, doğal olarak, detay seviyesi ve litolojik tanımlamalarda farklılık göstermektedir. 18-02 Bölgesi yakınındaki MTA kaynaklı 4 sondaja göre, yüzeyden itibaren 10m ile 27m arasında değişen derinliklerde alüvyon tabakası, altında ise aglomera, kumtaşı ve çakıltası ardalanması gözlenmektedir. Tüfit, kumtaşı ve aglomera ile ardalanmalı olarak 25 m ile 75 m arasında değişen derinlik seviyelerinde görülmektedir. BPH Bölgesi sınırındaki sondajlardan, 6-8 m lik alüvyon tabakasının altında killi zeminlerin hakim olduğu ve 50-70 m seviyelerinde marn-kireçtaşı ve marn-tüfit ardalanması olarak tanımlanan birimlerin başladığı söylenbilir.

Jeolojik malzemeler ve kayalar için yaygın rezistivite değerlerindeki değişimler incelendiğinde; zeminler için boşluk suyunun miktarı ve niteliği yanında etkili diğer bir parametre olarak “kil içeriği” gözlenmektedir. Genel olarak yüksek kil içeriği, kayanın rezistivitesini dşurmektedir. BPH Bölgesinde, tabakaların rezistivite değerleri ile zemin sınıfı, ince tane oranı ve plastisite indisi arasındaki ilişkiler incelenmiş ve korelasyon bulunamamıştır. Tekil sondaj profilleri ile oluşturulan düşey kesitlerdeki, seçilen değer aralıkları için rezistivite zıtlığı jeolojik veri ile birlikte yorumlanmaya çalışılmıştır. Seçilen değer aralıkları ile genel olarak, rezistivitesi 10 ohm-m’ nin altında ve üstünde olan jeolojik malzemenin ayrılması

amaçlanmıştır. Bu aşamada, literatürdeki rezistivite değerlerine dayalı olarak yüksek kil içeriğine sahip zeminlerde rezistivitenin 10 ohm-m' nin altında olacağı varsayılmaktadır. BPH ve 18-02 Bölgelerindeki kesitler bu kriter doğrultusunda bazı farklılıklar göstermektedir. BPH bölgesindeki profillerin çoğunda, tabakaların rezistiviteyi 10 ohm-m'nin altındaki iken, 18-02 bölgesinde rezistivitesi 10 ohm-m' den küçük ve büyük tabakaların eşit bir dağılımda oldukları görülmektedir. Bu sonuçların, derin sondajlardaki litolojik tanımlamalara dayalı olarak belirlenen bölgesel farklılıklar ile de uyumlu olduğu düşünülebilir. Çünkü BPH Bölgesi yakınındaki derin sondajlarda killi zeminler hakim iken, 18-02 Bölgesindeki derin sondajlardaki benzer seviyelerde kil içeriği daha düşük olan birimler gözlenmektedir.

## **4. GEOTEKNİK MODELLEME**

### **4.1 Giriş**

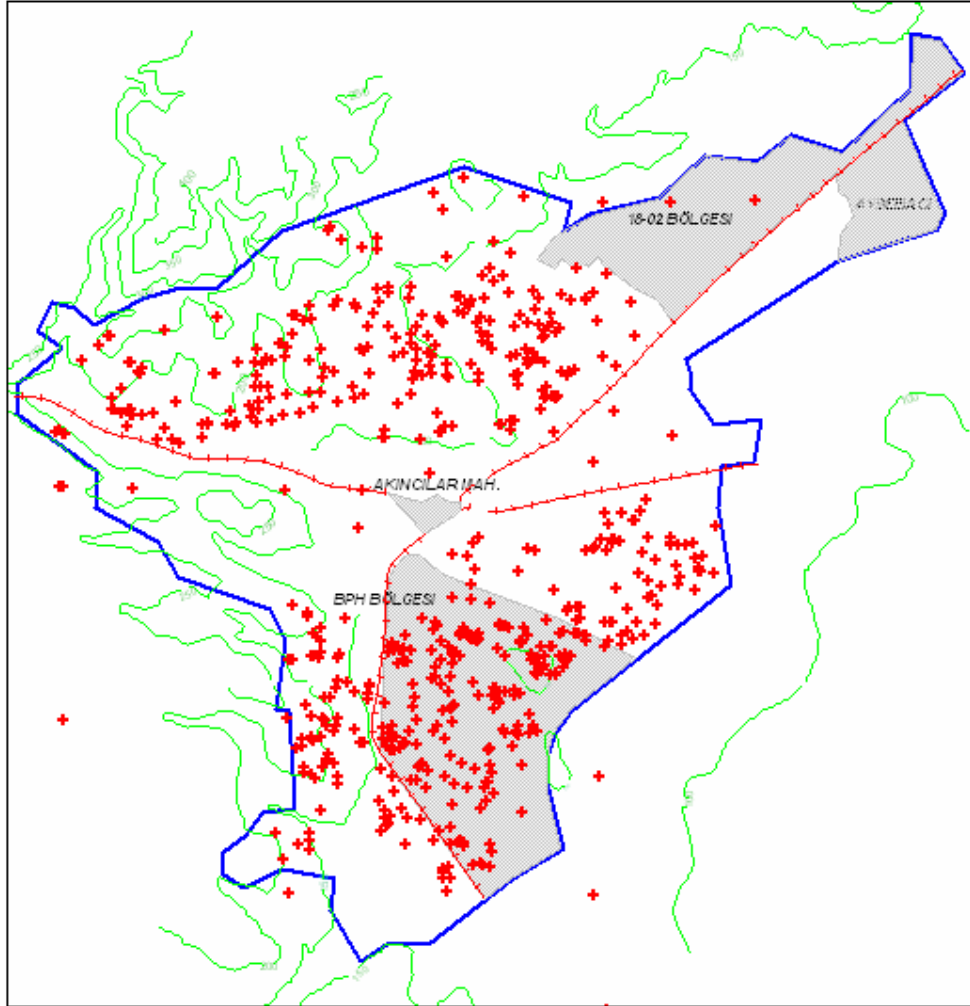
Balıkesir yerleşim alanı sınırları içinde, BPH Bölgesi, 18-02 Konut Bölgesi ve Akıncılar Mahallesi inceleme alanlarındaki geoteknik veritabanı, iki farklı kaynaktaki mevcut verilere dayanmaktadır. Geoteknik modelleme, seçilen hücre sistemi ile karelere ayrılan inceleme alanlarında, her hücrenin ortasına atanacak bir temsili zemin profilinin belirlenmesini kapsamaktadır. Belirlenen hücre boyutları, mevcut veri dağılımıyla uyumlu olarak düzenlenmekte ve seçilen konum hassasiyetine bağlı olarak çalışmanın ölçeğini belirlemektedir.

### **4.2 Mevcut Geoteknik Veri**

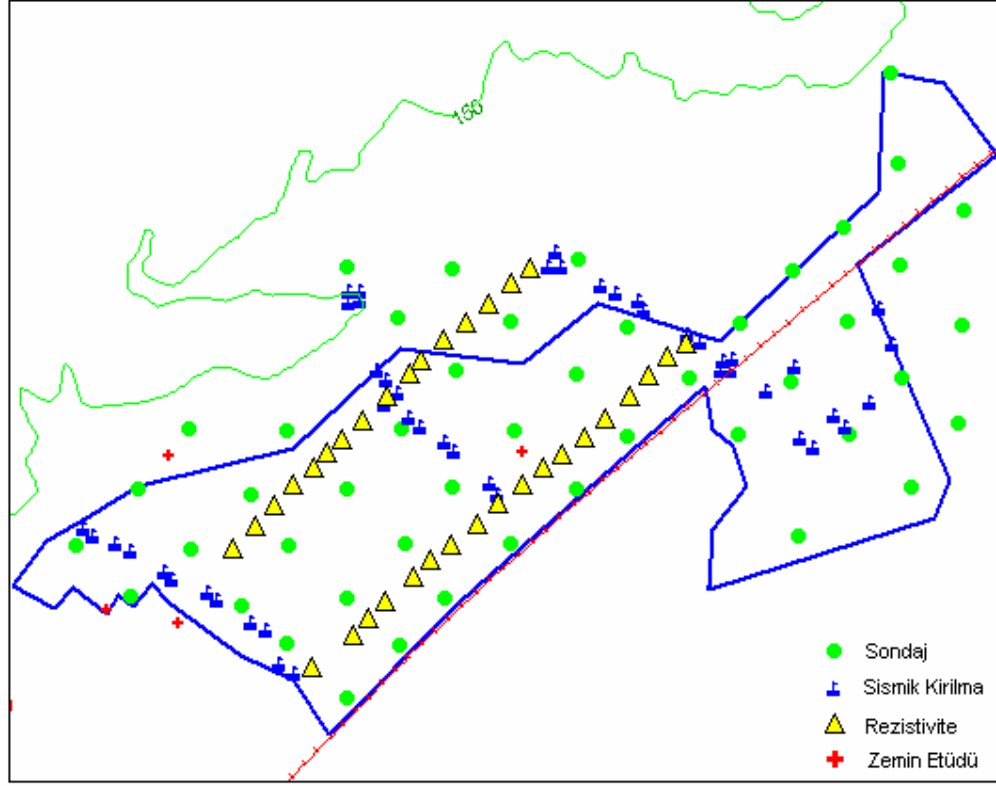
Balıkesir Belediyesi sınırları içindeki mevcut geoteknik veriler farklı iki kaynaktan sağlanmıştır. Bu kaynakların ilki, Şekil 4.1’de taralı olarak gösterilen inceleme alanlarında (BPH Bölgesi, 18-02 Bölgesi, Akıncılar Mahallesi), Balıkesir Belediyesi için yapılan yerleşime uygunluk çalışması [1] kapsamındaki, sismik kırılma ve rezistivite deneyleri ile homojen bir dağılımdaki sondajlar ve SPT deneylerini içermektedir. Diğer kaynak, Belediye sınırları içinde özel şirketler tarafından yapılmış toplam 802 zemin etüdünün derlenmesi ile oluşturulmuştur. Bu kaynaktaki zemin etüdülerinin dağılımı Şekil 4.1’ de görülmektedir. Her iki kaynağa ait verilerin bulunduğu tek inceleme alanı BPH bölgesidir. Dolayısıyla planlanan mikrobölgeleme çalışmaları için göz önüne alınan iki büyük inceleme alanındaki (18-02 Bölgesi ve BPH Bölgesi) veri tabanları farklılık göstermektedir.

İnceleme alanlarında iki farklı kaynaktan sağlanan verilerin dağılımı Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir. İnceleme alanlarında, 1. kaynak sondajları homojen bir dağılım göstermektedir. 18-02 konut bölgesinde sismik kırılma deneyleri 3 ayrı

hat, resistivite deneyleri ise bunlara dik 2 hat üzerinde düzenlenmiştir. BPH bölgesinde ise; sismik kırılma deneyleri inceleme alanının tamamını kapsamasa da homojen bir dağılımda iken, rezistivite deneyleri inceleme alanının güneyinde kısıtlı bir alanda yer almaktadır. BPH bölgesinde farklı şirketler tarafından yapılmış 228 zemin etüdü yer alırken, 18-02 konut bölgesinde 2 zemin etüdü bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Balıkesir Belediyesi sınırları içindeki mevcut geoteknik veri kaynaklarının dağılımı (taralı alanlar 1. kaynak verisinin yerlerini, + sembolü noktalar ise 2. kaynaktaki zemin etüd noktalarını göstermektedir)

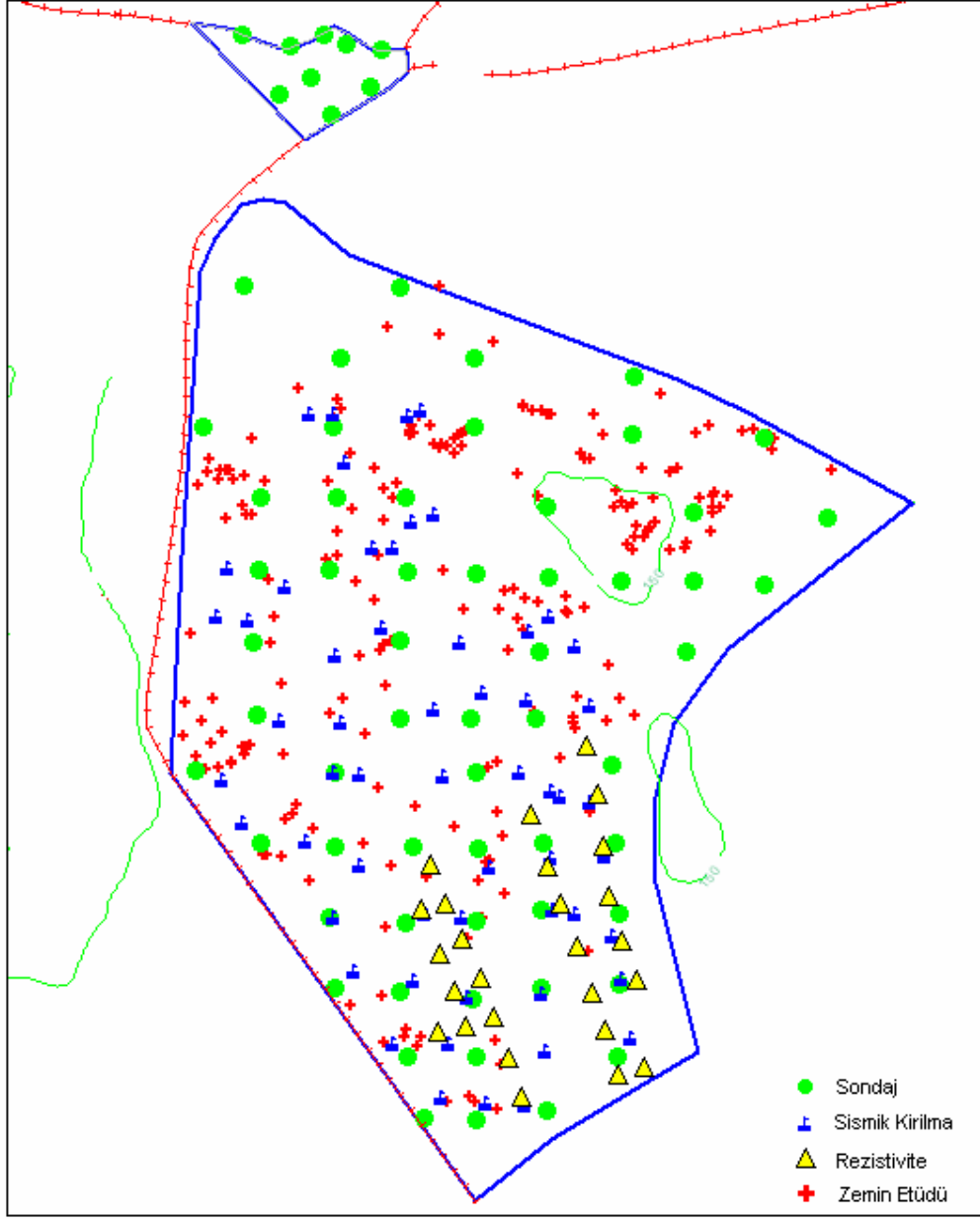


Şekil 4.2 18-02 Konut Bölgesinde mevcut verinin dağılımı

BPH bölgesindeki derlenen 228 zemin etüdünün çoğu; 5 m ile 10 m arasında bir sondaj, ortalama ilk 5-6 metre ile sınırlı kalan 3-4 noktada SPT deneyi, en fazla 3 veya 4 noktada zemin sınıflandırma deneyleri (granülometri ve kıvam limitleri) ve zemin cinsi ile bağlantılı olarak bir nokta için serbest basınç ve/veya konsolidasyon deneylerini içermektedir. 228 etüd, toplam 802 etüd arasındaki BPH bölgesi için Nisan 2003 tarihi itibarıyla güncellenen miktarı göstermektedir. 250-500 m aralıklarla düzgün yayılı olarak düzenlenmiş olan 1. kaynaktaki sondajlar ise ortalama 15 m derinliğinde olup, çok az sayıda laboratuvar deneyi ve ortalama 10-15 m lik SPT deneylerini kapsamaktadır.

Belirli boyutlardaki hücre sisteminde çalışılması planlanan inceleme alanlarında, verilerin farklı yoğunlukta ve dağılımda olması, tipik zemin profillerinin oluşturulmasında ortak bir yaklaşımın belirlenmesini güçleştirmektedir. Mikrobölgeleme çalışması için seçilen hücre boyutları, mevcut veri dağılımıyla uyumlu olarak düzenlenmekte ve seçilen konum hassasiyetine bağlı olarak çalışmanın ölçeği belirlenmektedir.





Şekil 4.3 BPH Bölgesinde mevcut verinin dağılımı

### 4.3 Geoteknik Modelleme

Yerel zemin şartlarının sayısal analizler için geoteknik olarak modellenmesi aşamasında, seçilen hücre sistemi ile karelere ayrılan inceleme alanlarında, her hücrenin ortasına atanacak bir temsili zemin profili belirlenmektedir. Bu yaklaşımın

arkasında iki temel neden yatmaktadır: (1) zemin profili ile ilgili daha kapsamlı ve güvenilir bilgi elde etmek için hücre içindeki tüm verileri kullanmak; (2) haritalamada, sondajlar ve/veya araştırma noktaları arasındaki farklı uzaklıklardan kaynaklanan etkileri ortadan kaldırmak [8]

Zemin profillerinin geoteknik olarak modellenmesi, farklı yöntemlere dayalı arazi ve laboratuvar deney sonuçlarının birleştirilmesini sağlayacak bir yaklaşımın belirlenmesini gerektirmektedir. Kapsamlı arazi ve laboratuvar deneylerine dayalı bir çalışmada [114], bir boyutlu zemin profillerinin oluşturulmasındaki prosedür; farklı arazi deneylerinden elde edilen  $V_s$  profillerine dayalı olarak başlangıç profillerinin dizaynı ve bu profillerin sondajlara, SPT deneylerine ve zemin sınıflandırmalarına göre düzenlenmesi aşamalarını içermektedir. Raptakis vd. [57] tarafından aynı bölgedeki diğer bir çalışmada; jeolojik ve geoteknik veri, dinamik davranış modelinin gerektirdiği en uygun parametre cinsinden tekrar yorumlanmakta ve sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Çalışma, veri sentezindeki farklı kriterlerin ve ölçümlerin farklı analizinin, zemin davranış modellerinde değişikliğe neden olabileceğini ve sonuç olarak detaylı bir veri tabanı durumunda bile yorumlanan model sonuçlarının değişebileceğini vurgulamaktadır.

Diğer taraftan yetersiz veri tabanı, geoteknik modelleme aşamasında farklı yaklaşımların denenmesini gerektirebilir. Literatürde, zemin karakteristiklerindeki dolayısıyla dinamik davranışlarındaki değişkenliğin neden olduğu belirsizlikleri, pik ivme (PGA) veya spektrum şiddeti cinsinden istatistiksel olarak değerlendiren çalışmalar bulunmaktadır. [115,116]

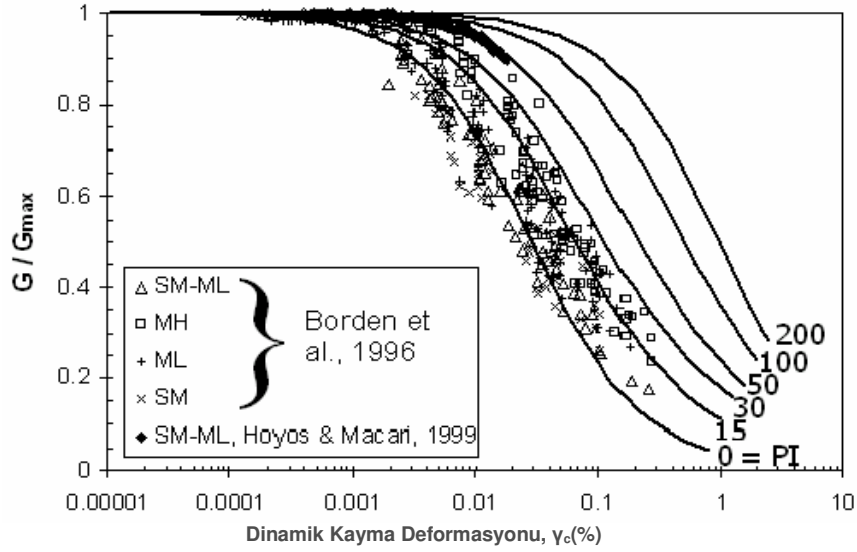
Modellenen profillerdeki zeminlerin lineer olmayan davranışının, tekrarlı prosedüre dayalı eşdeğer lineer yaklaşımlarla belirlenmesinde, kayma modülü ve sönüm oranlarının kayma deformasyonuna bağlı olarak değişiminin bilinmesi gereklidir. Literatürde, kayma modülü oranı ( $G/G_{max}$ ) ve sönüm oranının kayma birim deformasyonu ile değişimi cinsinden, farklı zeminlerin dinamik davranışlarını modelleyen eğriler önerilmektedir.

Geoteknik deprem mühendisliğinin ilk yıllarında iri ve ince daneli zeminlerin gerilme-deformasyon davranışları ayrı ayrı değerlendirilirken; son araştırmalar, plastik olmayan iri daneli zeminler ile plastik ince daneli zeminlerin dinamik davranışları arasında kademeli bir geçiş olduğunu göstermektedir [16].

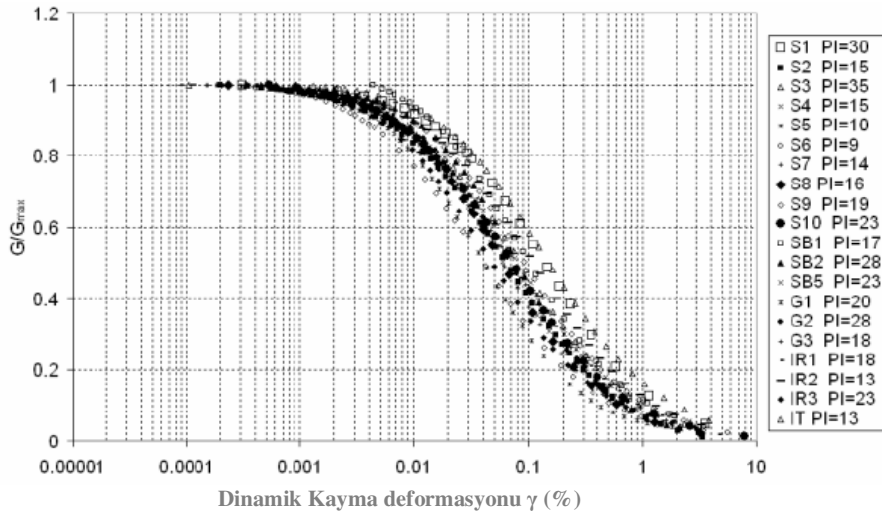
Vucetic ve Dobry [117], 1985 Michoacan depremindeki Mexico City kilinin performansının değerlendirildiği bir araştırma sonuçlarına dayalı olarak, kayma modülü ve sönüm oranı eğrilerini, plastisite indisinin fonksiyonu olarak önermektedirler. Sun, Golesorkhi ve Seed [118] tarafından geliştirilen modeller, plastisite indisine dayalı olarak 5 ayrı eğri içermektedir. Özellikle düşük plastisiteli zeminlerin kayma modülü ve sönüm özelliklerinin, efektif çevre basıncından etkilenmeleri nedeniyle; Ishibashi ve Zhang [119] model eğrileri, bu iki parametreye dayandırılmıştır. Seed ve Idriss [120] tarafından kumlar için geliştirilen eğriler üç farklı sınırdadır. Çakıllar için Seed vd. [121], kayalar için ise Schnabel vd. [122], tarafından geliştirilen eğriler kullanılabilmektedir.

Şekil 4.4’de, volkanik ve metamorfik kayaların aşınması sonucu yerinde oluşmuş Piedmond zemininin dinamik özelliklerinin incelendiği iki farklı çalışmanın sonuçları, Vucetic ve Dobry [117]  $G/G_{max}$  eğrileri ile birlikte gösterilmektedir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre SM-ML, SM, MH ve ML olmak üzere 4 farklı grupta tanımlanan Piedmont zemini dinamik davranışının, literatür ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmektedir [123].

Şekil 4.5’deki, Türkiye’nin farklı bölgelerine ait numuneler için dinamik üç eksenli deney sonuçlarına dayalı olarak elde edilen  $G/G_{max}$  eğrileri, plastisite indisinin dinamik kayma modülü üzerindeki etkisinin değerlendirildiği farklı bir çalışmanın [124] sonucudur. Zemin tipi MH, CL ve CH olarak belirlenen 20 adet numunenin kullanıldığı çalışmada,  $G/G_{max}$  eğrisi için plastisite indisine dayalı ampirik bir ilişki önerilmektedir.



Şekil 4.4 Vucetic ve Dobry' nin [117] plastisite indisine dayalı  $G/G_{max}$  eğrileri ile karşılaştırılan, Piedmond zemini laboratuvar deney sonuçları

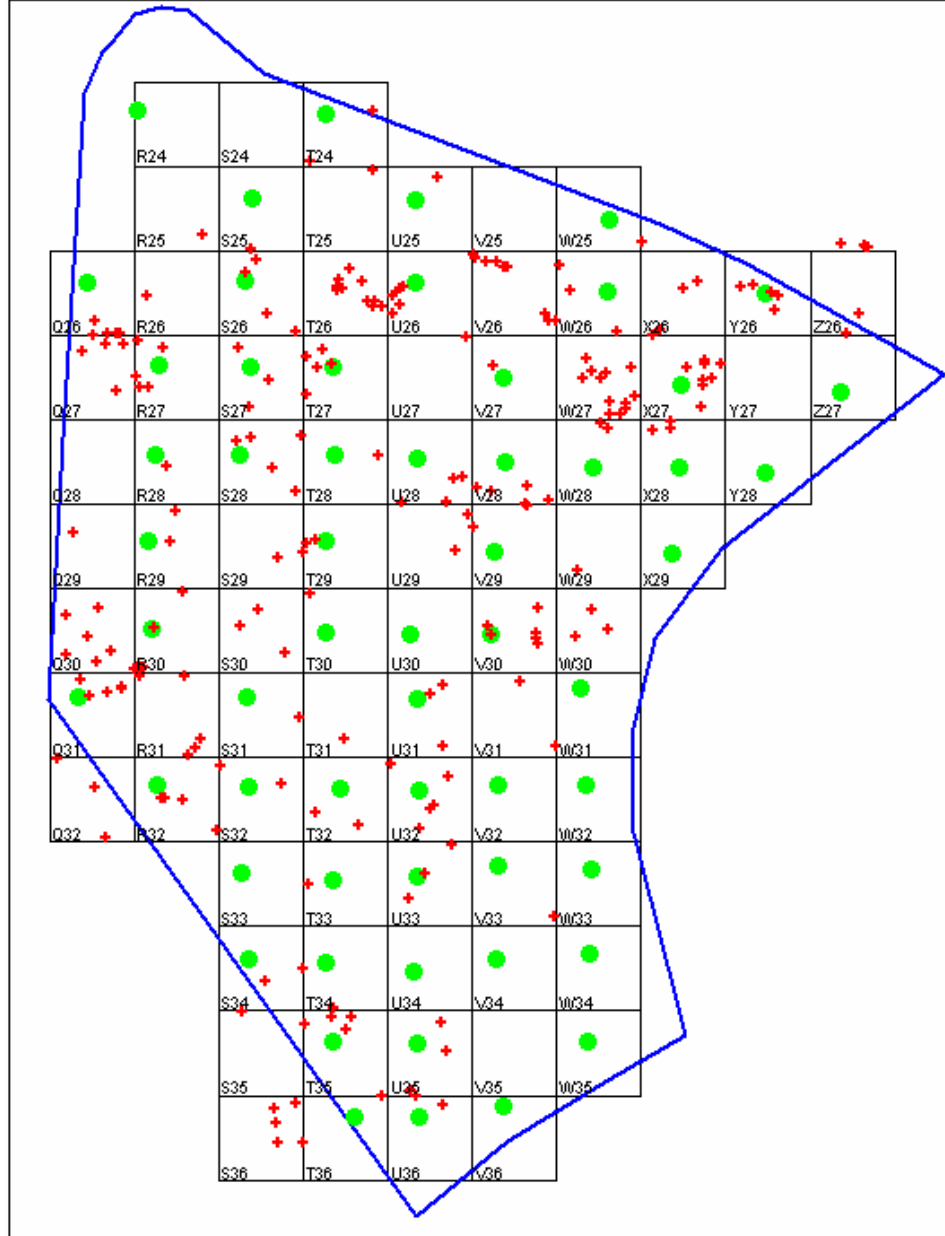


Şekil 4.5 Türkiye'nin farklı bölgelerine ait zemin numuneleri için dinamik üç eksenli deney sonuçlarına dayalı  $G/G_{max}$  eğrileri [124]

#### 4.3.1 BPH Bölgesi Temsili Zemin Profillerinin Modellenmesi

İlk veri kaynağında, ortalama 15m derinliğinde, 250-500 m aralıklarla düzgün yayılı olarak düzenlenmiş, ortalama 10-15 m lik SPT deneyleri ve çok az sayıda laboratuvar deneyi içeren 58 sondaj bulunmaktadır. 227 zemin etüdünün yer aldığı ikinci kaynaktaki sondajlar, genel olarak 7-8 m derinliğinde olup ilk 4-5 m de

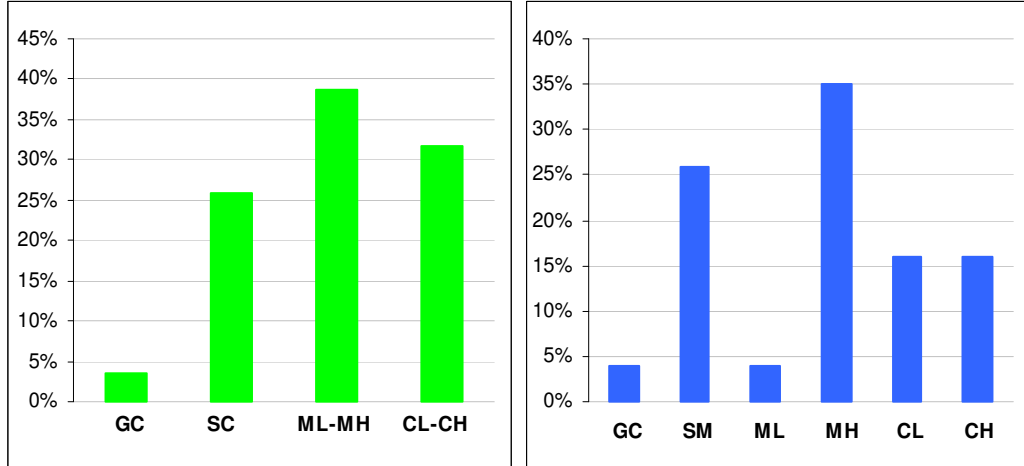
yoğunlaşan, zemin sınıflandırmasına yönelik çok sayıda laboratuvar deneyleri içermektedir. Bu sondajların bir kısmında 2 veya 3 noktada SPT deneyi de bulunmaktadır. BPH bölgesindeki bu verilerin dağılımına dayalı olarak, 500 m, 250 m ve 100 m boyutlarında karelaj sistemleri oluşturulmuş ve mevcut veri kaynaklarına dayalı olarak en uygun hücre boyutu 250 m olarak belirlenmiştir (Şekil 4.6).



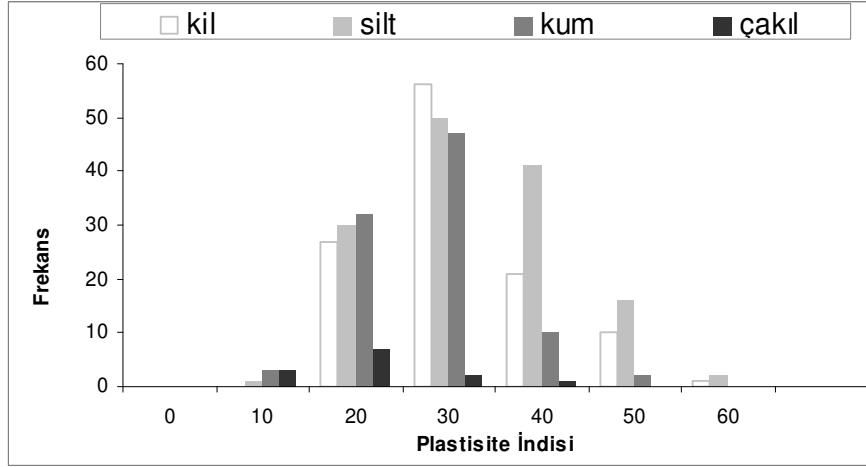
Şekil 4.6 BPH bölgesinde belirlenen 250\*250 m boyutlu hücrelerdeki verilerin dağılımı (1. kaynak sondaj noktaları • sembolü ile ve 2. kaynaktaki zemin etüd noktaları + sembolü ile gösterilmektedir)

86 hücrenin 5 tanesinde hiç veri bulunmamaktadır. Tek bir sondaj ya da zemin etüdü bulunan hücrelerin sayısı 26, en fazla 3 farklı verinin bulunduğu hücre sayısı 30 ve veri sayısı 3 tanenin üzerinde olan hücre sayısı 25 olup, bu farklı veri sayısına sahip hücrelerin dağılımının da karışık olduğu gözlenmektedir.

İkinci kaynaktaki zemin etüdüleri, üst tabakalarla sınırlı olmakla birlikte, zemin sınıflandırmasına yönelik olarak granülometri ve kıvam limitlerinin belirlendiği 362 laboratuvar deneyi içermektedir. Deney sonuçlarına göre zeminlerin % 70' ini, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine dayalı olarak ML, MH, CL, CH sınıfındaki kil ve silt zeminler, % 26' sını SC sınıfındaki kumlar ve % 4' ünü çakıllar oluşturmaktadır (Şekil 4.7). Aynı zamanda, kum zeminlerdeki ince dane oranı genel olarak %30 un üstünde ve hatta %50 ye yakın ve aynı şekilde kil zeminlerdeki kum oranı da %30 ile %50 arasında kalmaktadır. %71'i kil-silt ve %26'sı %30' un üstünde kil içeren kum olarak dağılım gösteren bu zeminlerin plastisite indisleri 10 ile 50 arasında değişmektedir (Şekil 4.8).

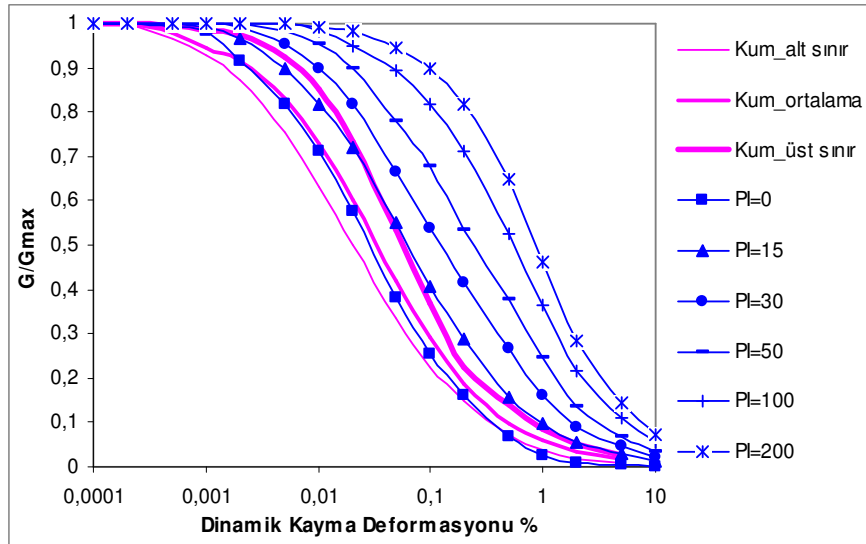


Şekil 4.7 Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre tanımlanan BPH Bölgesindeki zeminlerin dağılımı



Şekil 4.8 BPH bölgesindeki zeminlerin plastisite indislerinin frekans dağılımı

Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine dayalı olarak sınıflandırılan ve ince tane oranı % 30 un üstünde olan kumların plastisite indisleri 20 ile 50 arasında değişmektedir. Ancak literatürdeki kumların dinamik davranışlarını modelleyen eğrilerin, plastisite indisi en fazla 15 olan zeminler olarak yorumlanabileceği söylenebilir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Vucetic ve Dobry [117] tarafından plastisite indisinin fonksiyonu olarak önerilen kayma modülü eğrilerinin, kumlar için Seed ve Idriss [120] tarafından önerilen eğriler ile karşılaştırılması

Kil ve silt olarak tanımlanan zeminlerdeki kum oranının da %30 ile %50 arasında değiştiğini göz önüne aldığımızda, zeminlerin ve dinamik davranış modellerinin farklı bir sınıflandırmaya dayalı olarak tanımlanmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür. Geoteknik deprem mühendisliğinin ilk yıllarında iri ve ince taneli zeminlerin gerilme- deformasyon davranışları ayrı ayrı değerlendirilirken; son araştırmaların, plastik olmayan iri taneli zeminler ile plastik ince taneli zeminlerin dinamik davranışları arasında kademeli bir geçiş olduğunu göstermesi de modelleme aşamasında farklı kriterlere duyulan ihtiyacı desteklemektedir [16].

Seed vd. [125] tarafından sismik analizler için önerilen sınıflandırma sisteminde zeminler, ince tane oranının % 30 dan fazla ( $15 \leq PI \leq 90$  kohezyonlu) ve % 30 dan az (kohezyonsuz) olduğu iki ayrı grup altında değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, İngiliz Zemin Sınıflandırma Sistemine göre, silt ve kil tanımlı zeminlerde ince tane oranı % 35 ile % 100 arasında kalmaktadır.

Bu doğrultuda, dinamik davranış modelleri de göz önüne alınarak, BPH bölgesi için temsili zemin profillerinin modellenmesi aşamasında uygulanacak yaklaşımlar belirlenmiştir. Tablo 4.1’de bu yaklaşıma dayalı olarak ortaya çıkan zemin grupları ve seçilen dinamik davranış modelleri gösterilmektedir. Modellemede, kil-silt oranı % 30 un üstünde olan zeminler kil olarak tanımlanmakta ve plastisite indislerine göre gruplanmaktadır (Tablo 4.2).

Tablo 4.1 Geoteknik modelleme için belirlenen zemin grupları

| Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sisteminde tanımlanan zeminler | Zemin grupları           | Dinamik Davranış Modelleri                                  |
|---|--------------------------|---|
| SM-SC / GM-GC (FC < %30)  | Kum / Çakıl              | Seed ve Idriss LB [120] / Seed vd. [121]                    |
| SM-SC / GM-GC ( $30 \leq FC \leq 49$ )                            | Kumlu Kil<br>Çakıllı Kil | Plastisite İndisine dayalı olarak<br>Vucetic ve Dobry [117] |
| CL-CH (SC > %30 / GC > %30)                                       |                          |   |
| ML-MH (SC > %30 / GC > %30)                                       | Kil                      | Plastisite İndisine dayalı olarak<br>Vucetic ve Dobry [117] |
| CL-CH (SC < %30 / GC < %30)                                       |                          |   |
| ML-MH (SC < %30 / GC < %30)                                       |                          |   |



Tablo 4.2 Geoteknik modellemede kullanılan zemin grupları ve dinamik davranış modelleri

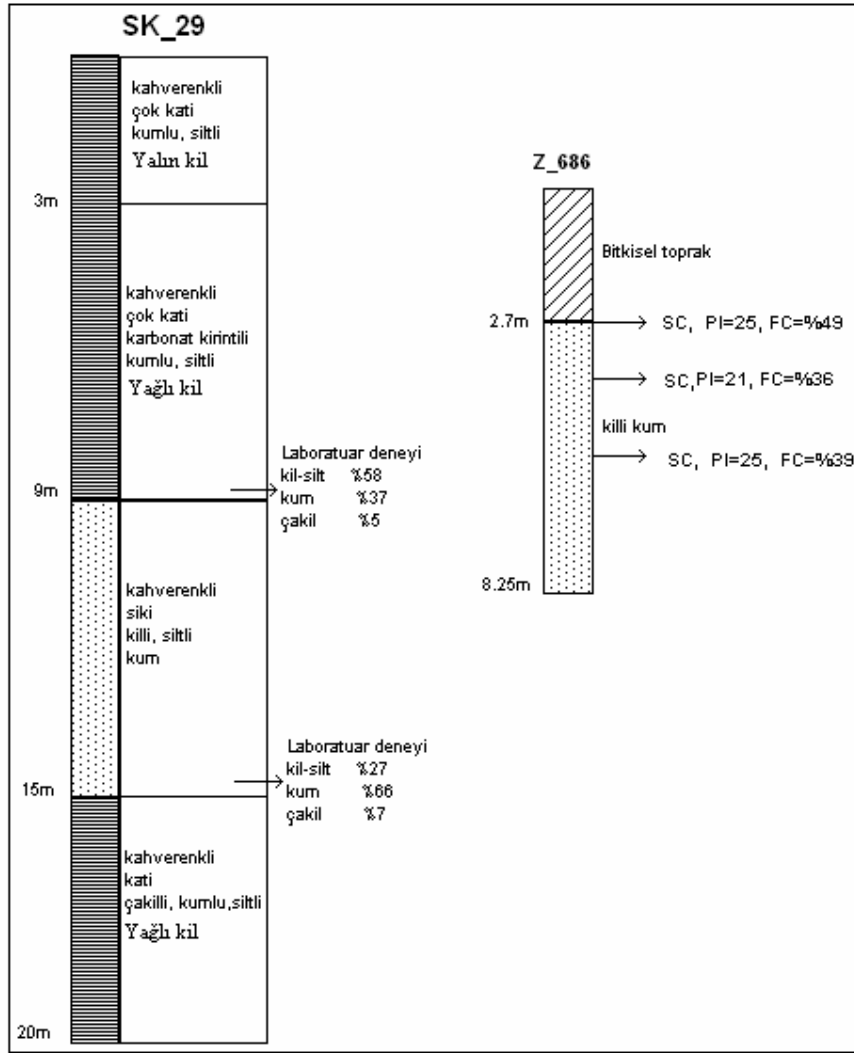
| Zemin No | Zemin Grubu                        | Dinamik Davranış Modeli      |
|----------|------------------------------------|------------------------------|
| 1        | Dolgu zemin                        | Vucetic ve Dobry [117] PI=0  |
| 2        | Kil-Kumlu kil $10 \leq PI \leq 20$ | Vucetic ve Dobry [117] PI=15 |
| 3        | Kil-Kumlu kil $20 \leq PI \leq 40$ | Vucetic ve Dobry [117] PI=30 |
| 4        | Kil-Kumlu kil $PI \geq 40$         | Vucetic ve Dobry [117] PI=50 |
| 5        | Kum                                | Seed ve Idriss [120] LB      |
| 6        | Çakıl                              | Seed vd. [121]               |

Belirlenen yaklaşıma dayalı olarak her bir hücredeki farklı veri gruplarına ait sondajların değerlendirilmesi ve temsili bir sondaj modelinin yorumlanması aşamasında ilk olarak, laboratuvar deneyleri ve arazideki gözleme dayalı tanımlamaların birbirini desteklediği ya da desteklemediği durumlar incelenmiştir. Veri gruplarına göre zemin tabakaları farklı detay seviyeleri göstermektedir. Birinci kaynak verilerde, 15-20 m lik bir sondaj 3-5 zemin tabakası ile gösterilirken, ikinci kaynak verilerde, 5-8 m lik sondajlar 3-5 tabaka ile daha ince zemin tabakaları sunmaktadır. Ayrıca birinci kaynak sondajlarda, her bir zemin tabakası için arazi yorumlarını destekleyen laboratuvar deneyleri yok denecek kadar az iken, ikinci kaynaktan, zemin tanımlamalarını destekleyecek çok sayıda laboratuvar deneyi bulunmaktadır. İnceleme alanında homojen bir dağılım gösteren ilk kaynaktaki 58 sondajı tek bir çalışma grubunun yürütmesine karşılık, homojen bir dağılımda olmayan diğer kaynaktaki 227 zemin etüdünün farklı şirketler ve dolayısıyla farklı kişiler tarafından yürütülmüş olduğu göz önüne alındığında; homojen dağılımdaki sondaj zemin profillerinin, göreceli olarak ortak bir yorumu yansıttığı kabul edilmektedir. Dolayısıyla ilk 5-8 m için çok sayıda sondaj ve laboratuvar deneyine dayalı olarak belirlenen tabakalardan sonra ilk kaynağa ait sondaj bilgileri göreceli olarak yorumlanmaktadır. Bu ilk aşamada laboratuvar deney sonuçları ile gözleme dayalı zemin tanımlamalarının uyumlu olduğu 53 hücre için temsili zemin profilleri modellenmiştir.

İkinci aşamada, arazideki gözlemsel yorumları destekleyecek laboratuvar deneylerinin bulunmadığı, deneylere ya da yorumlara dayalı olarak sondaj verilerinin

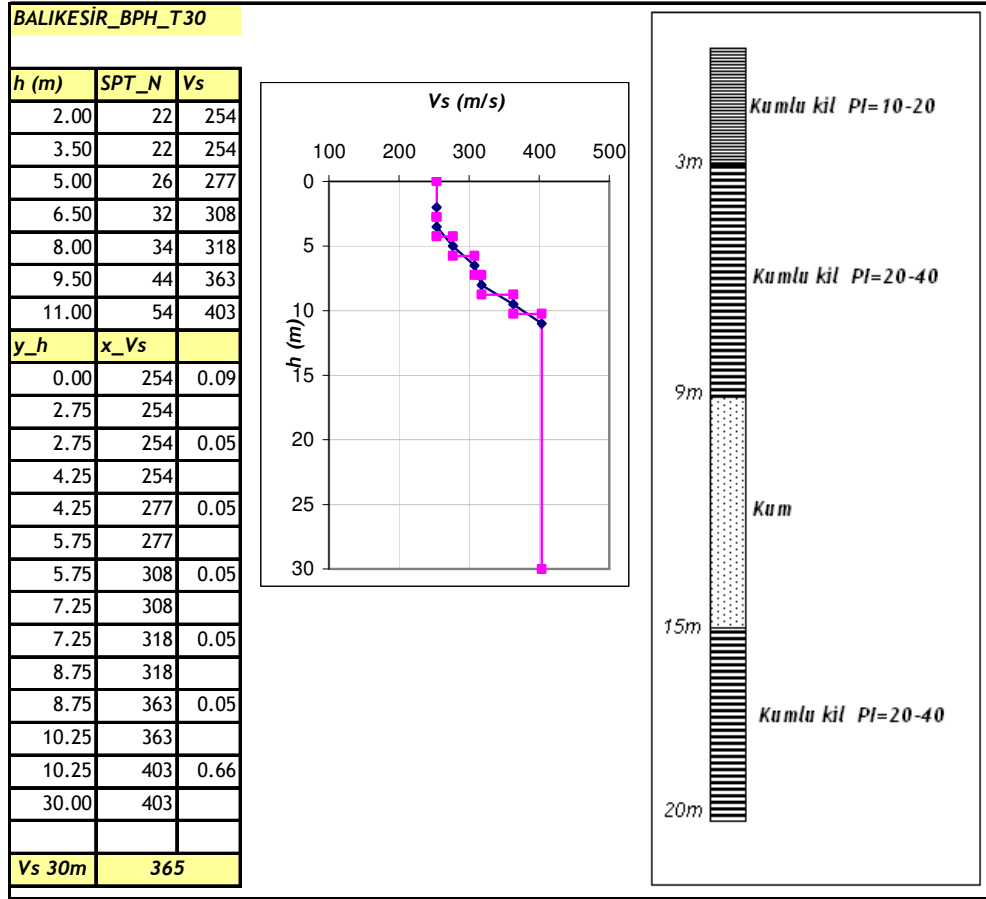
uyumsuz olduğu ve dolayısıyla alternatif bir modellemenin olabileceği durumdaki hücreler, etrafındaki profillerle birlikte tekrar değerlendirilerek modellenmiştir.

T30 hücresi, modellemenin uyumlu verilere sahip az sayıdaki sondaja dayalı olarak yapıldığı duruma bir örnek olarak gösterilmektedir. SK\_29 sondajında (1.kaynak), 3-9 m arasındaki zemin, kumlu, siltli plastik kil olarak yorumlanmakta ve 9 m seviyelerindeki granülometri deney sonuçları da bu yorumu desteklemektedir. Z\_686 sondajında ise 2.7-8.25 m arası laboratuvar deney sonuçları bu tabakayı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre killi kum (SC) sınıfı bir zemin olarak tanımlamaktadır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 T30 hücresi veri tabanı

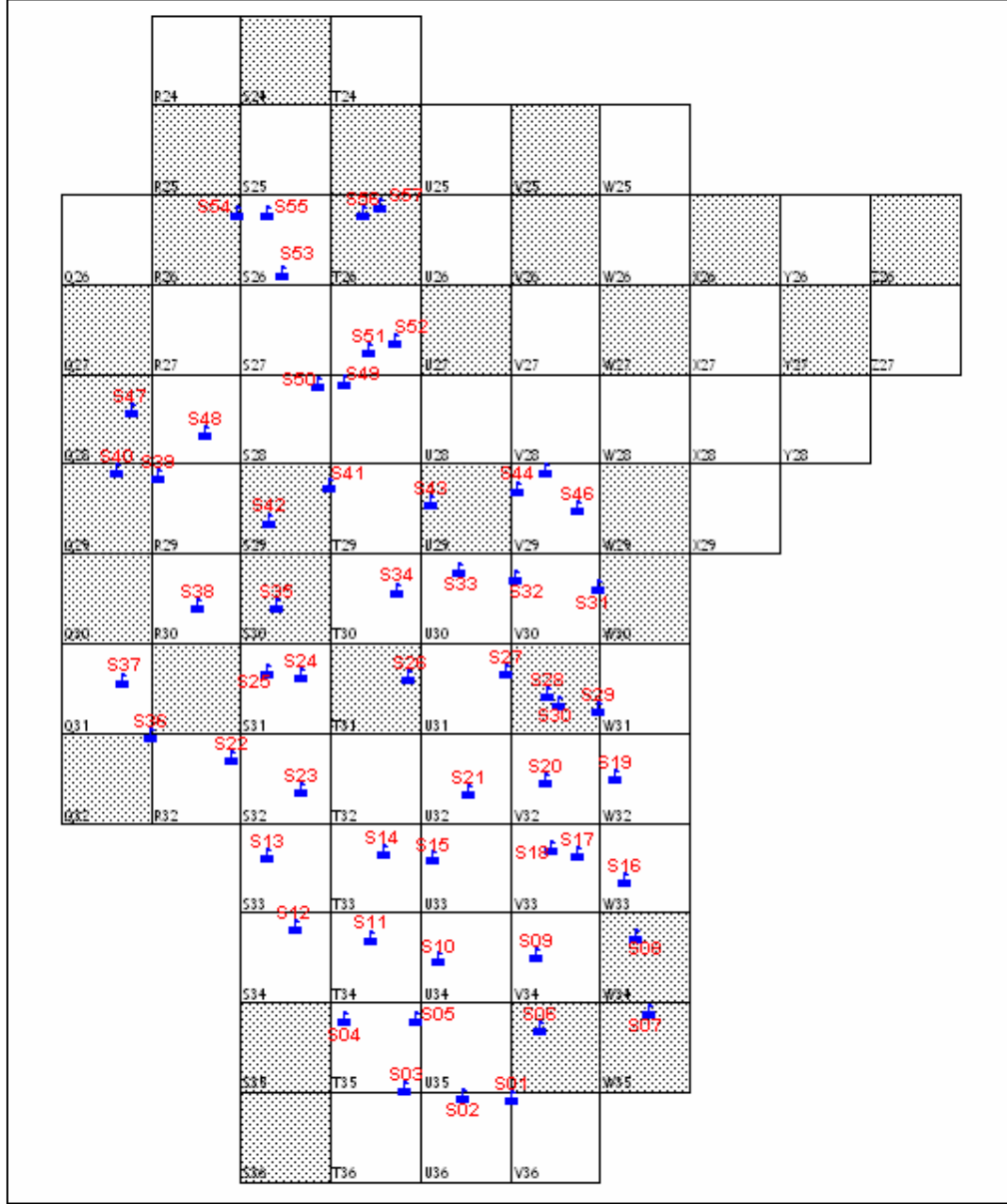
T30 hücresi temsili zemin profilinde, ince tane oranı %36 ile %49 arasında değişen SC sınıfı bu zemin tabakası, PI=20-40 olan kumlu kil olarak modellenmekte ve dolayısıyla SK\_29 sondajındaki plastik kil ile uyumlu olduğu varsayılmaktadır. Bu doğrultuda, SK\_29 sondajındaki diğer tabakalar da göreceli olarak modellenmektedir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 T30 hücresi temsili zemin profili

Üçüncü aşamada iki farklı veri grubunda yer alan serbest basınç deney sonuçları ile SPT-N sayılarının, zeminin kıvamı ve sıklığı doğrultusunda uyumlu olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Ortalama olarak 10-15 m arası derinliğindeki ilk

kaynaktaki SPT deneylerine karşılık, diğer kaynaktaki serbest basınç deneyleri genel olarak her sondajda 2 veya 3 noktada bulunmaktadır.



Şekil 4.12 BPH Bölgesi temsili sondajları için seçilen hücreler ve sismik kırılma deney noktaları (taralı alanlar, kayma dalgası hız profiline bulunmadığı hücreleri göstermektedir)

Temsili sondajların kayma dalgası hız profilleri, ilk kaynaktaki SPT-N sayılarına dayalı olarak İyisan [126] tarafından önerilen formül kullanılarak belirlenmiştir;

$$V_s = 51.5 N^{0.516} \quad (\text{m/sn}) \quad (4.1)$$

Bu ilişki tüm zemin tipleri için geçerlidir. Profillerde genellikle 10-15 m de sonlanan kayma dalgası hızı değerleri, 200 ile 400 m/sn arasında değişim göstermektedir. 15 m gibi bir derinlikten sonra kayma dalgası hızının değişiminin ne olacağı konusunda, bölgedeki iki derin sondajın hız profili göz önüne alınmıştır. Bu iki sondajda 30 ve 36 m derinliğindeki kayma dalgası hızları, 332 ve 341 m/sn dir. Bu doğrultuda, 10-15 m seviyesindeki kayma dalgası hızları 30 m ye kadar sabit olarak uzatılmıştır (Şekil 4.11). Kayma dalgası hız profillerinin aynı zamanda BPH bölgesi içindeki dağılımı Şekil 4.12 de görülen ve 20 m derinlik için farklı kayma dalgası hızına sahip 2 tabakanın tanımlandığı sismik kırılma deney sonuçları ile uyumlu olduğu söylenebilir. İnceleme alanında kayma dalgası hız profili olmayan 30 hücrenin ancak 1/3 inde sismik kırılma deneyi bulunmaktadır. Temsili profiller için hesaplanan eşdeğer kayma dalgası hızları genel olarak 223-392 m/sn arasında değişim göstermektedir.

Bu aşamaya kadar olan çalışmalar, 2 veri tabanının birlikte yorumlanmasına dayalı olarak ortaya çıkan yaklaşım doğrultusunda belirlenen temsili sondaj ve kayma dalgası hız profillerine alternatif olabilecek farklı temsili modellerin oluşturulamayacağını göstermektedir.

#### **4.3.2 18-02 Konut Bölgesi ve Akıncılar Mahallesi Temsili Zemin Profillerinin Modellenmesi**

18-02 konut bölgesi ve Akıncılar mahallesindeki veri tabanının BPH bölgesinden farkı, özel şirketlerden sağlanan zemin etütlerinin bulunmamasıdır. Balıkesir Belediyesi için yerleşime uygunluk amaçlı çalışmadan sağlanan sondajlar ve SPT deneyleri, her iki bölgede de homojen bir dağılım göstermektedir. Ancak bu sondajlar için laboratuvar deneylerinin neredeyse yok denecek kadar az olması ve

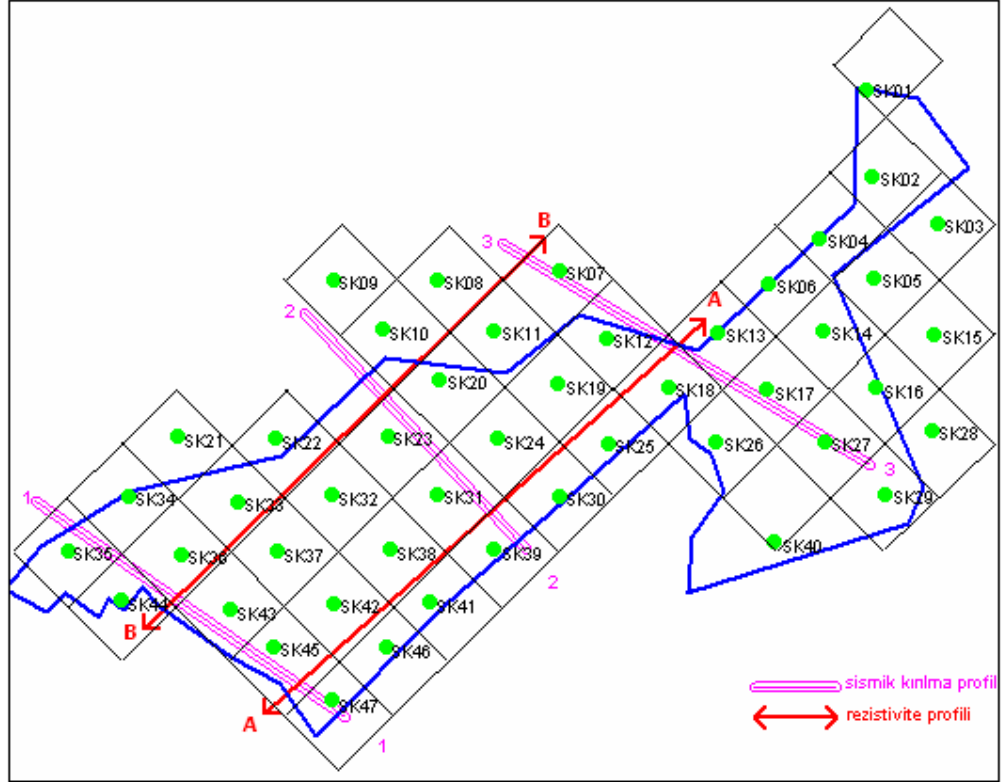
diğer veri kaynağına ait zemin etütlerinin yokluğu, BPH Bölgesindeki durumdan farklı olarak zemin tanımlamalarının desteklenmesi ve karşılaştırmalara dayalı olarak yorumlanması durumunu ortadan kaldırmaktadır. Dolayısıyla, bu bölgelerde temsili sondaj profillerinin tek bir kaynağa dayalı olarak modellenmesi söz konusu olmaktadır.

Bununla birlikte yerleşime uygunluk amaçlı çalışmadaki sondajların, özel şirketlere ait zemin etütlerindeki sondajlara göre avantajları; daha derin olmaları, tek bir çalışma grubunun yürütmüş olması ve homojen dağılım göstermeleridir. Dolayısıyla, BPH Bölgesinde modellenen temsili zemin profilleri de temelde bu sondajlara dayanmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, 18-02 Bölgesi ve Akıncılar mahallesi sondajlarının, bölgesel farklılıklar göz önüne alınarak BPH Bölgesi sondajlarına dayalı, göreceli olarak değerlendirilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir. Bu aşamada sondajlardaki bölgesel olan genel farklılıklar, 3. Bölüm' de incelenen rezistivite kesitleri ve jeoloji ile birlikte değerlendirilmektedir.

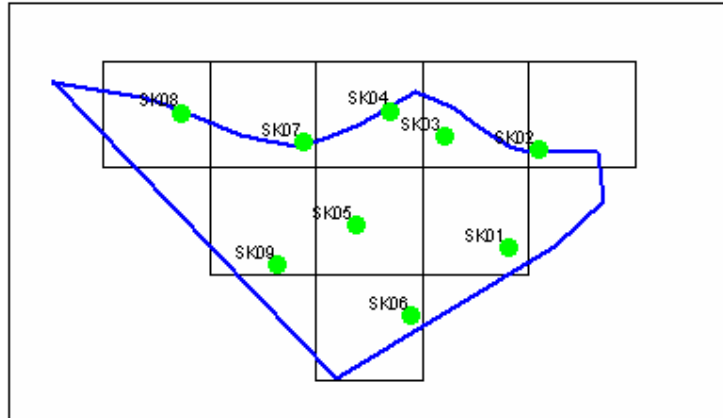
18-02 Konut Bölgesi sondaj loglarındaki kil tanımlamalarının çok büyük bir kısmı, düşük yada yüksek plastisite ifadelerini içermemektedir. Oysa kum zeminlerin daha düşük bir oranda bulunduğu BPH Bölgesindeki killerin çoğunun, plastisite derecesi göreceli olarak yüksek zeminler olduğu görülmektedir. 18-02 Bölgesine yakın derin sondajlarda, BPH Bölgesindekilere nazaran kohezyonsuz zeminlerin çoğunlukta olmasının ve iki bölgenin rezistivite kesitlerindeki farklılıkların, bu durum ile uyumlu olduğu düşünülmektedir. 18-02 Bölgesinde, homojen dağılımdaki 47 sondaj için en uygun hücre sisteminin, 350\*350 m boyutlu, kuzey-güney doğrultusuna çapraz kareler olduğu görülmektedir (Şekil 4.13). Temsili profillerin modellenmesinde, inceleme alanındaki rezistivite ve sismik kırılma profili farklılıkları da göz önüne alınmıştır.

BPH ve 18-02 Bölgelerine nazaran çok küçük bir alan olan, Akıncılar mahallesindeki 9 sondaj, 150\*150 m boyutlu hücre sistemi ile uyumlu bir dağılım göstermektedir (Şekil4.14). 18-02 Bölgesinden farklı olarak, zemin sınıflandırmasına yönelik laboratuvar deneylerinin daha fazla olduğu bölgede, temsili zemin profilleri

kendi içinde göreceli olarak modellenenmiştir. Bu yanıyla kullanılan yaklaşımın, BPH bölgesindeki benzer olduğu söylenebilir.



Şekil 4.13 18-02 Bölgesi, 350\*350 m boyutlu karelerden oluşan hücre sistemi



Şekil 4.14 Akıncılar Mahallesi, 150\*150 m boyutlu karelerden oluşan hücre sistemi

Her iki bölgede de genel olarak 15-18 m seviyelerine kadar olan kayma dalgası hızları, 30 m derinliğe kadar sabit olarak uzatılmıştır. Hesaplanan eşdeğer kayma dalgası hızları, 18-02 Bölgesinde 261-423 m/sn, Akıncılar Mahallesinde 266-352 m/sn arasında değişim göstermektedir.

#### **4.4 Sonuçlar**

Farklı kaynaklı verilerin, inceleme alanlarındaki dağılımının da farklı olması, temsili zemin profillerinin modellenmesinde ortak bir yaklaşımın uygulanmasını güçleştirmektedir. BPH Bölgesi, 18-02 Konut Bölgesi ve Akıncılar Mahallesi için mevcut veri dağılımı ile uyumlu olarak sırasıyla, 250 m, 350 m ve 150 m boyutlu kare hücre sistemlerinin uygun olduğu belirlenmiştir.

Veriler iki farklı kaynaktan sağlanmaktadır. Doğal olarak bu veriler değişken seviyede bilgi ve detay içermektedir. BPH Bölgesi temsili zemin profilleri, farklı kaynaklı iki veri grubunun birlikte yorumlanmasına dayalı bir yaklaşım ile belirlenmiştir. Kaynaklardan ilki, inceleme alanlarında homojen bir dağılım gösteren, ortalama 15-20 m derinlikteki sondaj ve SPT deneylerini kapsamaktadır. Aynı zamanda, sismik kırılma ve rezistivite ölçümleri de bulunmaktadır. Diğer kaynaktaki veriler, daha az derinliklerle sınırlı olup, zemin sınıflandırmasına yönelik çok sayıda laboratuvar deneyi içermektedir. Bu iki grup verinin karşılaştırmalara dayalı olarak birlikte yorumlanması sonucu, temsili profil modellerindeki zeminler ve bu zeminlerin dinamik davranış modelleri belirlenmiştir.

18-02 Bölgesi ve Akıncılar Mahallesi veri tabanları, homojen dağılımdaki sondaj ve SPT deneyleri ile sismik kırılma ve rezistivite ölçümlerini içeren tek bir kaynağa dayanmaktadır. Ancak bu kaynağın tüm inceleme alanları için ortak olmasına dayalı olarak, bölgeler arası gözlenen genel farklılıklar sonucu temsili zemin profillerinin göreceli olarak modellenmesinin mümkün olabileceği gözlenmiştir. Bu aşamada belirtilen inceleme alanları arasındaki bölgesel farklılıkların, önceki bölümde incelenen rezistivite kesitleri ve jeolojik bilgi ile desteklendiği düşünülmektedir. Bu doğrultuda, 18-02 Bölgesi ve Akıncılar



Mahallesindeki temsili zemin profilleri, BPH Bölgesindeki veriyi de göz önüne alan göreceli bir yaklaşım ile modellenmiştir.

İnceleme alanlarında genel olarak 15-20 m derinliklerle sınırlı olan kayma dalgası hız profilleri, SPT deneylerinin 30 m' ye ulaştığı az sayıdaki sondaj göz önünde bulundurularak, 30 m derinliğe kadar sabit olarak uzatılmıştır.

## 6. SİSMİK TEHLİKENİN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 5.1 Giriş

Balıkesir için sismik tehlike analizi, Ansal [127] tarafından Balıkesir etrafında seçilen 100 km yarıçapındaki alan içinde kalan sismotektonik bölge için olasılıksal yaklaşıma dayalı olarak yapılmıştır. Bu alan içindeki sismik etkinliklerin olduğu fayların, geçmiş depremlerde genel olarak yanal atım bileşeni olan normal faylanma özelliği gösterdikleri saptanmıştır. Tasarım depremi büyüklüğü ve kaynak uzaklığı 50 yılda % 10 aşılma olasılığı için belirlenmiştir.

Balıkesir yerleşim alanı sınırları içinde ana kaya seviyesindeki yer hareketinin belirlenmesinde, azalım ilişkilerinin kullanılması gerekmektedir. Azalım ilişkileri yer hareketi parametrelerinin, deprem büyüklüğü, faylanma mekanizması, yayılma hattı ve yerel zemin koşulları gibi parametrelere bağlı olarak tahmin edilmesini sağlamaktadır. Bu aşamada, tektonik bölge için geçerli olabilecek azalım ilişkileri öncelikle, bu güne kadarki aletsel dönemde alınmış Balıkesir istasyonlarındaki yer hareketi kayıtları ile karşılaştırılmaktadır. Veri tabanları doğrultusunda farklı parametre tiplerine dayalı bu azalım ilişkileri kullanılarak, tasarım depremi için, Balıkesir yerleşim alanı sınırları içindeki en büyük ivme değer aralığı ve spektral ivmeler hesaplanmıştır.

Hedeflenen davranış spektrumları ile uyumlu yer hareketi kayıtlarının oluşturulmasında, frekans tanım alanındaki spektral uyum yöntemlerinden biri olan RASCAL (Response Spectra and Acceleration Scaling) [4] programı kullanılmıştır. RASCAL, gerçek yer hareketi kaydına ait Fourier Faz Spektrumunun kullanımıyla birlikte rassal titreşim teorisine (RVT) dayalı geliştirilen yarı-ampirik bir yöntemdir. Çoğunlukla stokastik yöntem olarak tanımlanan bu simülasyon yönteminde, yer hareketine ait Fourier genlik spektrumunun fonksiyonel tanımı, hedeflenen parametreler için geliştirilen rassal faz spektrumu ile birleştirilmektedir. Yöntemdeki

yer hareketi modelinin temel elemanlarını oluşturan, basit fonksiyonel formdaki kaynak özellikleri ve dalga yayılım ortamına ait bazı bölgesel parametreler (gerilme farkı ve kalite faktörü sabiti) ve kullanılan gerçek yer hareketi kayıtları için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Aynı zamanda RASCAL ile üretilen yer hareketi kayıtları, hedef yer hareketi parametreleri için farklı yöntemler ile üretilen kayıtlarla karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla TARSCETHS [5] programı ve maksimum ivme değeri için zamana bağlı kayıtların oranlanması yöntemi kullanılmıştır.

## 5.2 Sismik Tehlike Analizi

Balıkesir için sismik tehlike analizi Belediye sınırları içinde kalan Bahçelievler, Plevne, Hasan Basri Çantay, Akıncılar Mahalleleri ve 18-02 Konut Bölgesinin Yerleşime Uygunluk Çalışmalarının, depremsellik ve İnşaat Mühendisliği açısından değerlendirilmesi amaçlı çalışma [127] kapsamında yapılmıştır.

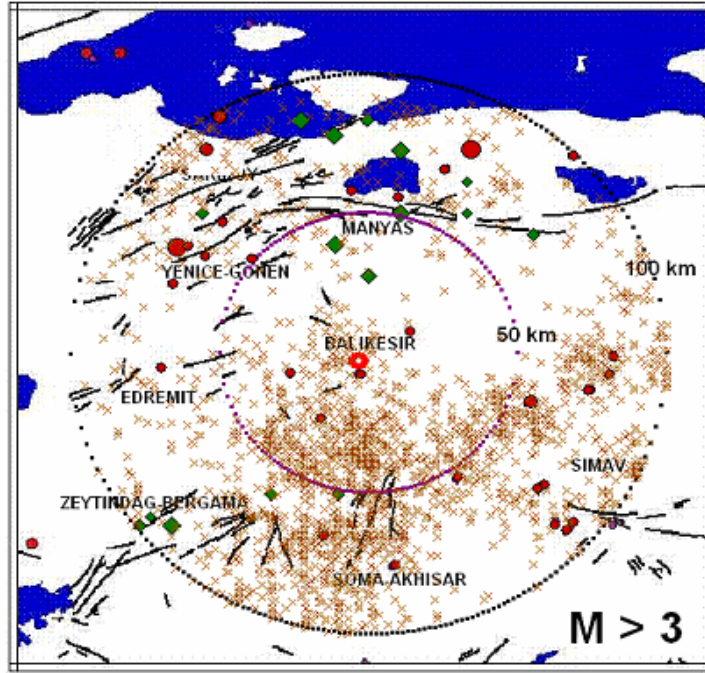
Balıkesir etrafındaki 100 km yarıçapındaki alan içinde kalan sismik etkinlikler ( $M \geq 3$ ) çoğunlukla kuzeyde yer alan Yenice-Gönen, Manyas, Sarıköy, batıda yer alan Edremit, güney batıda yer alan Zeytindağ-Bergama, güneyde yer alan Soma-Akhisar ve güneydoğuda bulunan Simav fay bölgelerinde oluşmaktadır (Şekil 5.1). Geçmiş depremlerde bu faylarda gözlenen özellik genel olarak yanal atım bileşeni olan normal faylanmadır.

Balıkesir'in depremselliğini inceleyebilmek amacıyla, Balıkesir'i etkileyebilecek bir depremin 100 km yarıçapında bir alan içinde meydana geleceği kabul edilerek,  $26.9^\circ - 28.9^\circ$  doğu boylamları ve  $38.7^\circ - 40.7^\circ$  kuzey enlemleri arasında kalan alan sismotektonik bölge seçilmiştir. Bu bölge içinde tarihi (M.S.29 ile 1900 arası) ve aletsel (1900 ile 2000 arası) dönemlerde meydana gelen depremler belirlenmiş, bu bulgular ayrı ayrı ve birlikte değerlendirilerek sismik tehlike aşılma olasılıkları hesaplanmıştır.

Tarihsel döneme ait şiddet cinsinden verilen kayıtlar Türkiye için Ansal [128] tarafından geliştirilmiş

$$M = 0.594 I_0 + 1.36 \quad (5.1)$$

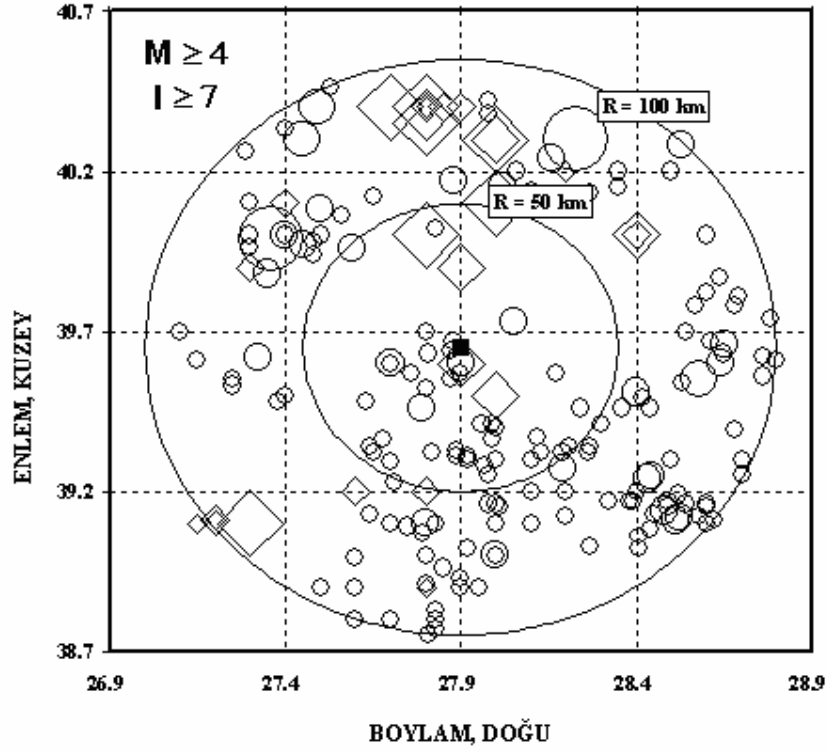
bağıntısı kullanılarak büyüklük (manyitüd) değerlerine dönüştürülmüştür. Yapılan hesaplarda sadece şiddeti ( $I_0 > VI$ ) olan deprem kayıtları kullanılmıştır. Aletsel döneme (1900 ile 2000 arası) ait kayıtlar ise tanımlanmış bölge içinde büyüklükleri ( $M \geq 4.0$ ) olan depremler olarak belirlenmiştir. Balıkesir etrafında 100 km yarıçapındaki alan içinde tarihsel dönemde toplam 29, aletsel dönemde ise toplam 164 depremin meydana geldiği gözlenmiştir (Tablo 5.1, Şekil 5.2).



Şekil 5.1 Balıkesir civarındaki sismik etkinlik

Tablo 5.1 Tarihsel ve aletsel dönemlerde Balıkesir çevresinde R=100 km yarıçaplı alan içinde kalan bölgede meydana gelen depremler.

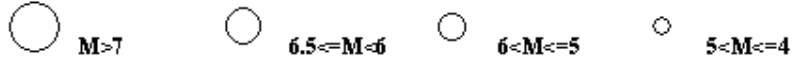
| TARİHSEL DÖNEM            |                       |                    |                    |                    |                  |         |
|---------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|---------|
| Deprem Şiddeti, ( $I_0$ ) |                       | 6                  | 7                  | 8                  | 9                |         |
| Hesaplanmış Büyüklük, (M) |                       | 4.9                | 5.5                | 6.1                | 6.7              |         |
| Tekrar Sayısı             |                       | 6                  | 10                 | 6                  | 7                |         |
| ALETSEL DÖNEM             |                       |                    |                    |                    |                  |         |
| Büyüklük Aralığı          | $4.0 \leq M \leq 4.4$ | $4.4 < M \leq 4.8$ | $4.8 < M \leq 5.2$ | $5.2 < M \leq 5.6$ | $5.6 < M \leq 6$ | $M > 6$ |
| Tekrar Sayısı             | 85                    | 41                 | 26                 | 3                  | 2                | 7       |



**TARİHSEL DEPREMLER**



**ALETSEL DEPREMLER**



Şekil 5.2 Balıkesir çevresindeki 100 km yarıçaplı alan içinde tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen depremlerin büyüklüklerine ve konumlarına göre dağılımı

Tablo 5.1’de verilen veriler kullanılarak Gutenberg-Richter frekans büyüklük ilişkisine dayalı olarak regresyon analizleri tarihsel ( $I > VI$ ) ve aletsel ( $M \geq 4$ ) dönemler için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tarihsel ve aletsel dönemler için deprem büyüklüğü cinsinden dönüşüm periyotları ve benzer şekilde Balıkesir Belediyesi sınırları içindeki bütün yapılar için yapı ömrü  $T=50$  yıl olarak kabul edilerek, deprem büyüklüğü cinsinden aşılma olasılıkları bulunmuştur. Tarihsel depremlerin %40, aletsel depremlerin %60 olarak alındığı bir ağırlıklı ortalama yönteminin benimsendiği hesaplar sonucu, Balıkesir Belediyesi hudutları içinde kalan normal

konut ve işyerleri için aşılma olasılığı %10 kabul edilerek, tasarım depremi büyüklüğü  $M_s=7.5$  olarak belirlenmiştir.

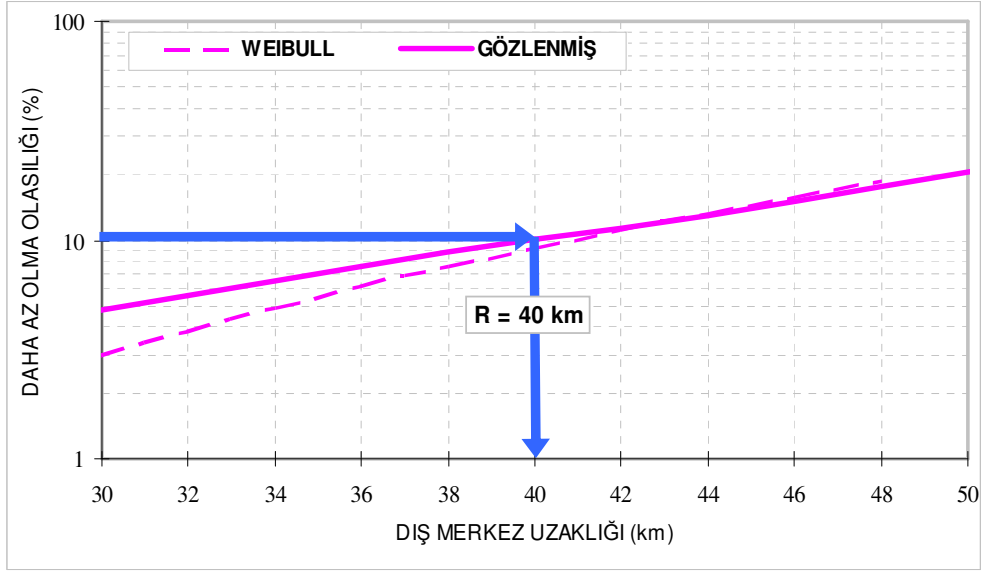
İnceleme bölgesinin jeolojik ve tektonik özellikleri ile ilgili çalışmalar bölgedeki aktif fayların nispeten karmaşık bir yapısı olduğunu göstermektedir. Bu durumda büyük bir depremin olası dış merkezinin ve bununla ilişkili fayın, Balıkesir etrafındaki 100 km yarıçaplı alan içinde herhangi bir noktada olabileceği varsayılmıştır. Tasarım deprem büyüklüğü seçilirken benimsenen tehlike mertebesine eşit genel bir tehlike mertebesinin sağlanabilmesi için deprem dış merkez uzaklığının seçiminde de olasılıksal bir yaklaşım izlenmektedir. Bu yaklaşımda, aletsel olarak kayıt edilmiş  $M \geq 2$  küçük ve orta büyüklükteki depremlerin dış merkezlerinin, olası dış merkezler olabileceği kabul edilmiştir. Olası deprem dış merkez uzaklığı olarak kabul edilen ve 100 km'den az olan bu uzaklıkların istatistiksel dağılımı çeşitli olasılık modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Gerçekleşmiş tekil düzensiz dış merkez uzaklığı dağılımı ile Weibull olasılıksal dağılım modeli kullanılarak hesaplanan dış merkez uzaklığının daha az olma olasılıklarının, dış merkez uzaklığına göre değişimi Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Bu şekilde bulunan sonuçlar arasında önemli farklar bulunmamaktadır. Bu yaklaşıma göre tasarım depremi kaynak uzaklığı, normal yapılar için %10 tehlike seviyesine karşılık  $R=40$  km olarak belirlenmektedir.

Balıkesir Belediyesi sınırları içinde ana kaya seviyesindeki en büyük yatay deprem ivmesinin hesaplanmasında, Ambraseys [129] tarafından önerilen azalım ilişkisinin sadece Türkiye'de alınan kayıtlar kullanılarak Ansal [128] tarafından geliştirilen şekli

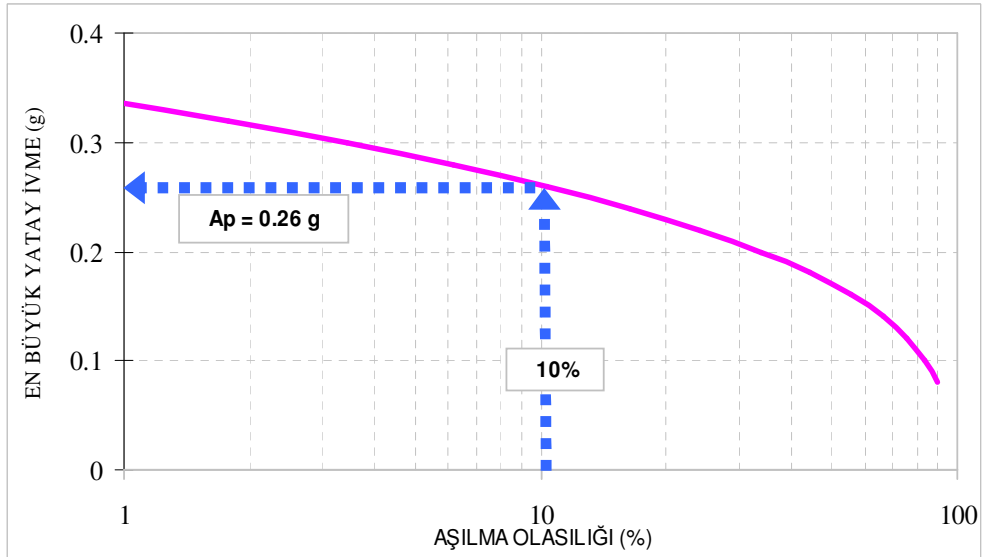
$$\text{Log } A_p = 0.33 M_s - 0.00327 R - 0.79 \text{ Log } R + 1.177 \quad (5.2)$$

kullanılmıştır. Yalnızca Türkiye depremleri kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda bulunan bu azalım ilişkisi, ortalamanın %40'ı mertebesinde standart sapmaya sahip normal bir dağılım göstermektedir. Tasarım kriteri olarak seçilmiş genel tehlike mertebesini koruyabilmek amacıyla azalım ilişkisindeki değişkenlik ve saçılımın da aşılma olasılıkları cinsinden değerlendirilmesi sonucu %10 aşılma

olasılığı değerine karşı gelen ana kaya seviyesindeki en büyük ivme değeri Şekil 5.4’de gösterildiği gibi,  $A_p = 0.26 \text{ g}$  olarak hesaplanmıştır [127].



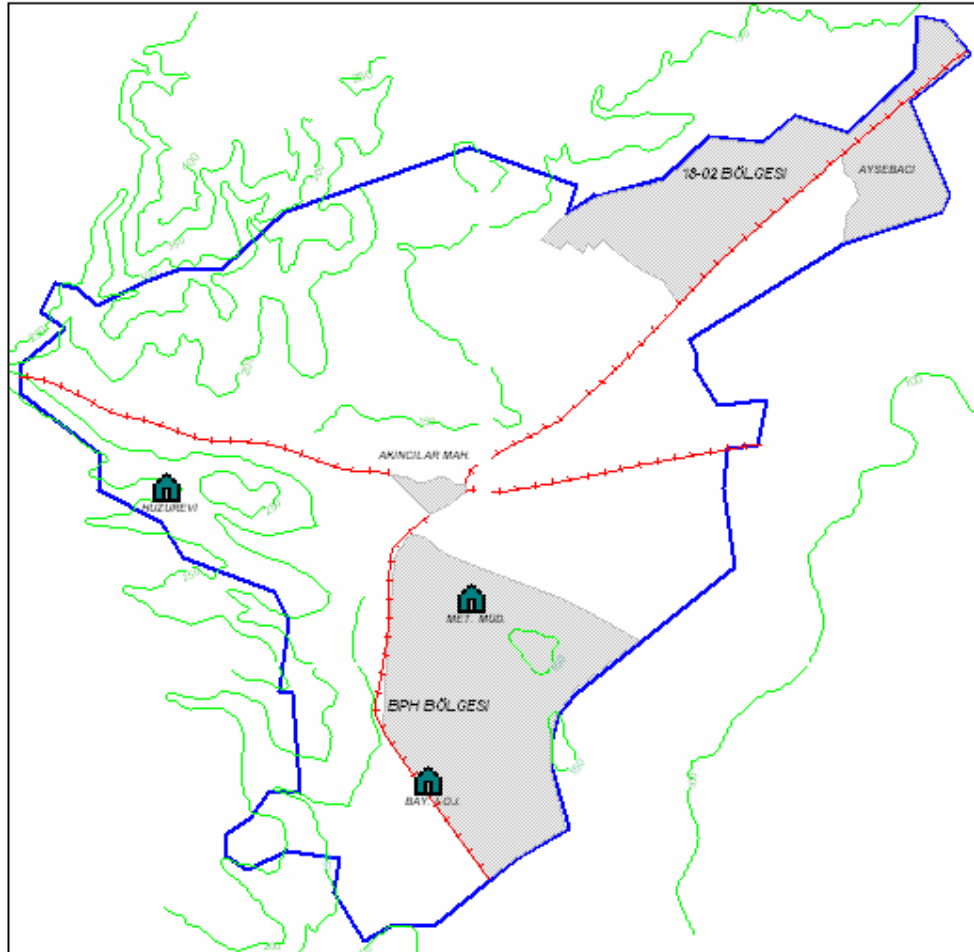
Şekil 5.3 Deprem dış merkez uzaklığının daha az olma olasılığına göre değişimi



Şekil 5.4 Ana kaya seviyesinde en büyük yatay ivme değerleri

### 5.3 Balıkesir’deki Yer Hareketi Kayıtlarının Azalım İlişkileri ile Karşılaştırılması

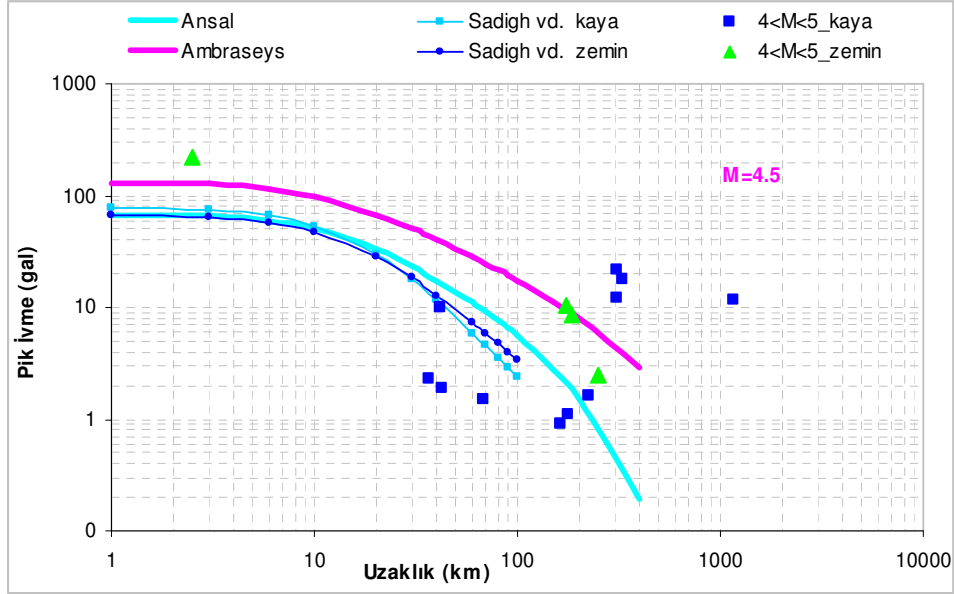
Balıkesir’de, 1976-2004 yılları arasındaki aletsel dönemde, istasyon noktasının değişen konumuna dayalı olarak zemin şartlarında 7, kaya üzerinde 51 yer hareketi kaydı bulunmaktadır. Yer hareketi kayıt istasyonunun şu anki konumu olan Huzurevi, şehrin en yüksek noktasında, kaya üzerinde bulunmaktadır. Meteoroloji Müdürlüğü ve Bayındırlık Lojmanları adlı önceki iki istasyon noktasının koordinatları, şehrin düzlük kısmında ve BPH Bölgesi sınırları içinde kalmaktadır. Yerel zemin şartlarını, eşdeğer kayma dalgası hızının 250-350 m/sn arasında kaldığı zemin olarak tanımlayabiliriz (Şekil 5.5).



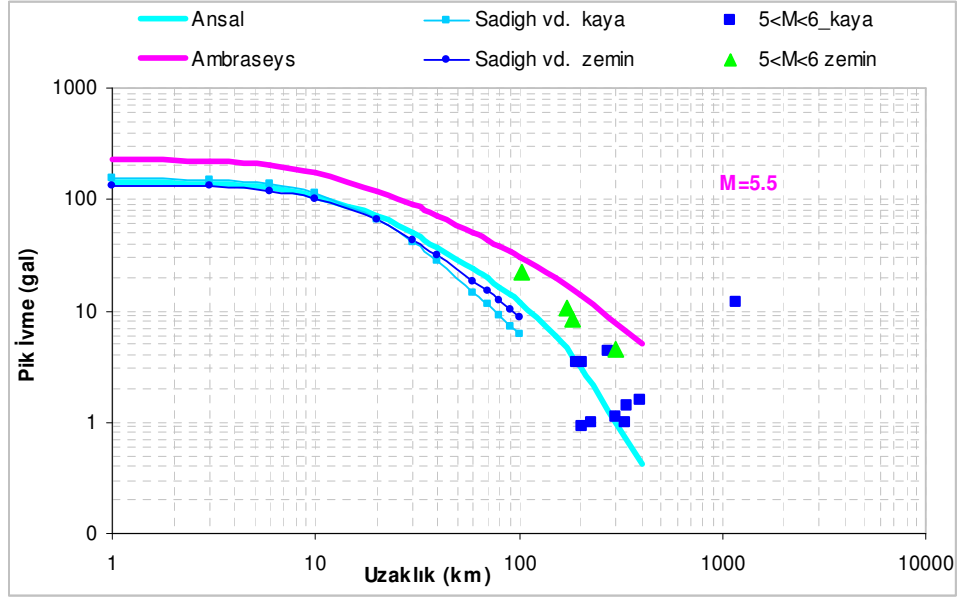
Şekil 5.5 Balıkesir yer hareketi kayıt istasyonlarının zamana bağlı olarak değişen yerleri (Meteoroloji Müdürlüğü, Bayındırlık lojmanları ve şu anki konumu Huzurevi)



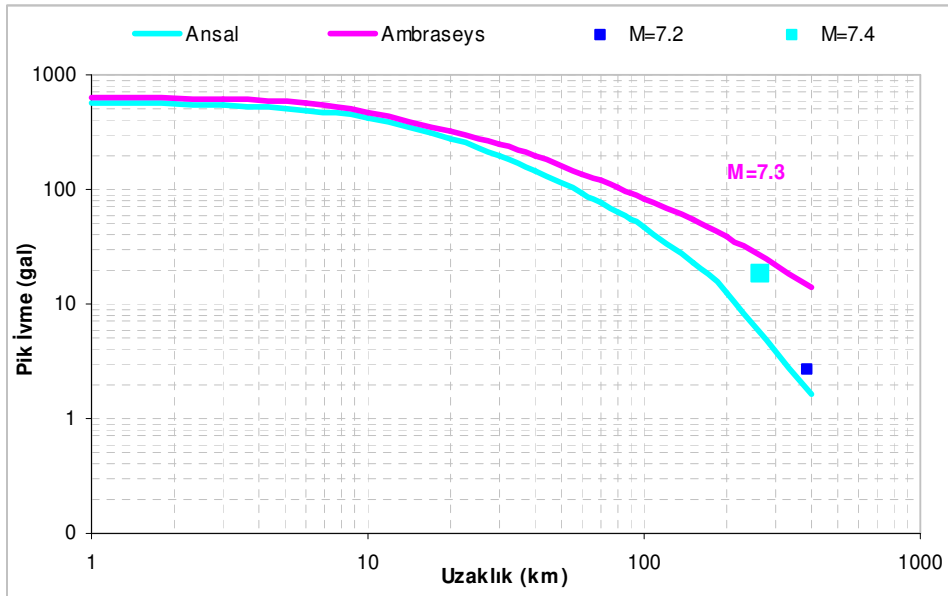
İlk aşamada, bu istasyon noktalarındaki yer hareketi kayıtlarına ait en büyük ivme değerleri, Ambraseys [129], Ansal [128] ve Sadigh vd. [130] azalım ilişkileri ile karşılaştırılmaktadır (Şekil 5.6-8). Aktif tektonik bölgelerdeki sığ yer kabuğu hareketleri için son zamanlardaki azalım ilişkileri, veri tabanları doğrultusunda genel olarak, 100 km den daha az uzaklıklar ve moment manyitüd değeri  $M_w \geq 5$  olan depremler için önerilmektedir [131]. Balıkesir’ deki yer hareketi kayıtlarının bir tanesi dışında hiçbiri bu şartları sağlamamaktadır. En büyük ivmelerin 3 azalım ilişkisi ile karşılaştırılmasında, farklı ölçekteki büyüklükleri  $4 \leq M \leq 5$  arasındaki depremler için saçılmanın daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 5.6).  $M \geq 5$  olduğu diğer iki şekilde, kayıtlarla en uyumlu ilişkinin Ansal [128] olduğu belirlenmektedir (Şekil 5.7,8). Bununla birlikte,  $4 \leq M \leq 6$  manyitüd aralığında, zemin üzerindeki kayıtların Ambraseys [129] ilişkisi ile daha uyumlu olduğu söylenebilir. 100 km uzaklık ile sınırlı, Sadigh vd. [130] azalım ilişkisinin, en büyük ivme değerleri cinsinden Ansal [128] ilişkisi ile yakın olduğu gözlenmektedir.



Şekil 5.6 Balıkesir istasyonlarında kaydedilmiş, büyüklüğü  $4 < M < 5$  olan depremlere ait en büyük ivmelerin azalım ilişkileri ile karşılaştırılması

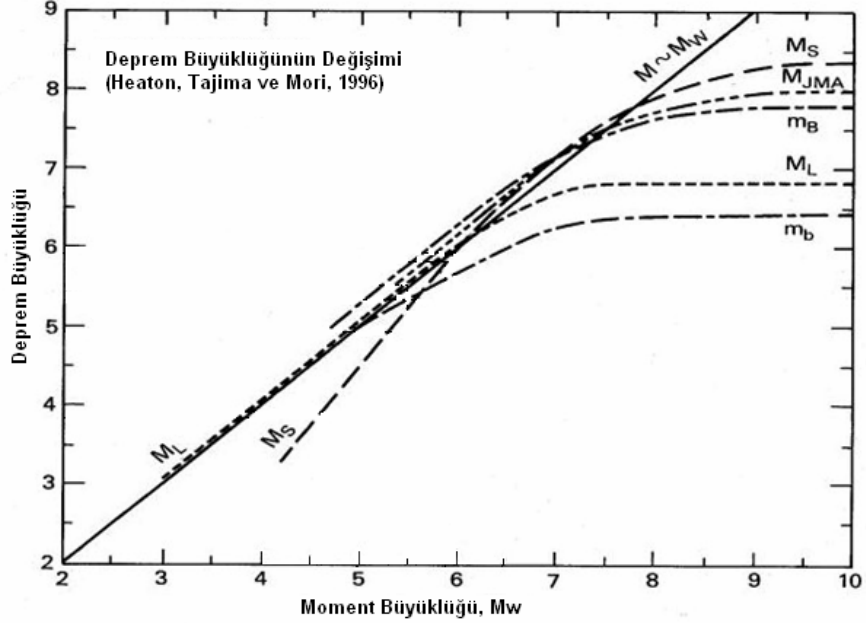


Şekil 5.7 Balıkesir istasyonlarında kaydedilmiş, büyüklüğü  $5 < M < 6$  olan depremlere ait en büyük ivmelerin azalım ilişkileri ile karşılaştırılması

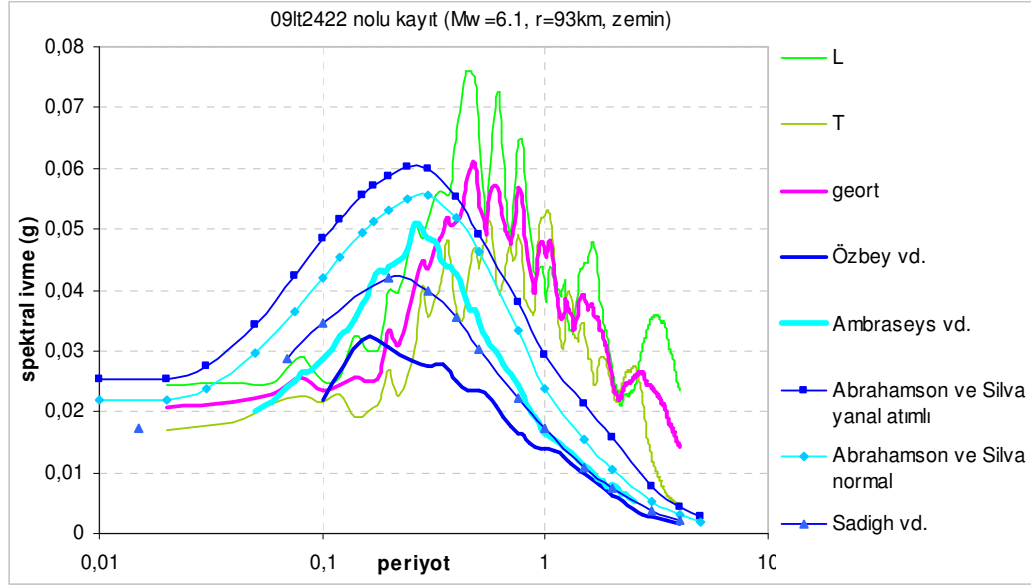


Şekil 5.8 Balıkesir istasyonlarında kaydedilmiş, büyüklüğü  $M > 7$  olan depremlere ait en büyük ivmelerin azalım ilişkileri ile karşılaştırılması

İkinci aşamada mevcut yer hareketi kayıtları, literatürdeki spektral azalım ilişkileri ile karşılaştırılmaktadır. Ancak spektral azalım ilişkilerindeki manyitüd ve uzaklık kriterlerini sağlayan 7 kayıt bulunmaktadır. Deprem büyüklükleri için günümüzde tercih edilen ölçek moment büyüklüğüdür. Diğer büyüklük ölçekleri, Şekil 5.9' da gösterildiği üzere artan deprem büyüklüğü ile manyitüd çözünürlüğü olarak adlandırılan durumdan etkilenmektedir [8]. Şekil 5.10' da,  $M_w=6.1$  büyüklük ve  $r=93$  km uzaklık değerlerine sahip zemin üzerindeki yer hareketi kaydının her iki bileşenine ait spektral ivmeler ve karşılaştırılabilir şartlara sahip bazı azalım ilişkileri gösterilmektedir. Kayıt ile spektral ivmeler cinsinden en uyumlu azalım ilişkisinin Abrahamson-Silva [132] olduğu söylenebilir. Ancak kaydın frekans içeriği, birbiriyle uyumlu durumdaki azalım ilişkilerine göre farklılık göstermektedir. Aktif tektonik bölgelerdeki sığ yer kabuğu hareketleri için geçerli olan bu azalım ilişkileri, mevcut veri tabanları doğrultusunda farklı parametreler de içermektedir.



Şekil 5.9 Farklı deprem büyüklüğü ölçekleri arasındaki ilişki



Şekil 5.10 Balıkesir istasyonunda,  $M_w > 5$  ve  $r < 100$  km şartlarını sağlayan 091t2422 nolu yer hareketi kaydının, spektral azalım ilişkileri ile karşılaştırılması

Ortalama yatay yer hareketi bileşenini veren Abrahamson-Silva [132] spektral azalım ilişkisindeki farklılık, eğim atımlı faylarda tavan ve taban bloğundaki yer hareketi farkını yansıtan bir faktör içermesidir. Ancak tavan bloğu etkisini yaklaşık olarak  $r=24$  km uzaklığı ile sınırlı olduğu söylenebilir. Kaynak mekanizması yanal atımlı, normal, ters ve verrev fay tipleri ile sınıflandırılmaktadır. Yerel zemin şartları, kaya (kaya üzerinde 5-20 m derinliğindeki sert zeminleri de içeriyor) ve zemin şeklinde iki grup ile tanımlanmaktadır. Veri tabanı dalma-batma zonu depremleri dışında aktif tektonik bölgelerdeki sığ yer kabuğu hareketlerini içermektedir.

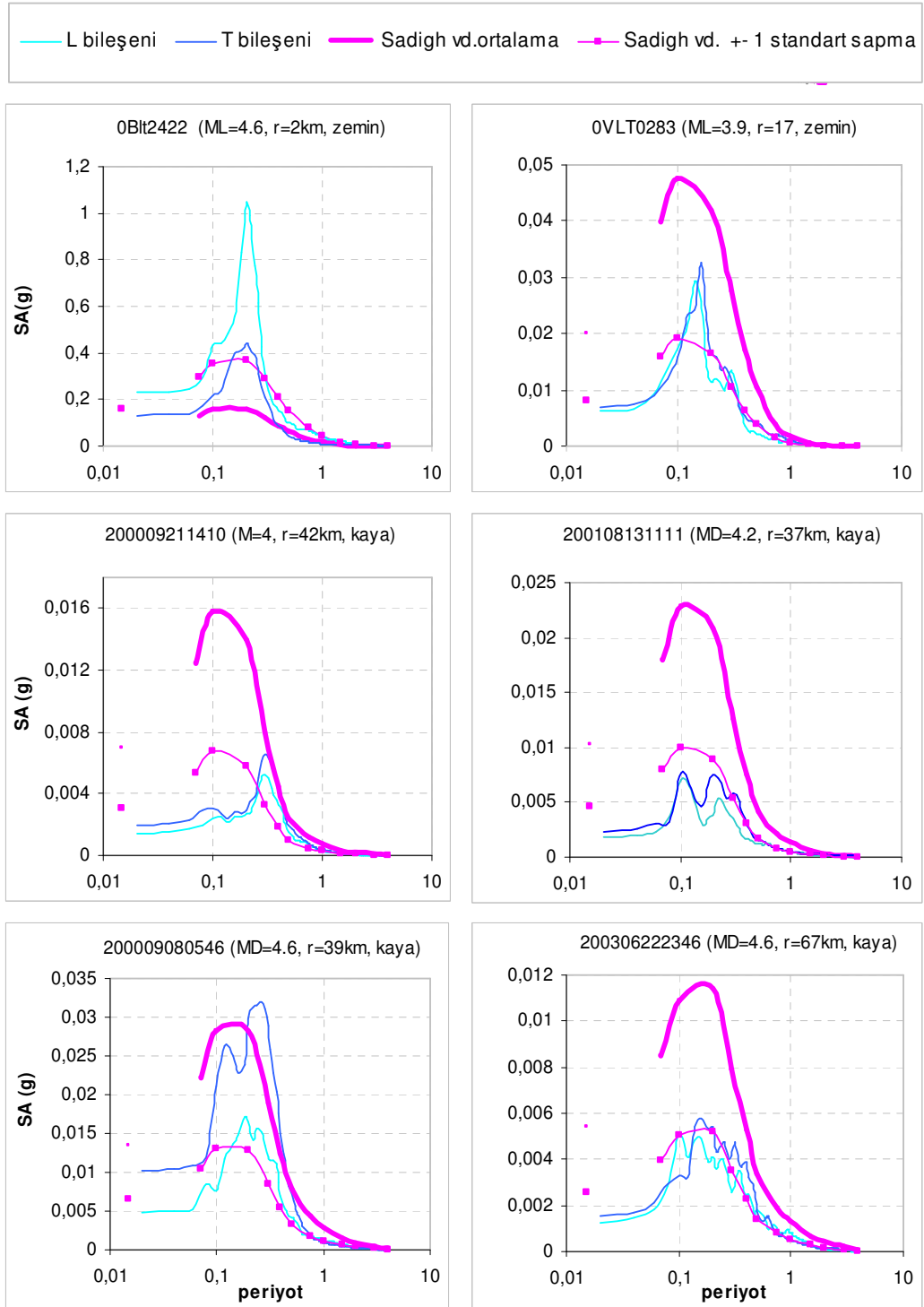
Avrupa ve Ortadoğu'dan elde edilen verilere dayanan Ambraseys vd. [133] ilişkisi yalnız sismik momentleri belirlenebilen depremleri kapsamaktadır. Diğer manyitüd ölçeklerinin ampirik olarak dönüşümü, belirsizliği arttırmamak amacıyla tercih edilmemiştir. Kaynak mesafesi, fayın yüzeydeki izdüşümüne olan en yakın uzaklık olarak tanımlanmış, ancak  $M_w \leq 6$  büyüklüğündeki, faya ait tanımlamaları rapor edilmemiş depremler için dış merkez uzaklığı kullanılmamıştır. Fay tipleri, ters (thrust), yanal atımlı, normal ve belirsiz (odd) olmak üzere 4 grupta temsil edilmektedir. 091t2422 nolu Balıkesir kaydının alındığı 1983 Biga-Çanakkale

depremi fay mekanizması, Ambraseys vd. [133] ilişkisinin veri setinde “belirsiz” grubunda tanımlanmaktadır. Yerel zemin şartları üst 30 m nin kayma dalgası hızına dayalı olarak 3 grup (yumuşak zemin- $V_s \leq 360$  m/s, sert zemin- $360 \text{ m/s} \leq V_s \leq 750$  m/s, kaya  $V_s \geq 750$  m/s) altında toplanmıştır. Abrahamson-Silva [132] ilişkisinden farklı olarak bağıntı, yer hareketinin en büyük yatay bileşenini tahmin etmektedir.

Özbey vd. [134] tarafından geliştirilen azalım modeli, Türkiye'nin kuzeybatı bölgesinde 1994-2001 yılları arasındaki (1999 Kocaeli- $M_w=7.4$  ve 1999 Düzce- $M_w=7.2$  depremlerini de kapsayan) moment büyüklüğü 5 in üzerinde ve kırık yüzeyinin izdüşümüne en yakın uzaklığı 100 km nin altındaki kayıtlara dayanmaktadır. Yerel zemin şartları üst 30 m nin ortalama kayma dalgası hızına dayalı olarak temsil edilmektedir. Kuzeybatı Türkiye için bölgesel bir çalışma olması nedeniyle fay tipi parametresi içermeyen ilişki, normal ve yanal atımlı faylanmaya sahip depremler için geçerli olmaktadır. İlişki de yer hareketi parametrelerinin, yatay bileşenlerine ait geometrik ortalamalar tahmin edilmektedir.

Kaliforniya depremlerinden elde edilen verilere dayalı olarak hazırlanan Sadigh vd. [130] azalım ilişkisi, moment büyüklükleri 4 ile 8 in üstü arasında değişen depremler ve 100 km ye kadar olan mesafeler için geçerlidir. Veri setindeki normal fay tipine sahip az sayıdaki depreme ait pik değerlerin, yanal atımlı depremlerinkine oranla çok farklı olmaması nedeniyle, normal ve yanal atımlı fay tipindeki depremler tek bir grup altında toplanmıştır. Yatay bileşenlerin geometrik ortalamasının belirlendiği ilişkide, ters fay mekanizması durumundaki genlikler, yanal atımlı depremler için bulunan değerlerin 1.2 katı alınarak hesaplanmaktadır. Ana kaya üzerindeki zemin tabakasının derinliğinin 20 m den fazla olduğu bölgeler, zemin olarak tanımlanmaktadır.

Sadigh vd. [130] ilişkisiyle karşılaştırılan diğer 6 kayıta, spektral ivmeler genellikle azalım ilişkisiyle bulunan ortalama değerlerin altında ve -1 standart sapma değerlerindedir. +1 standart sapma değerinin üzerinde spektral ivmeler gösteren tek kaydın,  $r=2$  km uzaklık nedeniyle yakın odak etkisi gösterdiği düşünülebilir (Şekil 5.11).

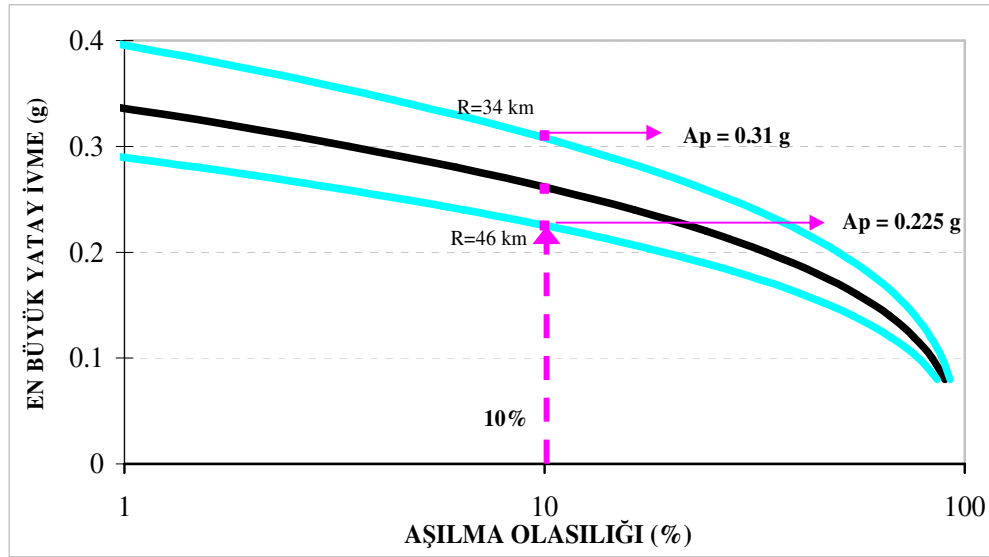


Şekil 5.11 Sadigh vd. [130] spektral azalım ilişkisi ile Balıkesir istasyonlarında uygun şartlardaki yer hareketi kayıtlarının karşılaştırılması

#### 5.4 Balıkesir için Azalım İlişkilerine Dayalı Yer Hareketi Parametreleri

Bu bölümde, Ansal [127] tarafından sismik tehlikenin olasılıksal yöntemlerle değerlendirildiği analizler sonucu bulunan, tasarım depremi büyüklüğü  $M_s=7.5$  ve dış merkez uzaklığı  $R=40$  km değerlerine dayalı olarak, ana kaya seviyesindeki en büyük ivme değer aralığı ve spektral ivmeler belirlenmiştir.

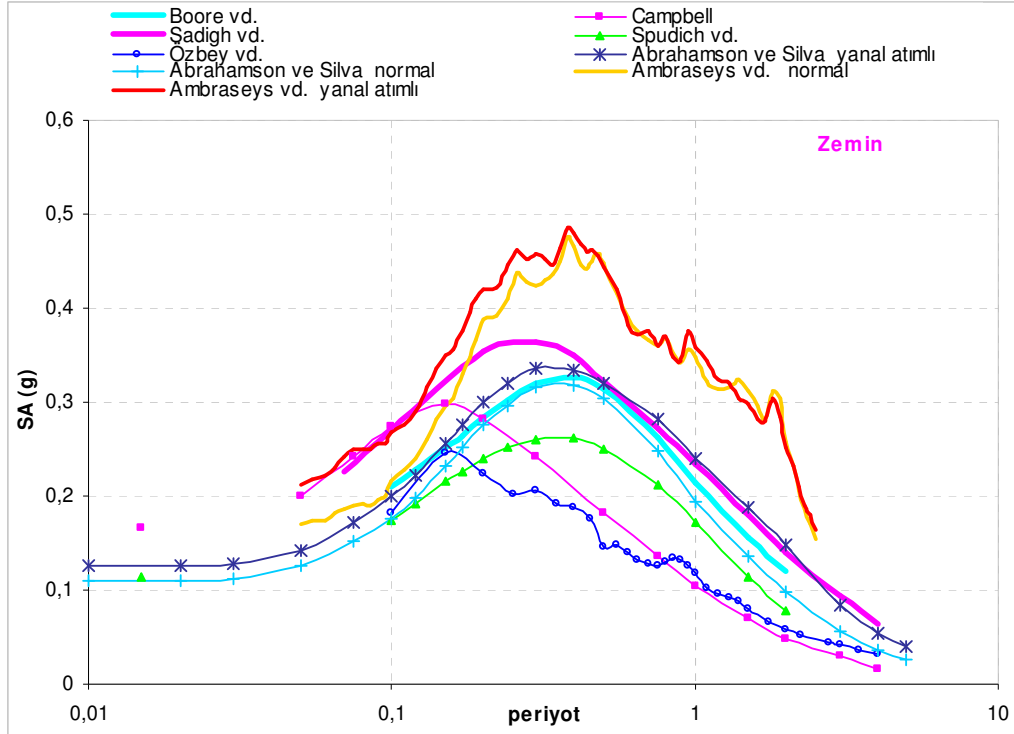
Balıkesir yerleşim alanı sınırlarının 6 km yarıçapındaki bir alan içinde kaldığı göz önüne alındığında, Ansal [128] azalım ilişkisine dayalı % 10 aşılma olasılığına sahip en büyük ivmenin 0.23g ile 0.31g arasında değişebileceği görülmektedir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 Ansal [128] ilişkisine dayalı olarak % 10 aşılma olasılığına sahip en büyük ivmenin, Balıkesir yerleşim alanı sınırları içindeki değişimi

Tasarım depremi değerleri için farklı azalım ilişkilerine dayalı spektral ivmeler, zemin (Şekil 5.13) ve kaya (Şekil 5.14) şartları için belirlenmiştir. Özbey vd. [134] ve Ambraseys vd. [133] dışındaki azalım ilişkileri, Kuzey Amerika'nın batısını kapsayan aktif tektonik bölgelerdeki sığ kabuk hareketleri grubunda derlenmiş ilişkilerdir. Bu ilişkilerdeki fay tipi faktörü genel olarak ters ve yanal

atımlı depremlere ait hareketler arasındaki farkı yansıtmaktadır. Bunun sebebi çoğunlukla, veri tabanlarında normal fay tipindeki depremlerin çok az sayıda bulunması şeklinde açıklanmaktadır. Bu ilişkilerin arasında yalnız, Abrahamson-Silva [132] modelinde normal ve yanal atımlı fay tipleri ayrılmaktadır.

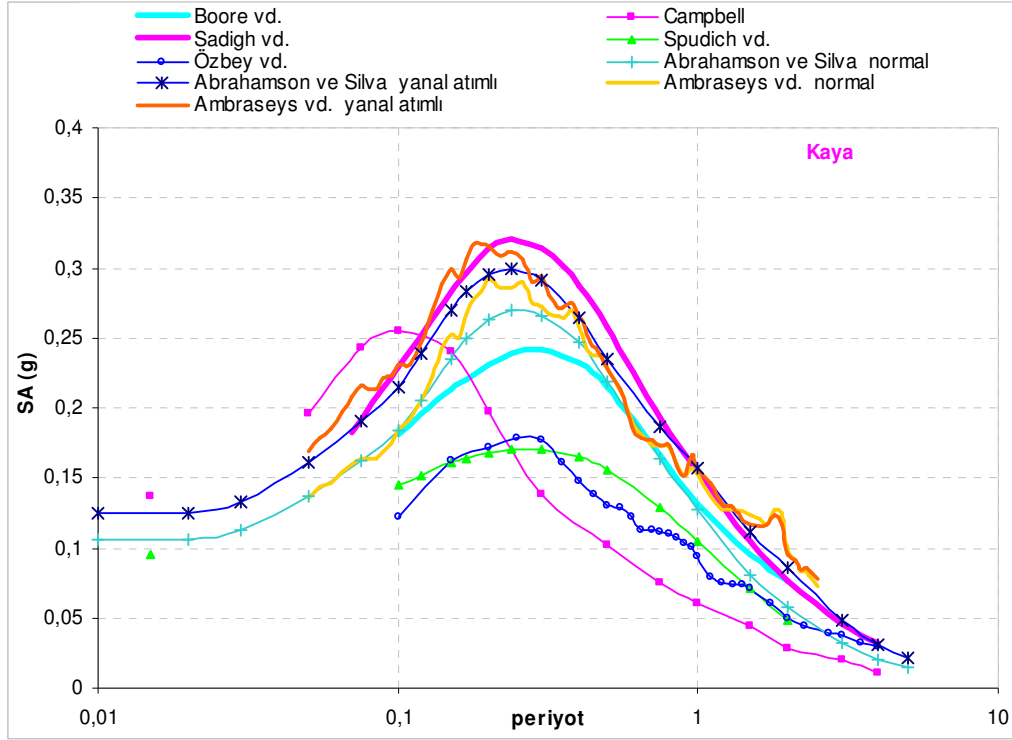


Şekil 5.13 Balıkesir tasarım depremi için literatürdeki azalım ilişkilerine dayalı, zemin şartlarındaki spektral ivmeler

Bu gruptaki ilişkilerde, kaya ve zemin şartlarında en düşük spektral ivmeler, Spudich vd. [135] bağıntısına dayanmaktadır. Bu azalım ilişkisindeki veriler, tüm dünyada açılma bölgelerindeki yer hareketlerini kapsamaktadır. İlişki, diğer modellerin normal fay tipindeki depremler için yer hareketi tahminlerinin çok yüksek olduğunu göstermektedir [131]. Açılma bölgeleri bazen veya çoğu zaman normal ve yanal atımlı fayların birlikte ve aynı anda olduğu bir özellik göstermektedir. Yatay hareket bileşenlerinin geometrik ortalamasını modelleyen ilişki, moment büyüklüğü 5-7.7 arasında kalan ve 70 km mesafedeki açılma rejimli depremler için



önerilmektedir. Yerel zemin şartları kaya ve zemin olmak üzere iki sınıf altında temsil edilmektedir [135].



Şekil 5.14 Balıkesir tasarım depremi için literatürdeki azalım ilişkilerine dayalı, kaya şartlarındaki spektral ivmeler

Campbell [136] ilişkisine dayalı spektrumun frekans içeriği ise diğer ilişkilerinkinden belirgin bir şekilde ayrılmaktadır. Moment büyüklüğü 5 in üstünde ve sismik kırılmanın 60 km nin altında olduğu mesafeler için, yatay yer hareketi bileşenlerinin geometrik ortalamasını vermektedir. Yerel zemin şartları ise zemin, yumuşak kaya ve sert kaya şeklinde 3 grup ile tanımlanmaktadır.

Zemin şartlarında Abrahamson-Silva [132] ilişkisi ile çok yakın spektral ivmelere sahip Boore vd. [137] azalım ilişkisi, kaya şartlarında oldukça farklı sonuçlar göstermektedir. En büyük yatay hareket bileşenini veren ilişki, Kuzey Amerika'nın batısından seçilen kuvvetli yer hareketi verilerine dayanmaktadır.

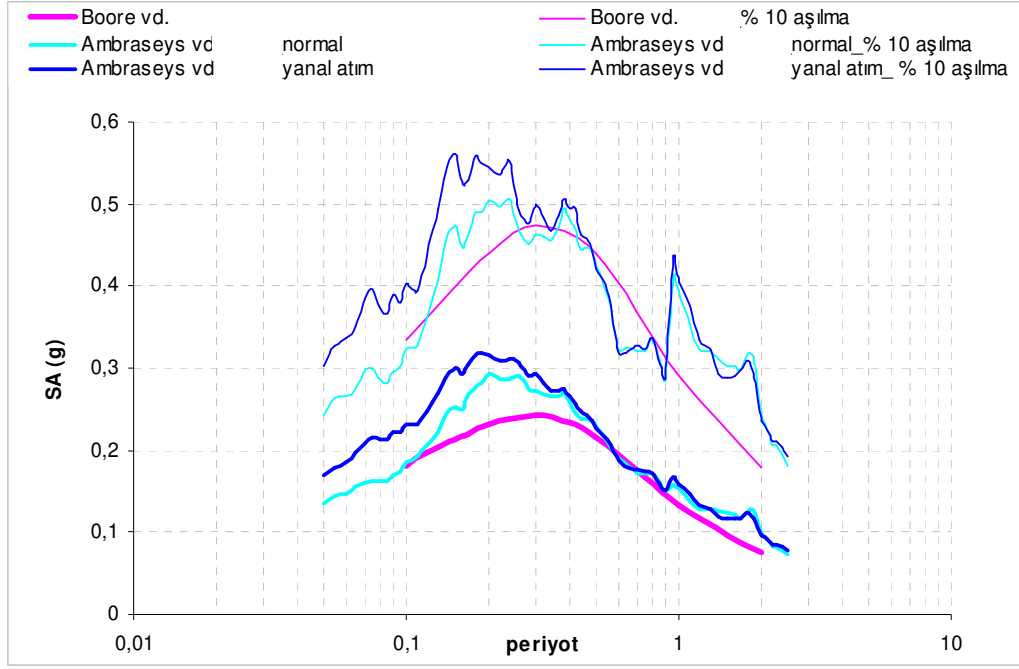
Moment büyüklüğü 5.5-7.5 arasında olan depremler ve 80 km nin altındaki uzaklıklar için geçerlidir. Yerel zemin şartları, üst 30 m deki ortalama kayma dalgası hızına dayalı olarak, kaya (620 m/s) ve zemin (310 m/s) gruplarına ayrılmaktadır.

Bölgesel bir çalışma olması nedeniyle yalnızca normal ve yanal atımlı faylanmaya sahip depremler için geçerli olan Özbey vd. [134] ilişkisi, genel olarak Spudich vd. [135] ilişkisi ile yakın sonuçlar göstermektedir.

Zemin şartlarında diğer azalım ilişkilerine nazaran belirgin bir farklılık gösteren Ambraseys vd. [133] ilişkisinin bir diğer farkı da, Kaliforniya ve Avrupa'daki yer hareketleri arasında önemli farklar olduğunu gösteren çalışmalara dayalı olarak, veri tabanının Avrupa ve Ortadoğu bölgesiyle sınırlı tutulmuş olmasıdır. İlişkiye dayalı kaya şartlarındaki spektrumların, Sadigh vd. [130] ve Abrahamson-Silva [132] bağıntılarına ait sonuçlarla daha yakın olduğu görülmektedir.

Türkiye' de, kaydedilmiş kuvvetli yer hareketi verilerinin Kaliforniya verileri kullanılarak elde edilen azalım ilişkileri ile uyum sağlamasına dayalı olarak, Boore vd. [137] ve Sadigh vd. [130] bağıntılarından elde edilen sonuçların ortalamasının kullanılması önerilmektedir. Tek bir azalım ilişkisi kullanılmasının gerekli olduğu durumlarda ise, Boore vd. [137] ilişkisi Türkiye için kullanılabilir en uygun ilişki olarak gösterilmektedir [8].

Balıkesir için ana kaya seviyesinde (kayma dalgası hızı 760 m/sn) eş tehlike spektrumları, Boore vd. [137] ve Ambraseys vd. [133] azalım ilişkilerine dayalı olarak, 50 yılda % 10 aşılma olasılığı için hesaplanmıştır (Şekil 5.15).



Şekil 5.15 Balıkesir için ana kaya seviyesinde, Boore vd. [137] ve Ambraseys vd. [133] azalım ilişkilerine dayalı, ortalama ve % 10 aşılma olasılığına sahip spektral ivmeler

### 5.5 Hedeflenen Yer Hareketi Parametreleri ile Uyumlu Kayıtların Üretilmesi

Kuzey Amerika' nın doğusunu da kapsayan, dünyanın birçok bölgesinde orta dereceli ve üstü büyüklükteki depremler için farklı uzaklıklar ve farklı yerel zemin şartlarındaki yer hareketi kayıtları kısıtlıdır. Bu nedenle teorik sentetik yer hareketi kayıtları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [138]. Bu doğrultudaki uygulamalardan biri de, gerçek kayıtların hedeflenen yer hareketi parametreleri ile uyumlu şekilde değiştirilmesidir. Bu amaçla uygulanabilecek en basit yöntem, belirlenen maksimum yer hareketi genliğine dayalı olarak zamana bağlı kayıtların oranlanmasıdır. Bu yöntemde orantı faktörünün (hedeflenen genlik ile gerçek kaydın genliği arasındaki oran) 0.25 ile 4 arasında kalması önerilmektedir [16].

Kuvvetli yer hareketi benzeşiminde kullanılan yöntemler bugün 4 ana grup altında toplanmaktadır; (a) Analitik Yaklaşımlar, (b) Ampirik Green Fonksiyonları, (c) Stokastik Benzeşim, (d) Hibrid Yöntemler

Analitik yaklaşımlar düşük frekans aralığı (0-1 Hz) için geçerli olmaktadır. Deprem kaynağı, dinamik ya da kinematik olarak modellenirken, dalga yayılım ortamı için 3 boyutlu sonlu elemanlar, 3 boyutlu sonlu farklar ya da bunların varyasyonları kullanılabilir.

Ampirik Green Fonksiyonu yönteminde, küçük depremlerin kayıtları uygun şekilde oranlanıp toplanarak simüle edilir. Büyük depremlerin benzeşiminde küçük depremlerden yararlanma fikrinin temelini, kaynak parametrelerinin ve kaynak spektrumunun ( $w^2$  modeli) benzerlik kanunu oluşturmaktadır. Eldeki kayıtların arzu edilen frekans aralığının tümü için sağlıklı bir frekans içeriğine sahip olmaması yöntemin zayıf noktası olarak görülmektedir.

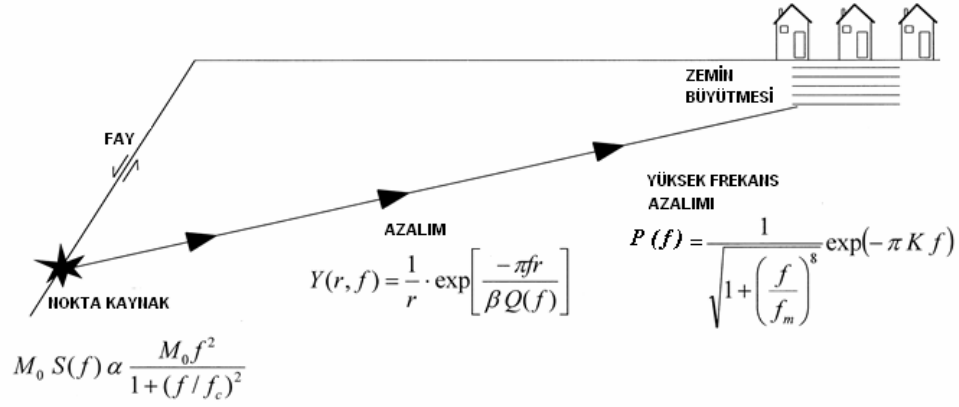
Deprem yer hareketinin benzeşiminde kullanılan stokastik yaklaşımlar, istatistiksel yöntemlere ve ampirik değerlendirmelere dayanması açısından bir mühendislik yöntemidir. Gauss tipi beyaz gürültü olarak kabul edilen yer ivmeleri filtrelenmekte ve ampirik verilere dayanarak oranlanan bir zaman zarf fonksiyonu ile çarpılmaktadır. Uygulanacak filtre parametreleri; (a) hesaplanan yer hareketinin özellikleri ampirik yöntemlerle saptanan Fourier genlik spektrumuna uyum sağlayacak şekilde, (b) bazı teorik spektrumlara uygun sonuçlar verecek şekilde ve (c) bölgesel kaynak ve dalga yayılım özellikleri ile yerel zemin koşullarına göre belirlenebilir.

Eldeki problemin tanım ve çözüm özelliklerine en uygun olduğuna karar verilen iki benzeşim yöntemini içeren Hibrid yöntemler, geniş bir frekans alanını (0-50 Hz) kapsamaktadır. Düşük ve yüksek frekanslı yer hareketi farklı yöntemler yardımıyla simüle edilir ve daha sonra birleştirilir. Özellikle yakın fay bölgesinde inşa edilecek önemli mühendislik yapıları için tasarıma esas deprem yer hareketinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [139].

Yapay yer hareketi kayıtlarının üretilmesinde gerçek kayıtların kullanımı, Fourier faz spektrumu ve davranış spektrumunun düzleştirilmemiş karakteristiği gibi doğrusal olmayan dinamik analizler için önemli bazı özelliklerin korunması amacıyla tercih edilmektedir. Hedeflenen davranış spektrumu ile mümkün olduğu kadar uyumlu bir yer hareketi kaydı oluşturulmasında, zaman tanım alanında ve frekans tanım alanında spektral uyuşum metotları bulunmaktadır [138].

RASCAL, gerçek yer hareketi kaydına ait Fourier Faz Spektrumunun kullanımıyla birlikte rassal titreşim teorisine (RVT) dayalı geliştirilen yarı-ampirik bir yöntemdir. RASCAL prosedürü gerçek kaydın Fourier genlik spektrumunu 2 aşamada değiştirmektedir. İlk aşamada Fourier genlik spektrumuna uygulanan faktör fonksiyonu, Brune kaynak spektrumu ile birlikte RVT davranış spektrumunun hedef davranış spektrumuna oranıdır. Belirlenen faktör fonksiyonu ile daha sonra Brune Fourier genlik spektrumu düzenlenerek tekrarlı analizlerin ilk Fourier genlik spektrumu elde edilir. İkinci aşamadaki faktör fonksiyonu, elde edilen genlik spektrumunun gerçek kaydın faz spektrumu ile birleştirilmesi sonucu hesaplanan yer hareketinin davranış spektrumuna dayanmaktadır. Her iki aşama içinde farklı sayıda tekrarlı analizler öngörülebilmektedir [138, 4].

Yer hareketine ait Fourier genlik spektrumunun parametrik ya da fonksiyonel tanımının, hedeflenen parametreler için geliştirilen rassal faz spektrumu ile birleştirildiği simulasyon yöntemi çoğunlukla stokastik yöntem olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemin temelini, yer hareketi spektral genliğinin sismolojik modelini, yüksek frekanslı hareketi temel olarak rassal kabul eden mühendislik kavramı ile birleştiren çalışmalar oluşturmaktadır [140]. Özellikle yüksek frekanslı yer hareketi ( $f > 0.1$  Hz) simulasyonu için geçerli olan stokastik yöntemde, yer hareketi modelinin temel elemanlarını, basit fonksiyonel formdaki kaynak özellikleri, dalga yayılım ortamı ve yerel zemin koşulları oluşturmaktadır (Şekil 5.16).



Şekil 5.16 Yer hareketi modellemesinde kullanılan Fourier genlik spektrumunun temel elemanları

Noktasal bir deprem kaynağından yayılan kayma dalgalarının, kaynaktan  $r$  km uzaklıktaki bir noktada yarattığı yer hareketine ait teorik Fourier genlik spektrumu;

$$A(f,r) = C_0 M_0 S(f) Y(f,r) P(f) Z(f) \quad (5.3)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir.  $C_0$  frekansdan bağımsız sabit,  $M_0$  sismik moment,  $S(f)$  kaynak spektrumu,  $Y(f,r)$  azalım fonksiyonu,  $P(f)$  yüksek frekans azalım fonksiyonu ve  $Z(f)$  yerel zemin koşullarının etkisini göstermektedir. Burada

$$C_0 = (R P F) / 4 \Pi \rho \beta^3 \quad (5.4)$$

( $R=0.55$ , ortalama yayılım parametresi,  $P=0.707$  iki yatay bileşen ayrışma faktörü,  $F=2$  serbest yüzey etkisi,  $\rho$  ( $\text{gr/cm}^3$ ) kaynak bölgesindeki malzemenin yoğunluğu ve  $\beta$  ( $\text{km/s}$ ) kayma dalgası hızı) ile tanımlanmaktadır [139].

En yaygın kullanılan kaynak spektrumu,  $w^2$  Brune spektrumudur;

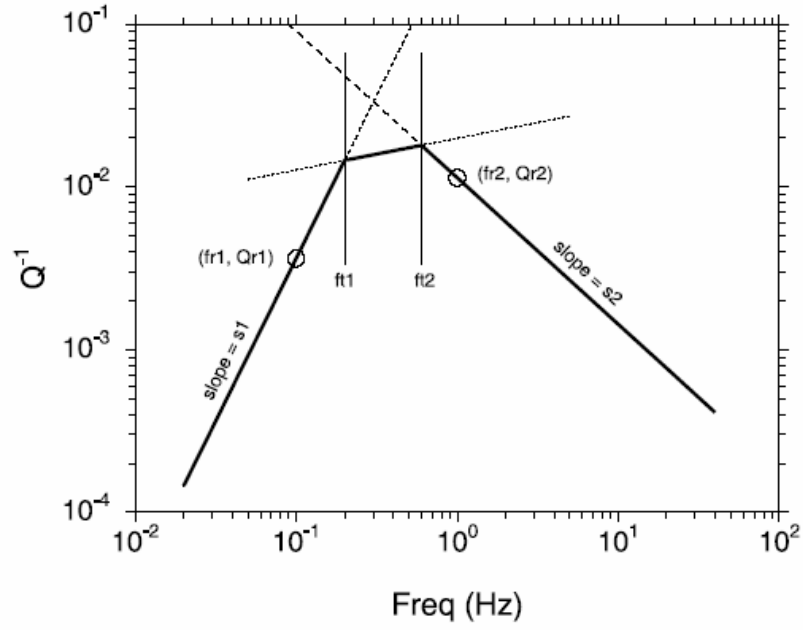
$$S(f) = \frac{(2pf)^2}{1 + (f/f_0)^2} \quad (5.5)$$

Burada  $f_0$ , sismik moment ve gerilme farkı ile ilgili köşe frekansını göstermektedir. Köşe frekansı, Fourier genlik spektrumunda yüksek ve düşük frekans eğilimlerinin gözlemlendiği frekanslardır.

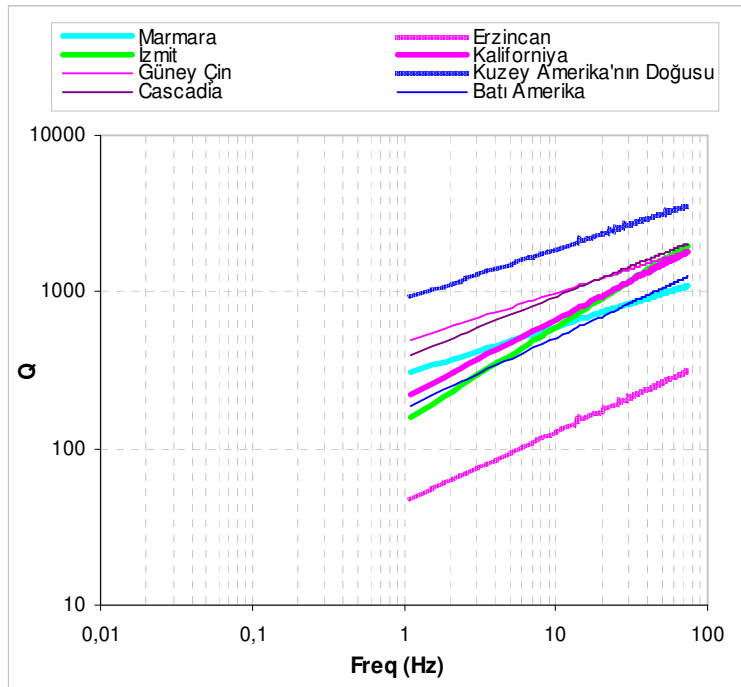
Gerilme farkı (stress drop) orta ve büyük depremler için, plakalar arası depremlerde ortalama 30 bar (3 Mpa), plakalarda oluşan depremlerde ortalama 100 bar (10 Mpa) olarak belirlenmektedir [141]. Kuzey Amerika'nın batısı ve doğusu için genellikle gerilme farkı, sırasıyla 50 bar ve 100 bar olarak kullanılmaktadır [16]. Kaliforniya için gerilme farkının 50-100 bar arasında ve genel olarak 100 bar'ın altında olduğu belirtilmektedir [142, 143]. Son zamanlardaki bazı bölgesel çalışmalar, gerilme parametresini manyitüd bağımlı olarak kullanmaktadır [144, 145].

Azalım fonksiyonu, sismik enerjinin geometrik yayılımına bağlı geometrik azalım ve inelastik azalım fonksiyonlarını içermektedir. Frekansa bağlı inelastik azalım (kalite faktörü-Q) 3 doğru parçasının birleşimi ile temsil edilmektedir (Şekil 5.17). Ancak kalite faktörünün yüksek periyotlardaki s1 kolunun belirlenmesi için yeterli veri mevcut değildir [140]. Literatürdeki bazı çalışmalardan [139, 140, 146-150] derlenen yüksek frekans aralığındaki kalite faktörleri Şekil 5.18'de görülmektedir.

Yaklaşık olarak 1500 Kaliforniya yer hareketi kaydını kullanan ve kayma dalgası için Fourier genlik spektrumunun ampirik regresyon analizlerinin yapıldığı bir çalışmada [146], inelastik azalım  $Q(f)=210 f^{0.50}$  bağıntısı ile tanımlanmaktadır. İzmit konteynır limanı için tasarıma esas deprem yer hareketinin belirlenmesinde Hibrid yöntemle dayalı çalışma [139], 1-50 Hz frekans aralığına ait kalite faktörü için  $Q(f)=150 f^{0.60}$  bağıntısını kullanmaktadır. Bölgesel azalımın incelendiği bir diğer çalışmada [147], Marmara Bölgesi için yer hareketi modelinde  $Q(f)=300 f^{0.30}$  bağıntısı elde edilmiştir. Batı Amerika için ise  $Q(f)=180f^{0.45}$  inelastik azalım modelinin kullanılabilmesi belirtilmektedir [140].



Şekil 5.17 Frekans bağımlı kalite faktörü



Şekil 5.18 Literatürdeki bazı çalışmalara ait yüksek frekans aralığındaki kalite faktörleri



Yüksek frekans azalım fonksiyonu, yüzeye yakın tabakalardaki aşınmanın neden olduğu düşünülen, yüksek frekanslardaki spektral genliklerin azalmasını içermektedir. P(f) fonksiyonu için,

$$P_1(f)=\exp(-\pi \kappa f) \quad (5.6)$$

$$P_2(f)=[1+(f / f_m)^8]^{-1/2} \quad (5.7)$$

modelleri önerilmektedir [141]. P<sub>1</sub>(f) modeli spektral azalım faktörüne (κ) dayanmaktadır. Bölge ve yerel zemin bağımlı bir karakter gösteren κ parametresinin [151, 152], yüzey kayalarının nonlinear davranışına dayalı olarak manyitüd bağımlı olarak düşünülmesi gerektiği son çalışmalarla gösterilmektedir [144].

### 5.5.1 RASCAL Programı ile Üretilen Yer Hareketi Kayıtları

RASCAL programı ile yapılan simülasyonların ilk aşamasında; gerilme farkı ve kalite faktörlerindeki değişimin üretilen kayıtlar üzerindeki etkisi incelenmektedir. Bu amaçla, gerilme farkının Δσ=50-100 bar ve kalite faktörü sabitinin Q=100-300 arasında değişen değerleri ile Tablo 5.2' de gösterilen 6 farklı durum için simülasyonlar yapılmıştır. Programın girdisi olan gerçek kayıtlar, Türkiye' deki moment büyüklüğü 5 den büyük ve faya olan uzaklıkları yaklaşık olarak 20 km<r<60 km ile sınırlı olan depremler arasından seçilmiştir. Burada amaç, Balıkesir için belirlenen tasarım parametreleri ile büyüklük ve frekans içeriği açısından uyumun sağlanmasıdır. Bu doğrultuda belirlenen ve istasyon yerel zemini kaya olan 6 yer hareketi kaydı Tablo 5.3' de gösterilmektedir [133].

Tablo 5.2 Gerilme farkı ve kalite faktörü sabitinin değişen değerlerine dayalı olarak belirlenen 6 farklı durum

| Durum No | Gerilme Farkı $\Delta\sigma$ | Frekans bağımlı kalite faktörü $Q(f) = Q f^{0.5}$ |
|----------|------------------------------|---|
| 1        | $\Delta\sigma=100$           | $Q= 200 f^{0.5}$                                  |
| 2        | $\Delta\sigma=50$            | $Q= 200 f^{0.5}$                                  |
| 3        | $\Delta\sigma=100$           | $Q= 100 f^{0.5}$                                  |
| 4        | $\Delta\sigma=50$            | $Q= 100 f^{0.5}$                                  |
| 5        | $\Delta\sigma=100$           | $Q= 300 f^{0.5}$                                  |
| 6        | $\Delta\sigma=50$            | $Q= 300 f^{0.5}$                                  |

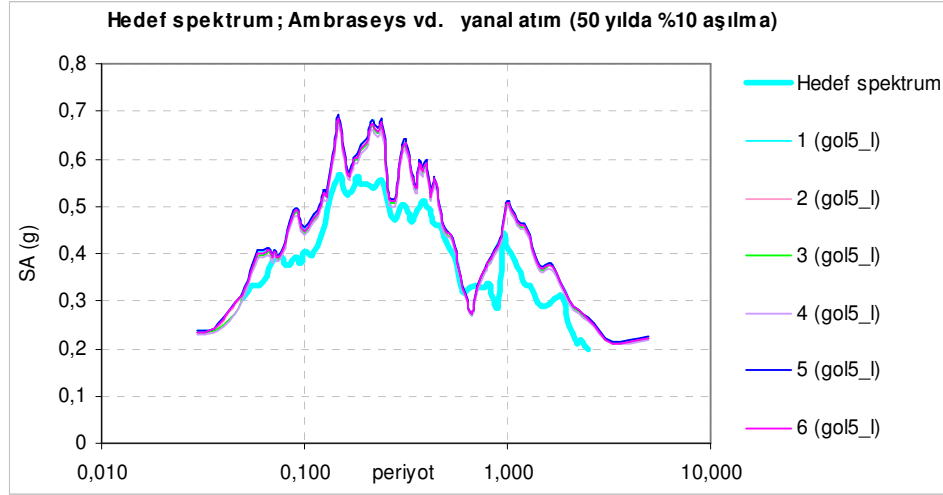
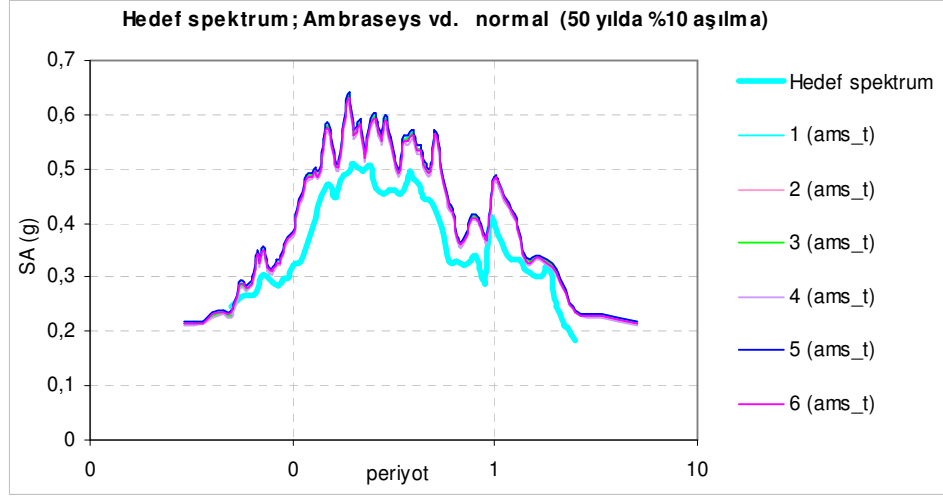
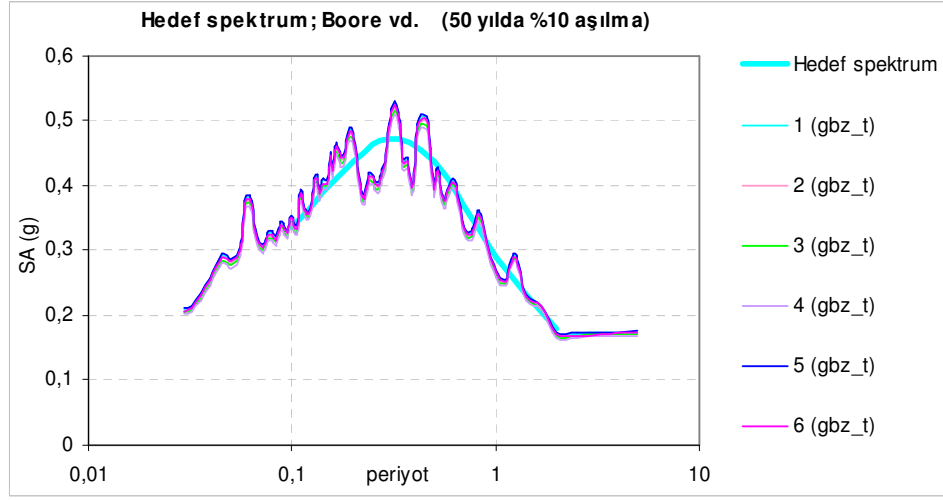
Tablo 5.3 Rascal programında kullanılan yer hareketi kayıtları

|                    | Tarih      | Zaman    | $M_w$ | Fay Kırılma Mekanizması |             | İstasyon             | Faya Uzaklık |
|--------------------|------------|----------|-------|-------------------------|-------------|----------------------|--------------|
| Kocaeli            | 17.08.1999 | 00:01:40 | 7.6   | yanal atım              | <b>gbz</b>  | Gebze TMAM           | 30 km        |
| Kocaeli            | 17.08.1999 | 00:01:40 | 7.6   | yanal atım              | <b>İst</b>  | İstanbul B.İ.M.      | 61 km        |
| Biga Çanakkale     | 05.07.1983 | 12:01:27 | 6.1   | belirsiz                | <b>edc</b>  | Edincik Kan.Göz.İst. | 56 km        |
| Doğanşehir Malatya | 05.05.1986 | 03:35:38 | 6     | belirsiz                | <b>gol5</b> | Gölbaşı Dev. Has.    | 27 km        |
| Doğanşehir Malatya | 06.06.1986 | 10:39:47 | 5.8   | yanal atım              | <b>gol6</b> | Gölbaşı Dev. Has.    | 34 km        |
| Amasya             | 14.08.1996 | 01:55:03 | 5.7   | yanal atım              | <b>ams</b>  | Amasya Bay. Müd.     | 33km         |

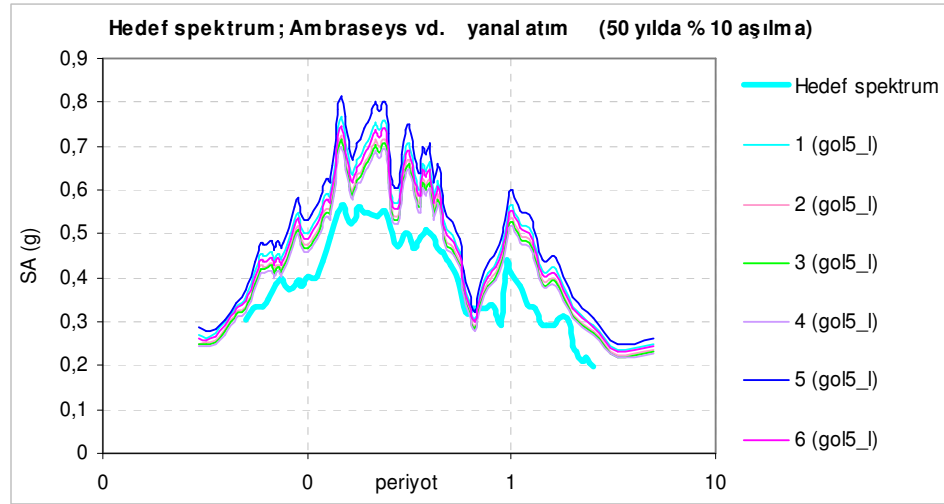
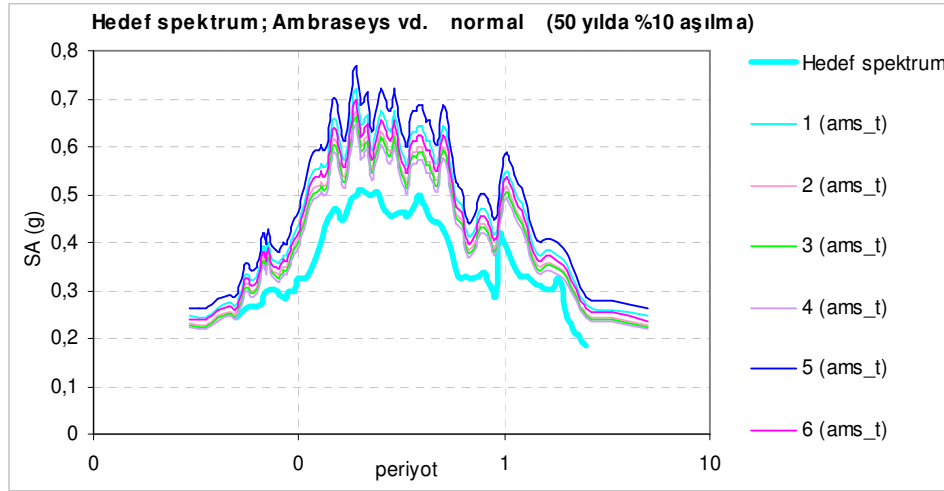
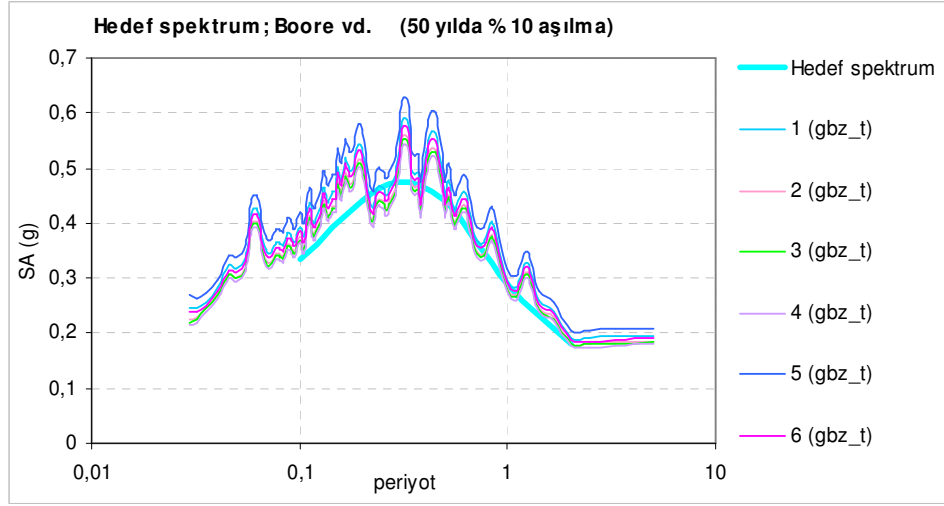
Kaynak ve yol parametrelerinden gerilme farkı ve kalite faktörü dışındaki bölgesel bir diğer parametre de yüksek frekans azalım faktörüdür. Yüksek frekans azalımı için  $\kappa=0.035$  değeri alınmıştır. Programın verisi hedef spektrumlar, Balıkesir' de ana kaya seviyesi için, Boore vd. [137] ve Ambraseys vd. [133] azalım ilişkilerine dayalı olarak belirlenen 50 yılda % 10 aşılma olasılığına sahip eş tehlike spektrumlarıdır. Belirlenen gerilme farkı ve inelastik azalım değerlerine dayalı 6 farklı durum için, üretilen kayıtların davranış spektrumlarındaki değişim Şekil 5.19' da görülmektedir. Balıkesir' de ana kaya seviyesi için belirlenen 3 ayrı hedef

spektrum ve 3 ayrı yer hareketi kaydı için yapılan simülasyon sonuçlarında, gerilme farkı ve kalite faktöründeki değişimin spektral ivmeler üzerinde % 1' in altında çok küçük bir farklılığa neden olduğu görülmektedir. Bu değişim, farklı hedef spektrum ve yer hareketi kaydı kullanılması durumunda elde edilen spektral ivmelerde de benzer oranlarda farklılıklar göstermektedir.

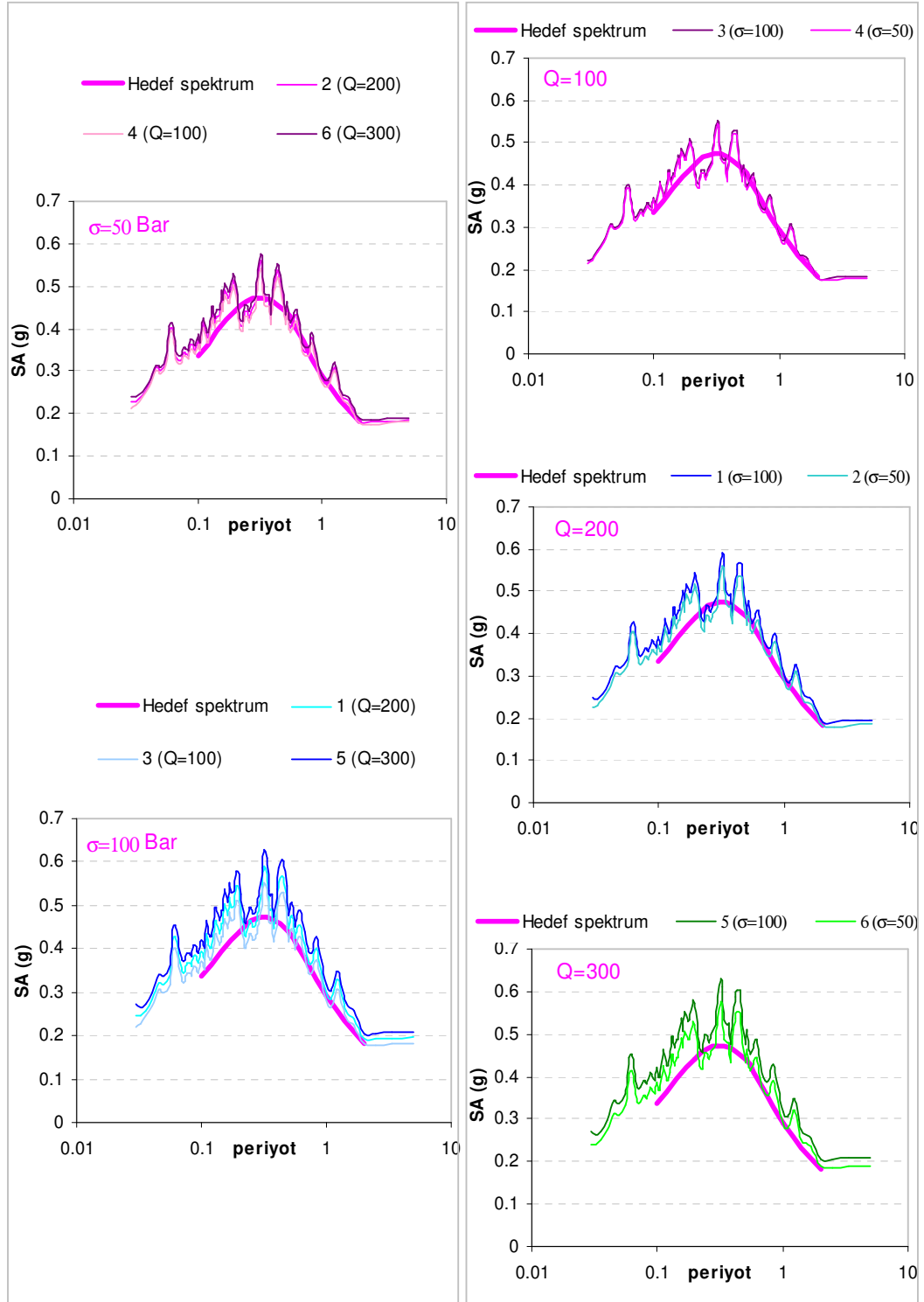
Yüksek frekans azalım parametresi  $\kappa'$  nın da bölgesel bir faktör olması nedeniyle, gerilme farkı ve kalite faktöründeki değişimlerin ayrı ayrı etkilerinin daha iyi gözlenebilmesi amacıyla, 6 farklı durum için simülasyonlar,  $\kappa=0$  alınarak tekrarlanmıştır (Şekil 5.20). Daha belirgin olarak izlenebilen bu farklılıklar, Şekil 5.21' de Gebze kaydı ve Boore vd. [137] hedef spektrumu ile üretilen kayıtlara ait spektrumlar üzerinde incelenebilmektedir. Gerilme farkının sabit olduğu durumda, Q sabitindeki artış inelastik azalımda düşüşe dolayısıyla spektral ivmelerde yükselmeye neden olmaktadır. Spektral ivmelerdeki bu artış, gerilme farkının  $\Delta\sigma=100$  bar olması durumunda %7-8,  $\Delta\sigma=50$  bar olması durumunda ise %3-4 oranındadır. Gerilme farkının daha büyük olması ile inelastik azalımdaki değişim daha belirgin izlenebilmektedir. Sabit kalite faktörü durumunda gerilme farkı ile ortaya çıkan maksimum fark, inelastik azalımın minimum olduğu  $Q=300$  değeri ile üretilen kayıtlarda gözlenmektedir. İnelastik azalımın maksimum olduğu aksi durumda ( $Q=100$ ), gerilme farkının spektral ivmeler üzerindeki etkisinin yok denecek kadar az olduğu söylenebilir.



Şekil 5.19 Gerilme farkı ve kalite faktörü değişiminin, farklı hedef spektrum ve farklı kayıtlar ile üretilen yer hareketleri üzerindeki etkisi ( $\kappa=0.035$  için)



Şekil 5.20 Gerilme farkı ve kalite faktörü değişiminin, farklı hedef spektrum ve farklı kayıtlar ile üretilen yer hareketleri üzerindeki etkisi ( $\kappa=0$  için)



Şekil 5.21 Sol taraf; sabit gerilme farkı için kalite faktöründeki değişimin etkisi, sağ taraf; kalite faktörünün sabit olması durumunda gerilme farkındaki değişimin etkisi ( $\kappa=0$  için)

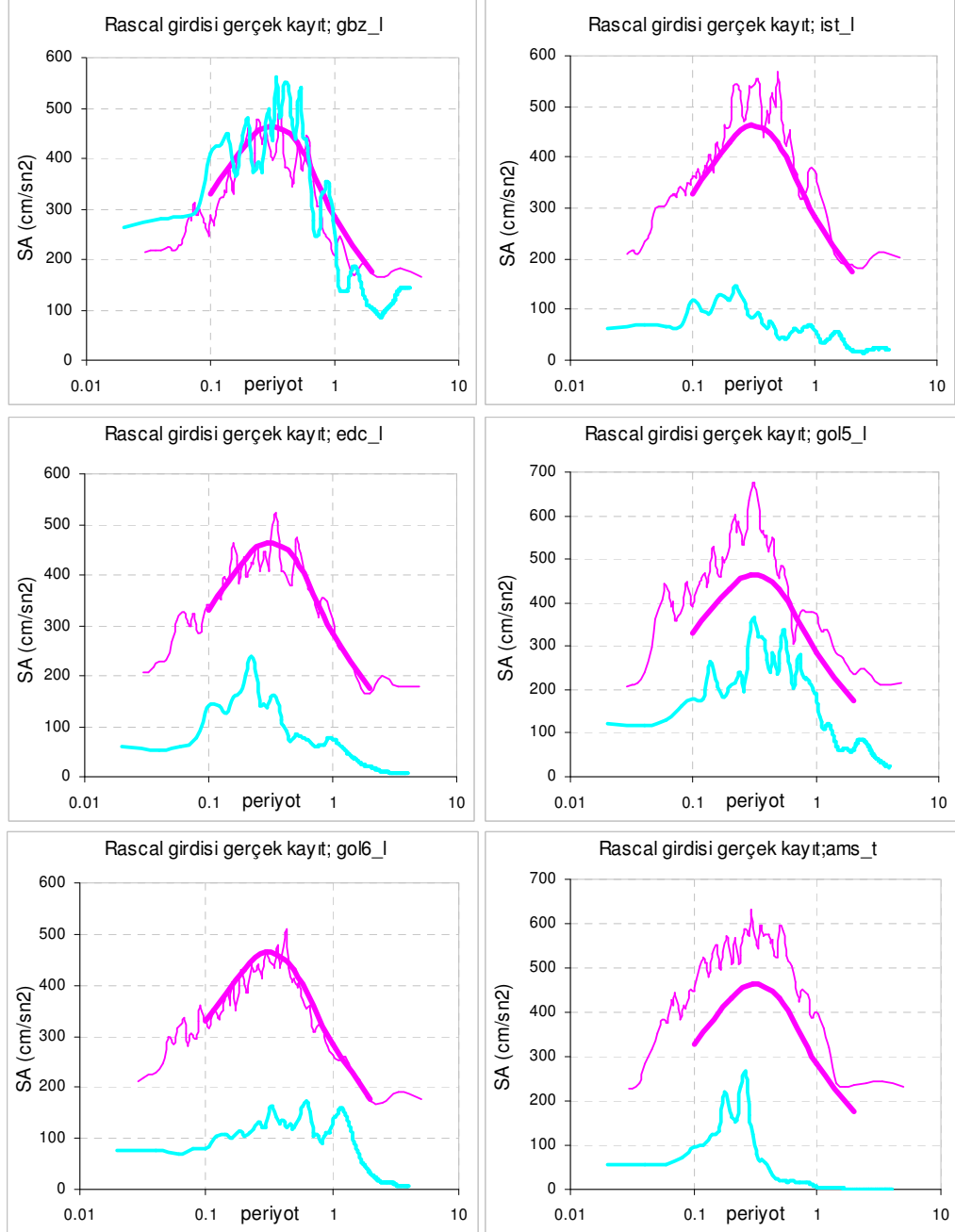
İkinci aşamada, gerilme farkı  $\Delta\sigma=100$  bar, kalite faktörü sabiti  $Q=300$  ve spektral azalım faktörü  $\kappa=0.035$  olarak belirlenen kaynak ve yol parametreleri için, 6 farklı yer hareketi kaydının kullanıldığı simülasyonlar karşılaştırılmaktadır. Hedef spektrumlar, Balıkesir için hesaplanan tasarım parametrelerine dayalı olarak, Boore vd. [137], normal ve yanal atımlı fay durumunda Ambraseys vd. [133] azalım ilişkileri ile belirlenen 50 yılda % 10 aşılma olasılığına sahip spektrumlardır. Üretilen kayıtların ivme spektrumları, programın verisi gerçek kayıtlara ait spektrumlar ve hedef spektrum ile birlikte Şekil 5.22-24' de gösterilmektedir.

Aynı hedef spektrum ile farklı ivme kayıtları kullanarak üretilen yer hareketlerinin spektrumları incelendiğinde; hedef spektrum ile uyumlarının farklı olduğu gözlenmektedir. Boore vd. [137] azalım ilişkisine dayalı hedef spektrum için özellikle gol51 ve amst ivme kayıtları ile üretilen yer hareketi davranış spektrumlarının, hedef spektrum ile spektral ivmeler cinsinden uyumlu olmadıkları görülmektedir (Şekil 5.22). Diğer azalım ilişkilerine dayalı hedef spektrumların kullanılması durumunda da bu kayıtlar benzer sonuçlar üretmektedir (Şekil 5.23, 24). Spektral uyumun en yüksek olduğu simülasyonlar, gerçek kayıt ve hedef spektruma dayalı olarak değişmektedir.

Veri durumundaki her bir kayıt için farklı hedef spektrumlara dayalı olarak üretilen yer hareketlerinin davranış spektrumları Şekil 5.25' de karşılaştırılmaktadır. Üretilen kayıtların spektrumları genel olarak, kullanılan hedef spektrumlara dayalı çok büyük farklılıklar içermemektedir. Ancak iki azalım ilişkisine dayalı eş tehlike spektrumlarına ait frekans içeriğindeki farklılığın en fazla, gol61 kaydı ile üretilen yer hareketinde hissedildiği söylenebilir. 3 ayrı hedef spektrum için de en büyük spektral ivmeler, gol51 kaydını kullanan simülasyonlarda görülmektedir.

Şekil 5.26, her bir hedef spektrum için, 6 farklı yer hareketi kaydı kullanılarak elde edilen yapay kayıtlara ait spektrumları ve ortalamasını göstermektedir. Ortalama spektrumlar, kullanılan hedef spektrumlara çok benzer frekans içeriğinde olmasına karşılık spektral ivmeler daha yüksektir.

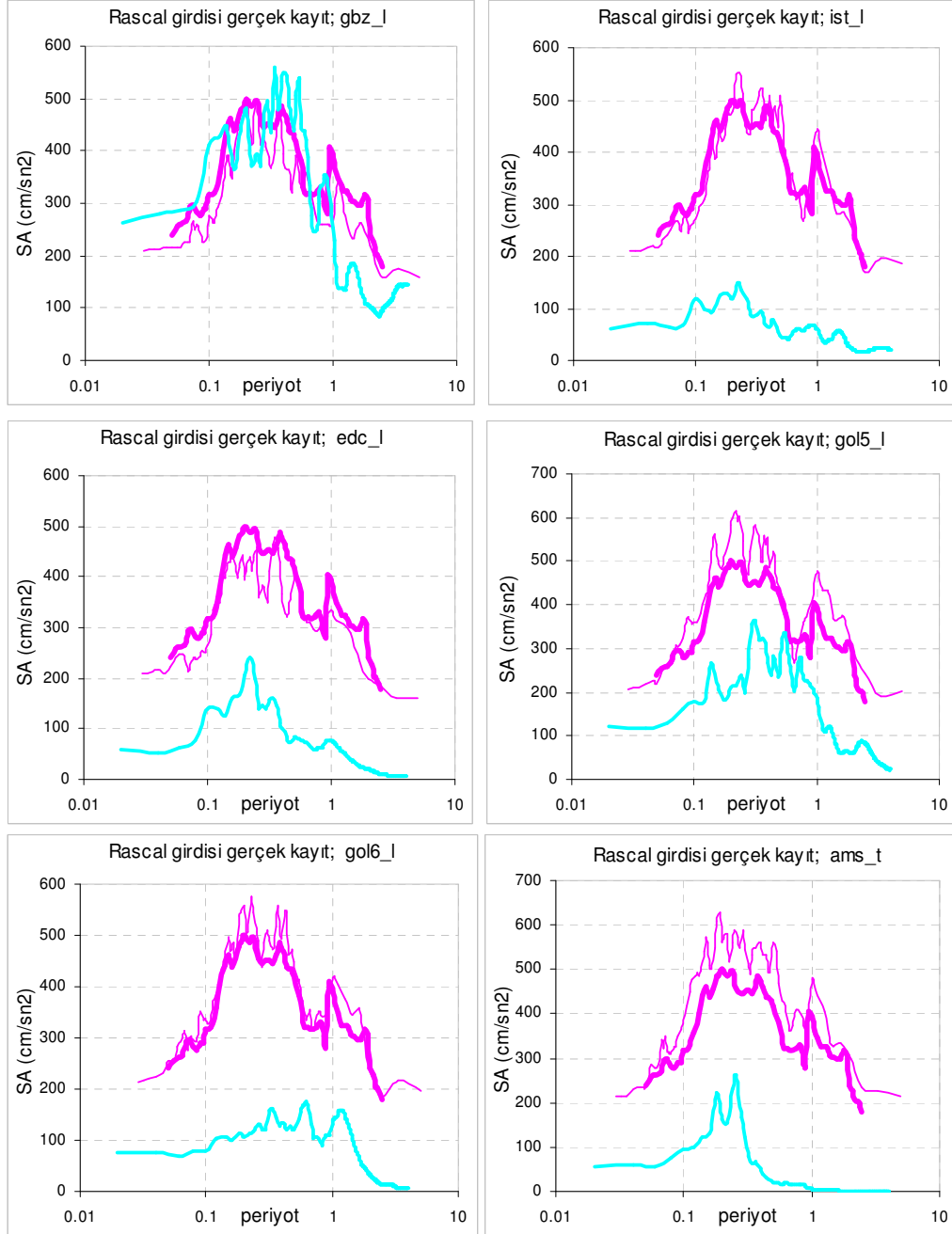
— Hedef spektrum; Boore vd. — Üretilen kaydın spektrumu — Gerçek kayıtların spektrumu



Şekil 5.22 Boore vd. [137] azalım ilişkisine dayalı hedef spektrum ile yapılan simülasyonlarda, kullanılan ve üretilen yer hareketi kayıtlarına ait spektrumlar

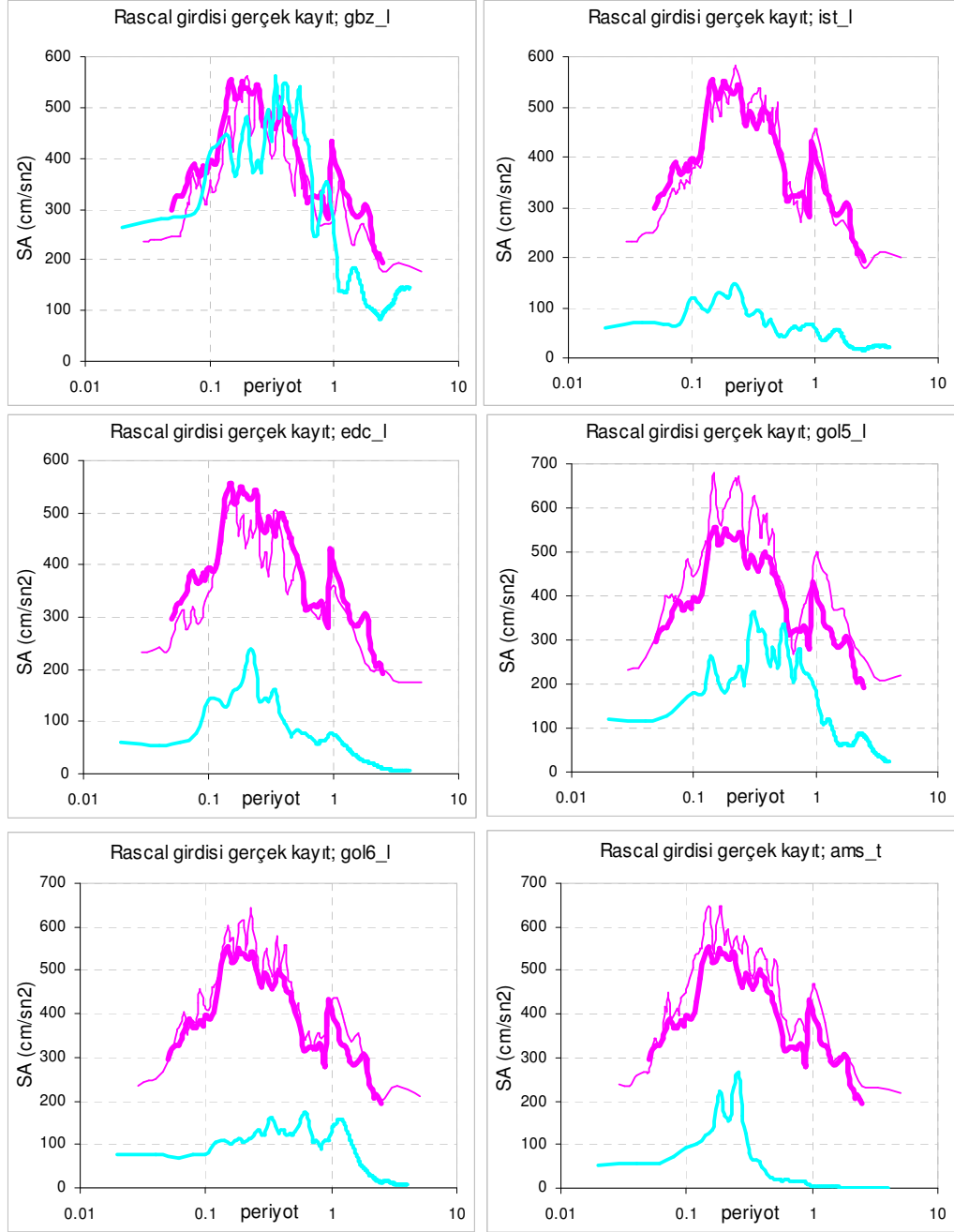


— Hedef spektrum;Ambraseys vd. (Normal) — Üretilen kaydın spektrumu — Gerçek kayıtların spektrumu

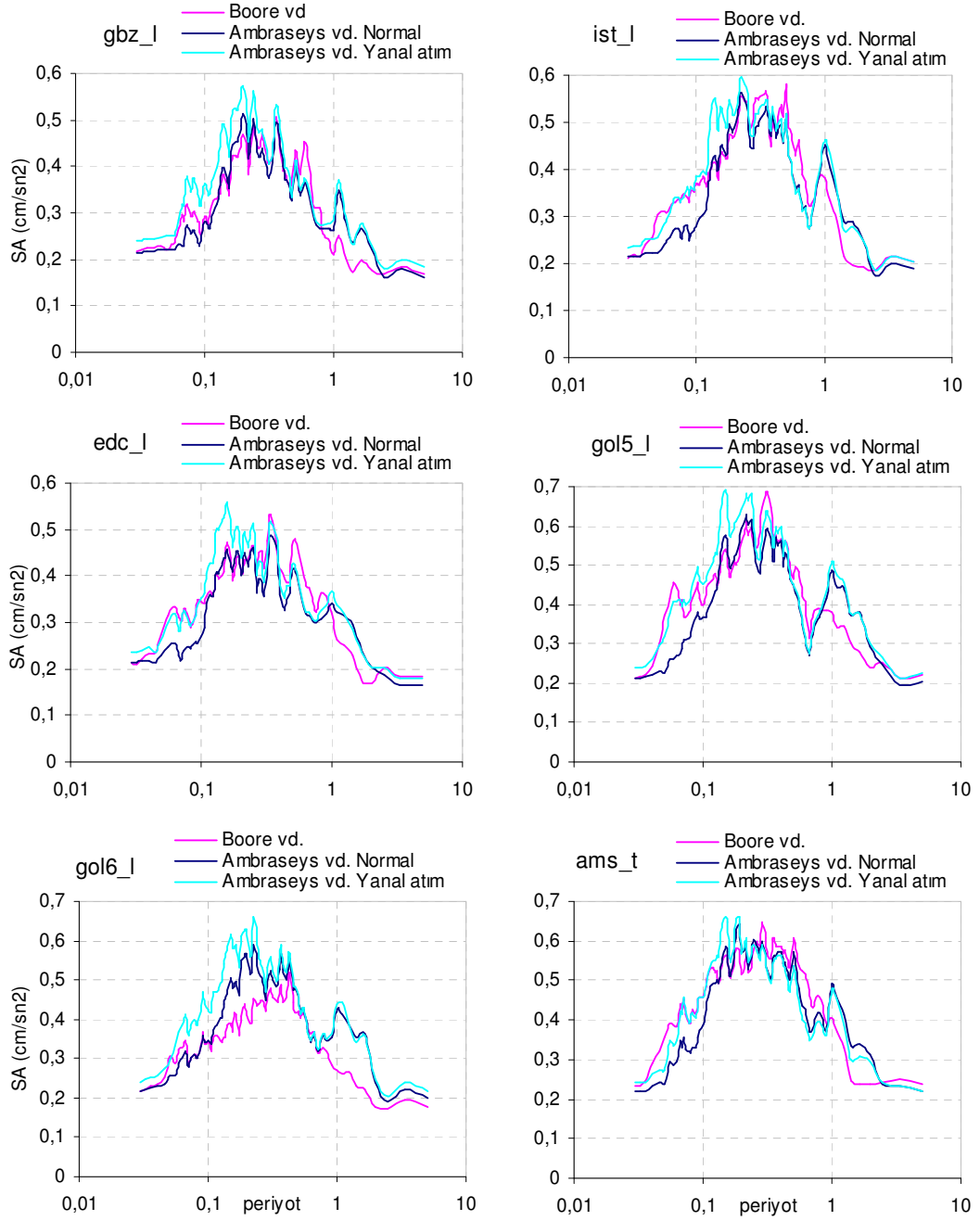


Şekil 5.23 Normal fay tipi için Ambraseys vd. [133] azalım ilişkisine dayalı hedef spektrum ile yapılan simülasyonlarda, kullanılan ve üretilen yer hareketi kayıtlarına ait spektrumlar

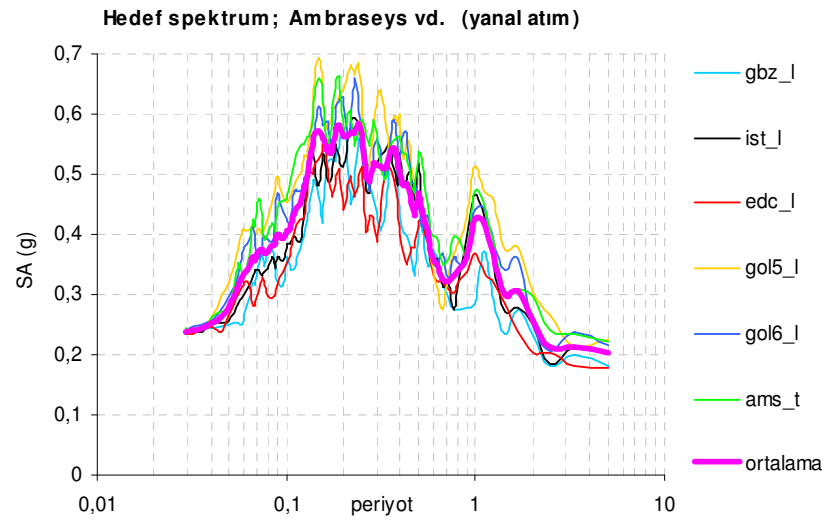
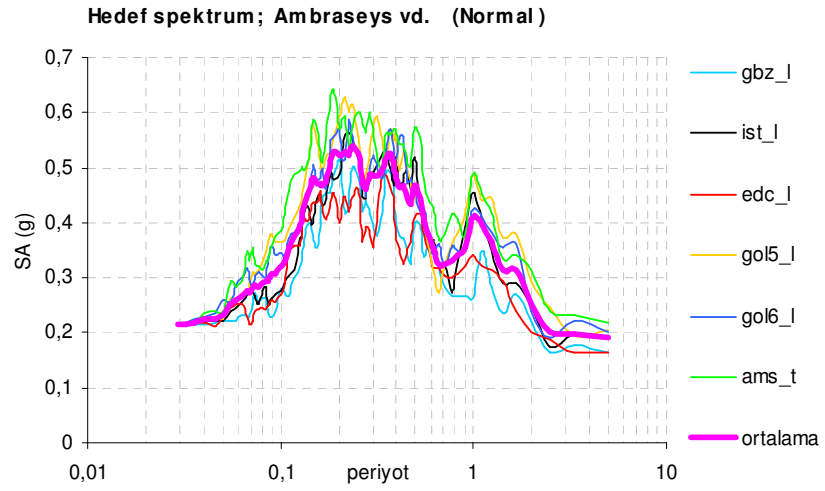
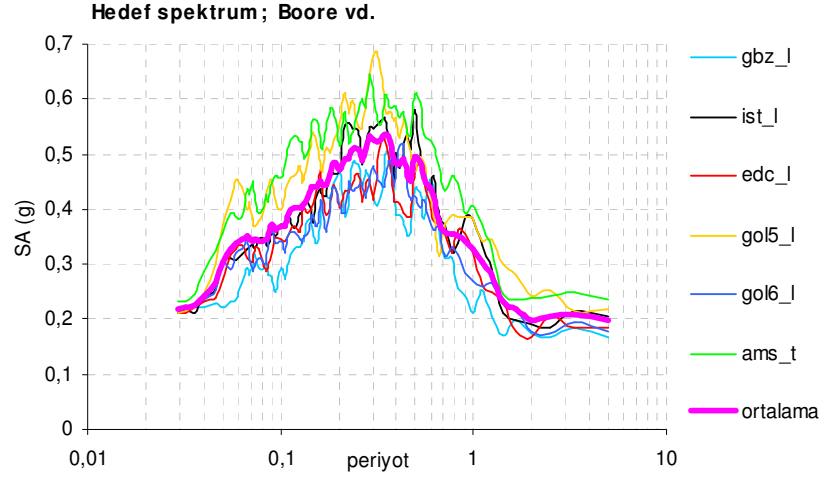
— Hedef spektrum; Ambraseys vd.(Yanal atım) — Üretilen kaydın spektrumu — Gerçek kayıtların spektrumu



Şekil 5.24 Yanal atımlı fay tipi için Ambraseys vd. [133] azalım ilişkisine dayalı hedef spektrum ile yapılan simülasyonlarda, kullanılan ve üretilen yer hareketi kayıtlarına ait spektrumlar

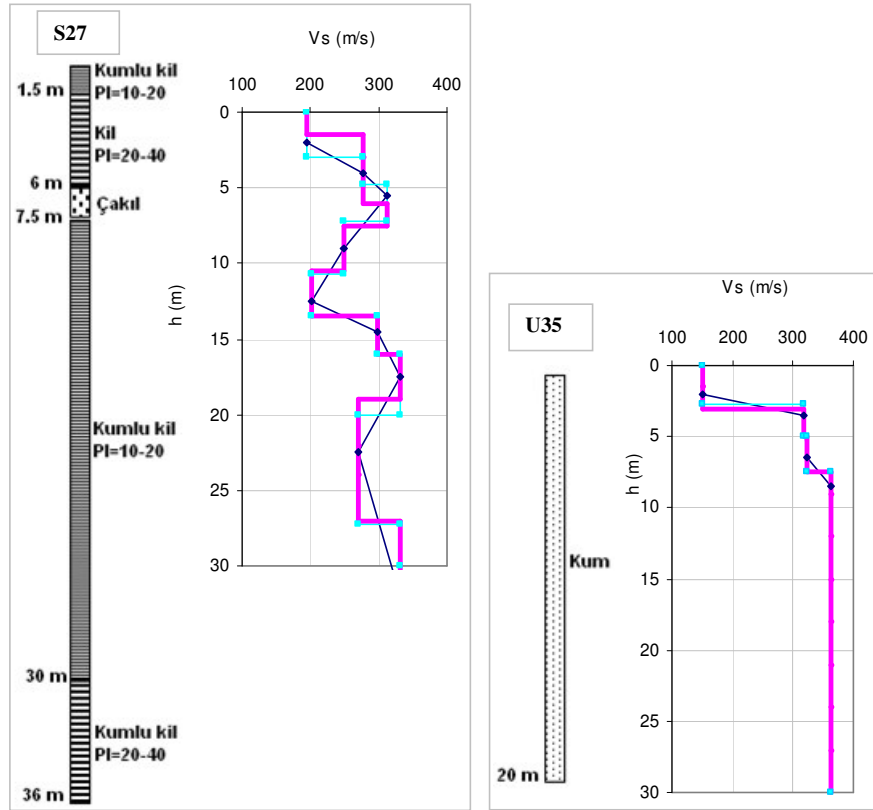


Şekil 5.25 Programın verisi, her bir yer hareketi kaydı için farklı hedef spektrumlarına dayalı olarak üretilen kayıtların karşılaştırılması

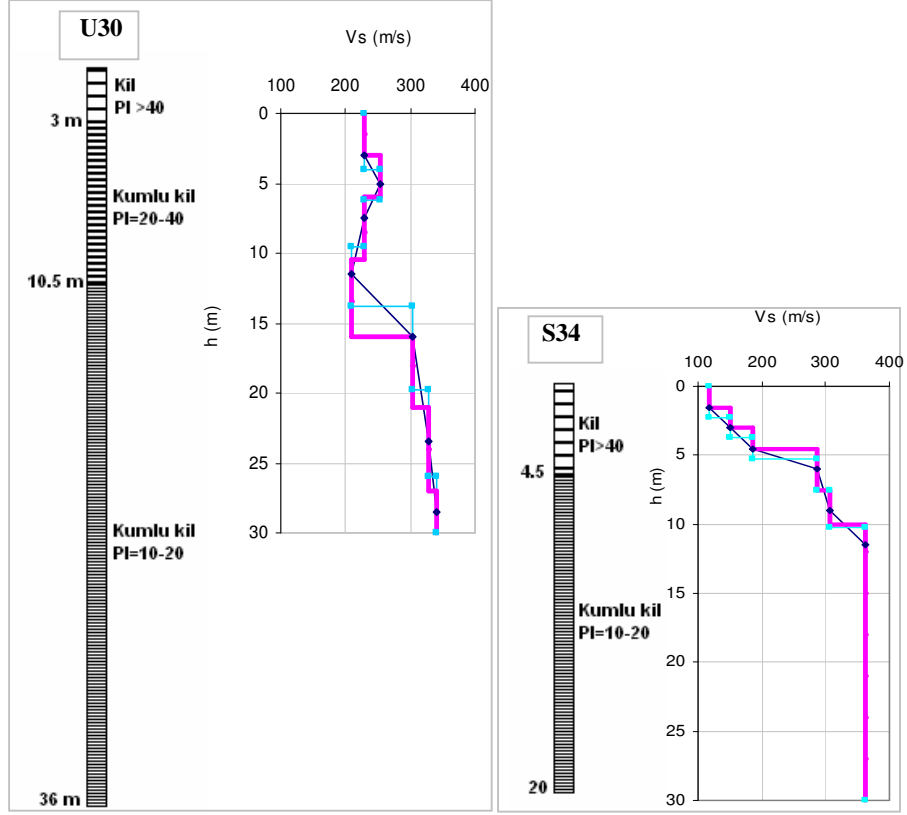


Şekil 5.26 Her bir hedef spektrum için, kullanılan 6 farklı yer hareketi kaydına dayalı olarak elde edilen yapay kayıtlara ait spektrumlar ve ortalaması

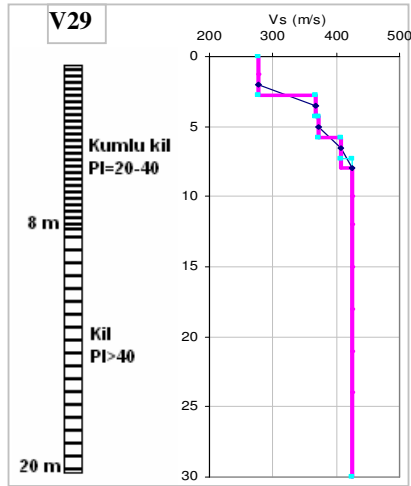
Üçüncü aşamada, 3 farklı hedef spektrum için 6 farklı yer hareketi kullanılarak üretilen 18 yapay kayıt, seçilen 5 temsili profilin davranış analizlerinde kullanılmıştır. Zemin davranış analizleri SHAKE 91 ile yapılan temsili profiller, BPH Bölgesi içinde yerel zemin sınıfı ve eşdeğer kayma dalgası hızına dayalı olarak seçilmiştir. BPH Bölgesi inceleme alanında modellenen temsili profillerin çoğu için eşdeğer kayma dalgası hızları 250-350 m/sn gibi dar bir aralıkta değişmektedir. Ancak kayma dalgası hız profillerindeki değişiklikler nedeniyle, eşdeğer kayma dalgası hızları aynı olan temsili profiller için yerel zemin sınıfları farklı olabilmektedir (Şekil 5.27-29).



Şekil 5.27 Z3 yerel zemin sınıfında tanımlanan temsili zemin ve kayma dalgası hız profilleri



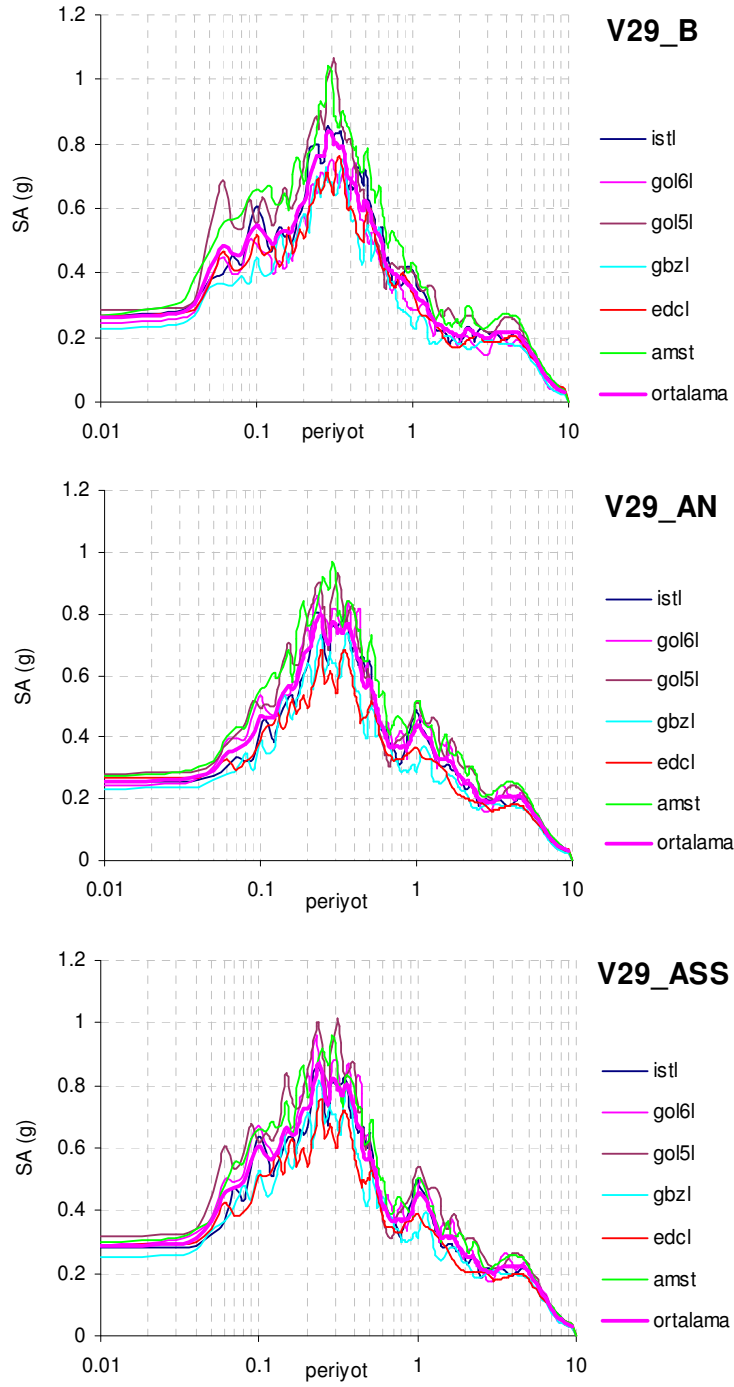
Şekil 5.28 Z2 yerel zemin sınıfında tanımlanan temsili zemin ve kayma dalgası hız profilleri



Şekil 5.29 Z1 yerel zemin sınıfında tanımlanan temsili zemin ve kayma dalgası hız profili

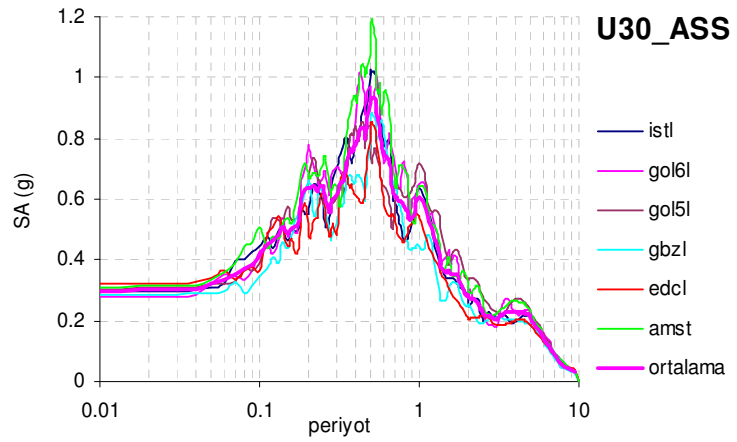
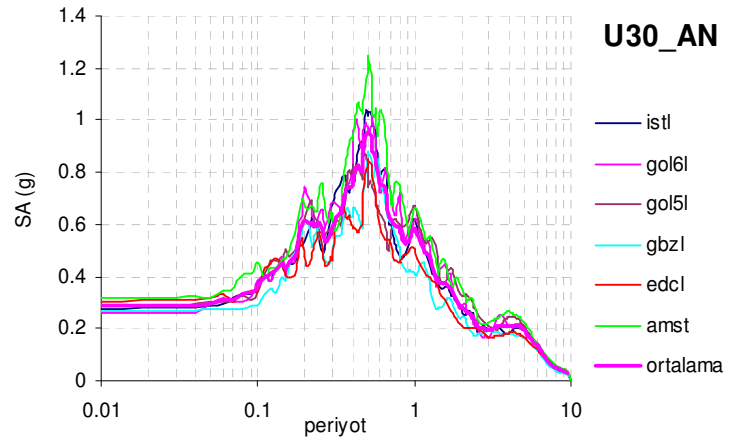
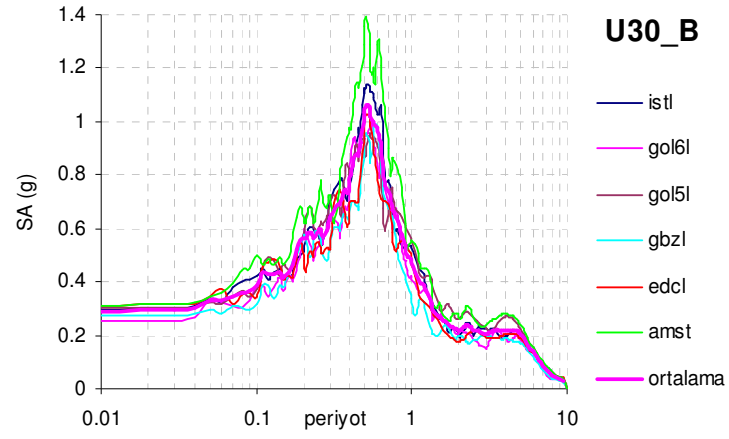
Davranış analizlerinde, hedef spektrumdan bağımsız olarak tüm temsili profiller için maksimum spektral ivmelerin, amst yer hareketi ile üretilen kayıta dayalı olduğu görülmektedir (Şekil 5.30-Şekil 5.34). Yüzeze yakın tabakalardaki kayma dalgası hızları daha düşük olan U35 ve S34 profillerine ait spektrumların, frekans içeriği bakımından farklılık gösterdikleri söylenebilir.

Seçilen temsili profillerin davranış analizlerinde kullanılan kayıtların, farklı hedef spektrumlara dayalı olarak üretilmesi durumunda hesaplanan ortalama spektral ivmeleri karşılaştırdığımızda, Z1 yerel zemin sınıfındaki V29 profili için sonuçların çok benzer olduğu görülmektedir (Şekil 5.30). Z2 yerel zemin sınıfındaki profillerde, U30 için maksimum ortalama spektral ivme, Boore vd. [137] azalım ilişkisine dayalı hedef spektrumun kullanılması durumunda elde edilirken, S34 profilindeki maksimum ortalama spektral ivme Ambraseys vd. [133] azalım ilişkisinin yanal atımlı fay için hesaplanan hedef spektrum durumunda görülmektedir (Şekil 5. 31,32). Aynı şekilde Z3 yerel zemin sınıfındaki S27 ve U35 profillerinde, ortalama maksimum spektral ivmeler, yapay kayıtların üretiminde kullanılan hedef spektrumlara bağlı olarak değişim göstermektedir (Şekil 5.33,34). Yer hareketi özellikleri ile yerel zemin şartlarının karşılıklı etkileşimine dayalı bu değişimin, davranış analizlerinde kullanılacak yer hareketi kayıtlarının seçiminde göz önüne alınması gerekmektedir.

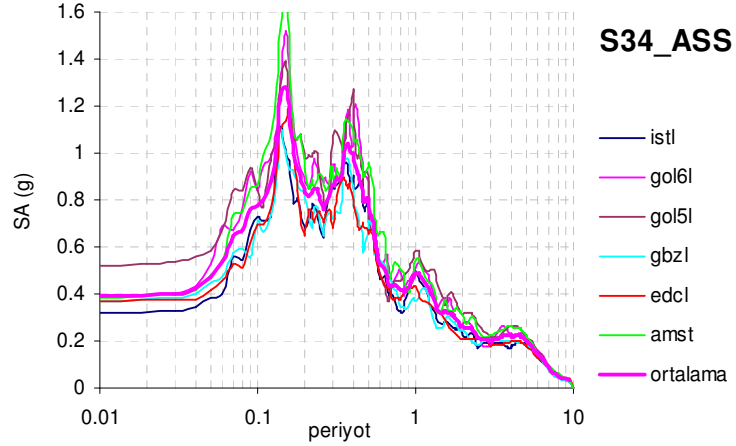
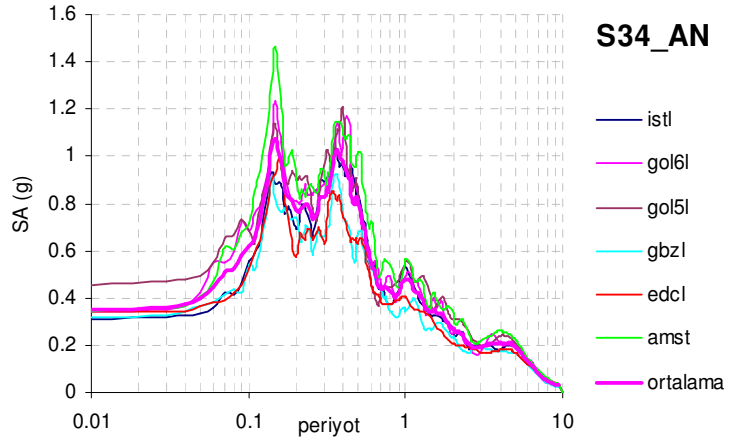
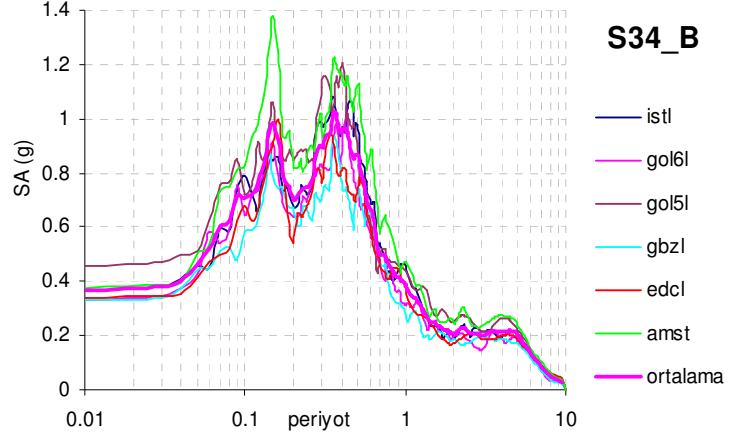


Şekil 5.30 V29 profili davranış analizi sonuçları (Z1 yerel zemin sınıfı,  $V_{s30m}=406$  m/s)

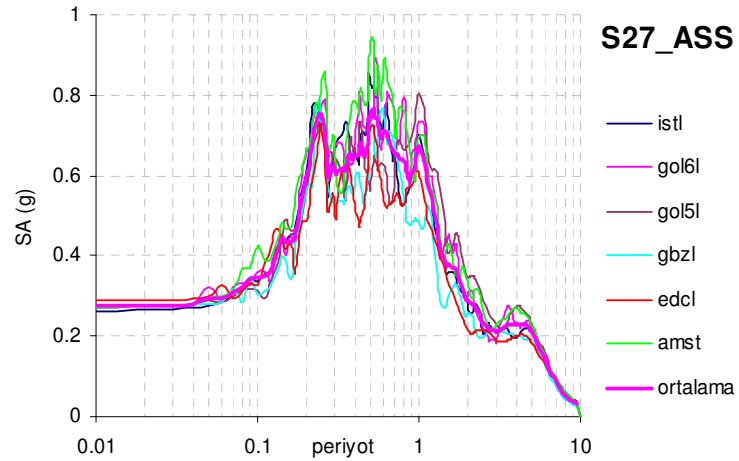
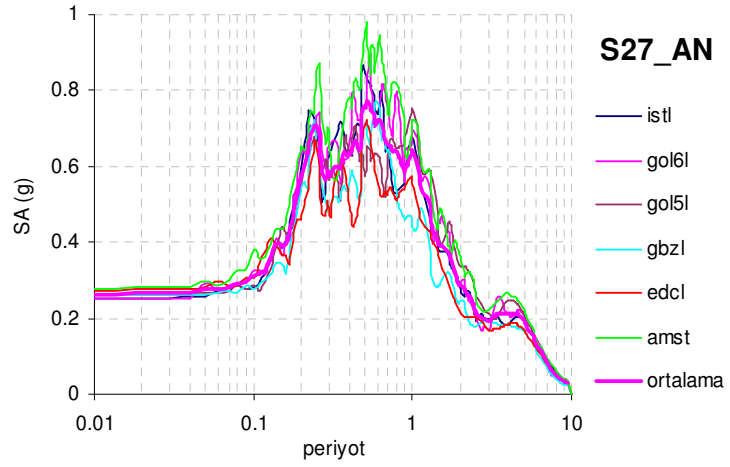
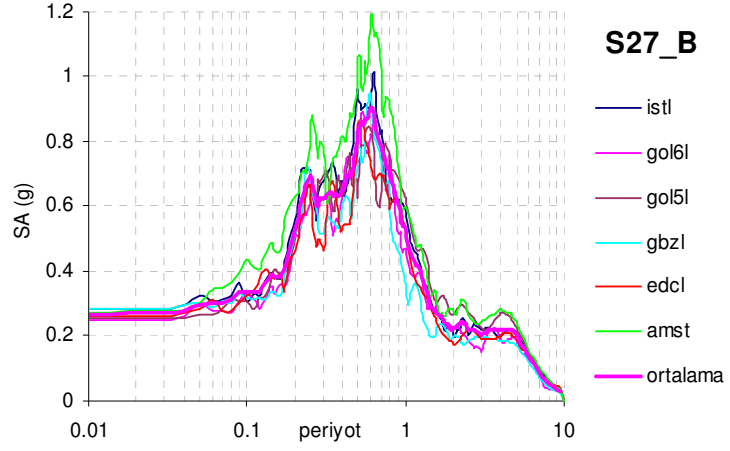




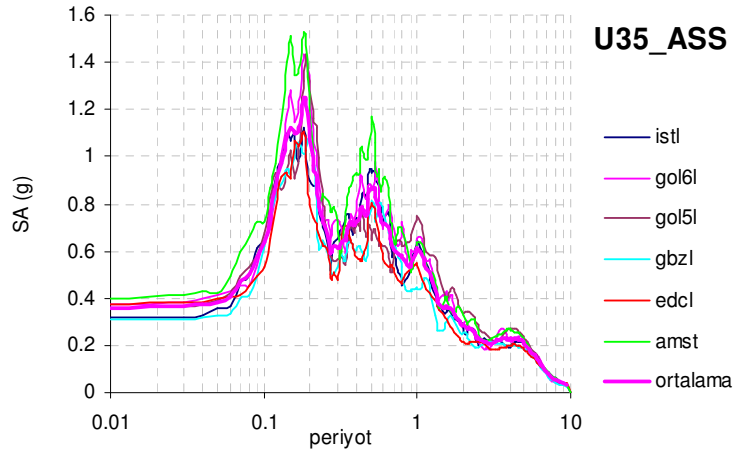
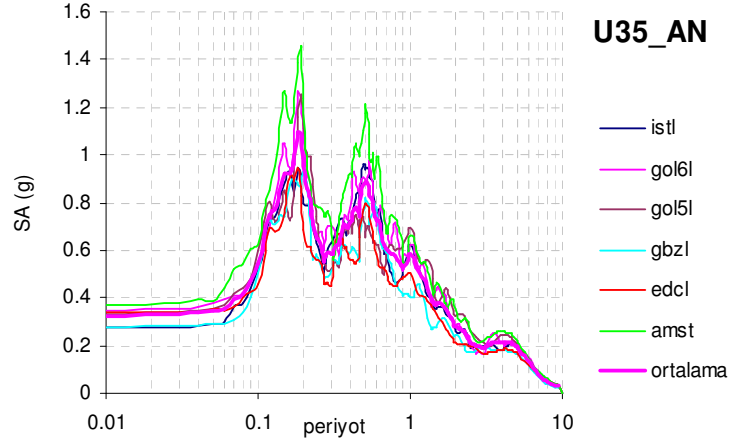
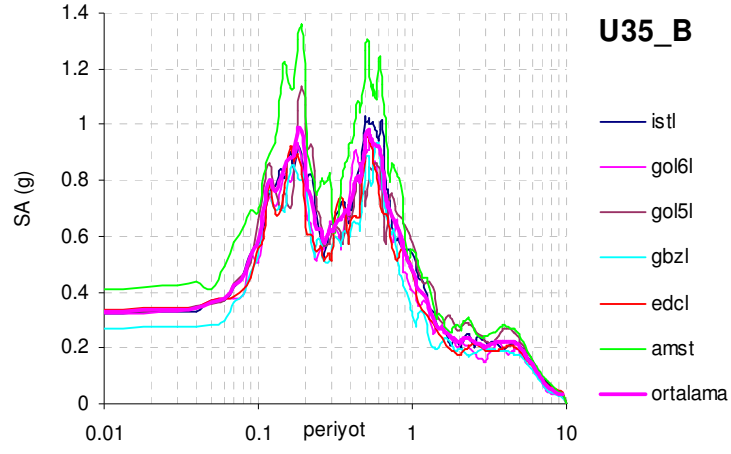
Şekil 5.31 U30 profili davranış analizi sonuçları (Z2 yerel zemin sınıfı,  $V_{s30m}=278$  m/s)



Şekil 5.32 S34 profili davranış analizi sonuçları (Z2 yerel zemin sınıfı,  $V_{s30m}=314$  m/s)



Şekil 5.33 S27 profili davranış analizi sonuçları (Z3 yerel zemin sınıfı,  $V_{s30m}=274$  m/s)



Şekil 5.34 U35 profili davranış analizi sonuçları (Z3 yerel zemin sınıfı,  $V_{s30m}=337$  m/s)

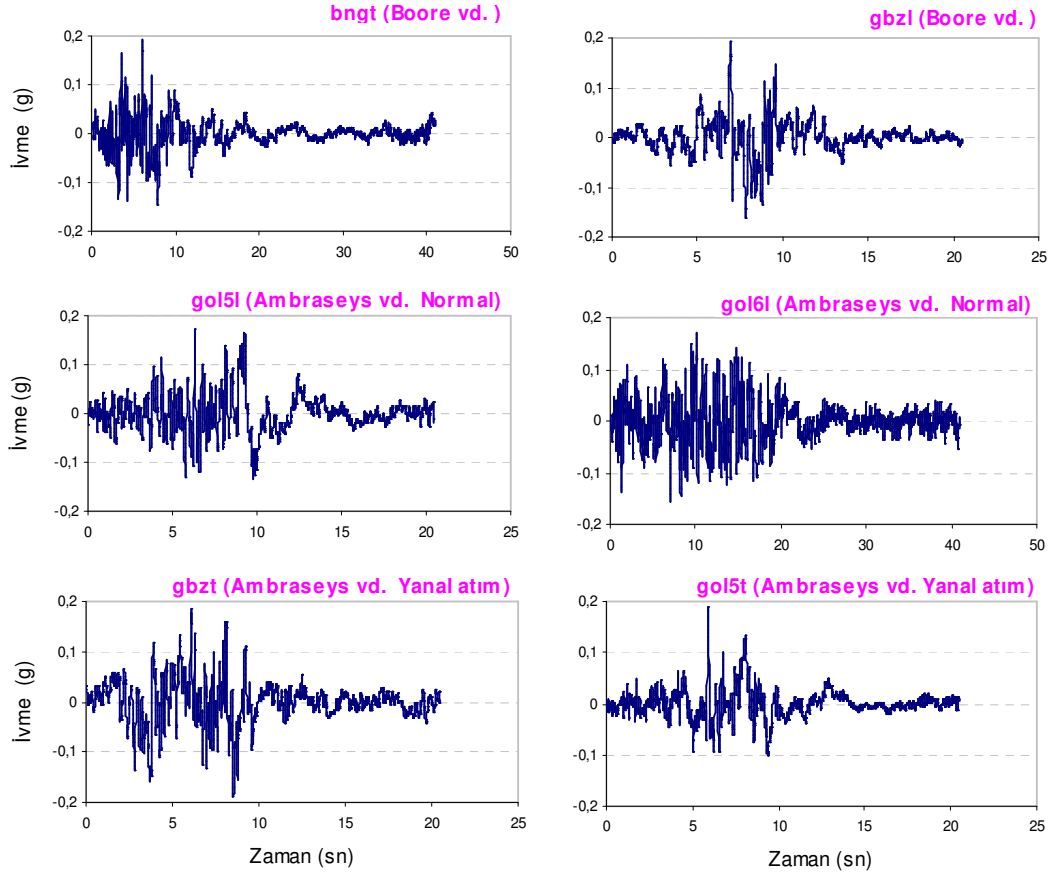
### **5.5.2 RASCAL ile Üretilen Kayıtların TARSC THS Programı ve Maksimum İvme Ölçekleme Yöntemi ile Üretilen Kayıtlarla Karşılaştırılması**

RASCAL programı, basit fonksiyonel formdaki kaynak özellikleri ve dalga yayılım ortamı için stokastik bir yaklaşımla, hedeflenen davranış spektrumlarıyla uyumlu yer hareketi kayıtları üretmektedir. Bu bölümde, RASCAL ile üretilen kayıtların, hedef yer hareketi parametreleri için farklı yöntemlerle üretilen kayıtlarla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Hedeflenen davranış spektrumu ile uyumlu kayıtların üretilmesinde yaygın olarak kullanılan programlardan biri de TARSC THS programıdır. Yapay kayıtların elde edilmesindeki en basit yöntem ise belirlenen maksimum yer hareketi genliğine dayalı olarak zamana bağlı kayıtların oranlanmasıdır.

Balıkesir yerleşim alanı için belirlenen tasarım depremi yer hareketi parametreleri ile uyumlu kayıtların üretilmesinde, RASCAL, TARSC THS ve maksimum ivme ölçekleme yöntemlerine dayalı farklılıklar araştırılmaktadır. Ancak  $M=7.5$  ve  $D=40$  km tasarım parametrelerinin TARSC THS programı sınır değerleri ile uyuşmaması nedeniyle, karşılaştırma amaçlı bu bölümdeki hedef spektrum ve maksimum ivme değerleri,  $M=7.3$  ve  $D=40$  km olan tasarım depremi için yeniden belirlenmiştir. RASCAL ve TARSC THS programlarında, önceki bölümlerde seçilen Boore vd. [137] ve Ambraseys vd. [133] (normal ve yanal atımlı fay durumları için) azalım ilişkilerine dayalı olarak 475 yıllık dönüş periyoduna sahip 3 ayrı hedef spektrum kullanılmaktadır. Ölçekleme yönteminde, ana kayada 0.225 g olarak belirlenen en büyük ivme değeri için orantı faktörü 0.25 ile 4 arasında kalacak şekilde Türkiye’ den 6 yer hareketi kaydı seçilmiştir. Bu gerçek yer hareketi kayıtları aynı zamanda RASCAL programının girdi kayıtlarını oluşturmaktadır.

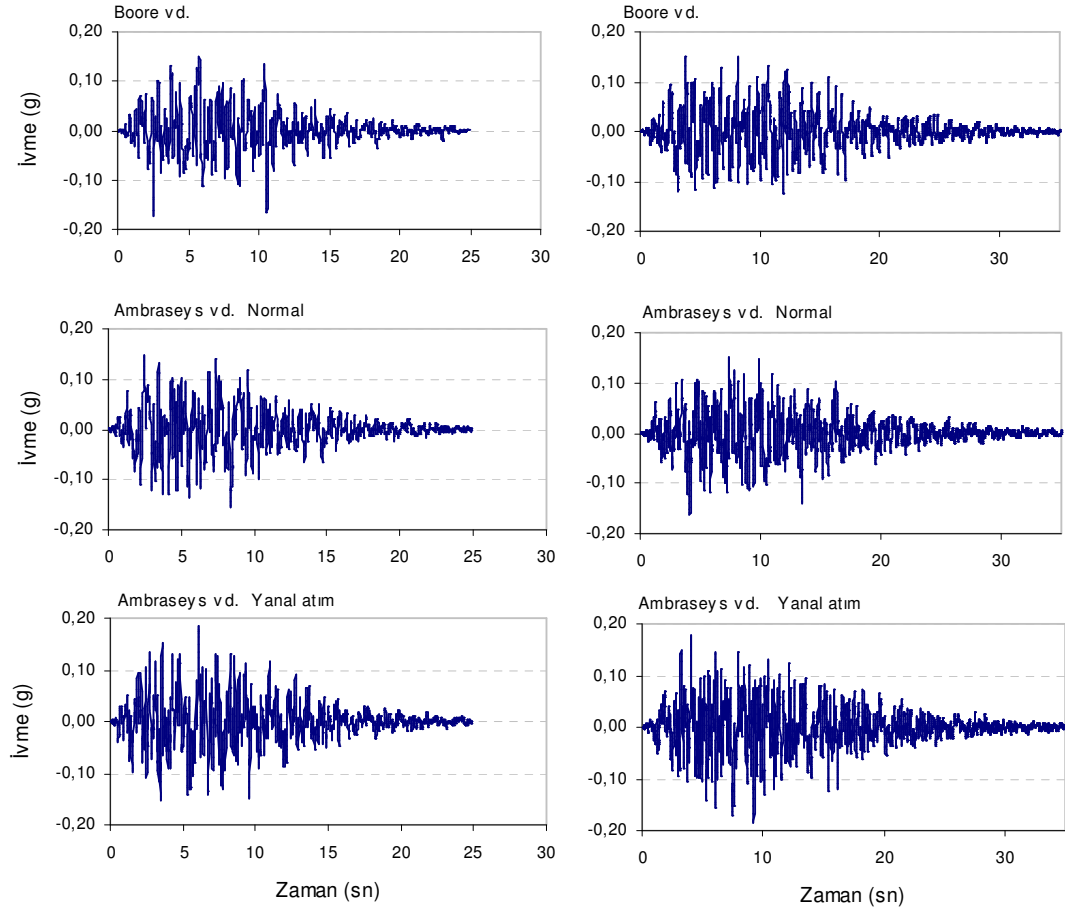
Her üç yöntem ile elde edilen yer hareketi kayıtları Şekil 5.35-37 arasında gösterilmektedir. Şekil 5.35’ de RASCAL ile üretilen kayıtlar 6 farklı gerçek yer hareketi için 3 farklı hedef spektruma dayanmaktadır. Boore vd. [137] azalım ilişkisi ile bngt ve gbzl olarak adlandırılan kayıtlar, Ambraseys vd. [133] azalım ilişkisinin normal fay tipi ile gol5l ve gol6l kayıtları ve yanal fay tipi ile gbzt ve gol5t kayıtları

birlikte kullanılmıştır. Gerilme farkı  $\Delta\sigma=100$  bar, frekans bağımlı kalite faktörü  $Q=300 f^{0.5}$  ve yüksek frekans azalım parametresi  $\kappa=0.035$  alınmıştır.



Şekil 5.35 RASCAL ile üretilen yer hareketi kayıtları

TARSCTHS ile üretilen kayıtlarda, her azalım ilişkisi için 2 simülasyon yapılmıştır (Şekil 5.36). Bu simülasyonların birinde yer hareketinin süresi programa dışarıdan girilmiş (35 saniyelik kayıtlar) diğ erinde ise manyitüd ve uzaklığa dayalı olarak program tarafından hesaplanmıştır (25 saniyelik kayıtlar). Program aynı veri için her uygulamada farklı kayıt üretmektedir.

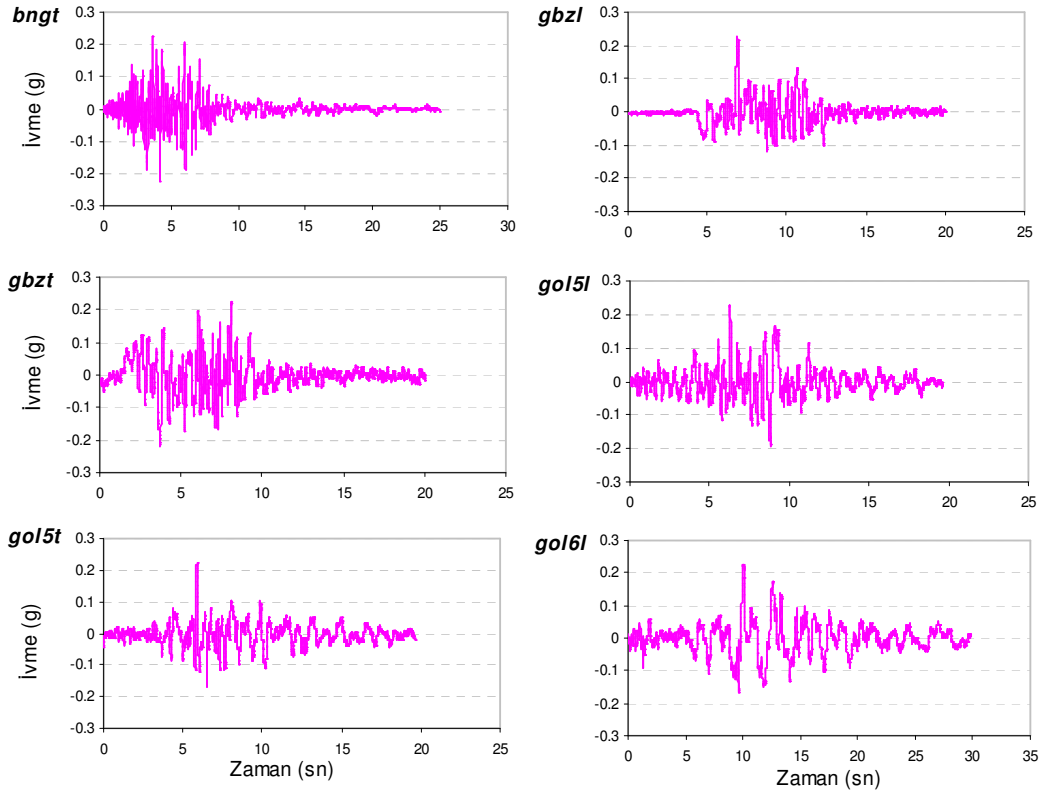


Şekil 5.36 TARSC THS ile üretilen yer hareketi kayıtları

Belirlenen maksimum yer hareketi ivmesine dayalı olarak zamana bağlı kayıtların oranlandığı yöntemde kullanılan gerçek kayıtlar aynı zamanda RASCAL programında kullanılan kayıtlardır (Şekil 5.37). Bu kayıtlar ölçekleme yöntemi için önerilen orantı faktörü kriterine dayalı olarak seçilmiştir.

Üretilen toplam 18 kayıta ait bazı yer hareketi parametrelerinin değişimi Tablo 5.4' de görülmektedir. Maksimum ivme değeri için kayıtlardaki değişim göz önüne alındığında; TARSC THS ile üretilen kayıtlarda, RASCAL ile üretilenlere göre daha geniş bir dağılımın olduğu görülmektedir. Diğer yer hareketi parametreleri için yapay kayıtların üretildiği 3 yöntem karşılaştırıldığında; gerçek yer hareketi kayıtlarının kullanıldığı RASCAL programı ve ölçekleme yöntemi daha benzer

sonuçlar göstermektedir. Maksimum hız değerlerinde en büyük saçılım, ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtlarda gözlenirken, TARSĊHS ile üretilen kayıtlarda çok yakın hız değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Arias Şiddeti, ivme spektrum Şiddeti ve hız spektrum Şiddeti cinsinden, RASCAL programı ve ölçekleme yöntemi ile elde edilen ve benzer Şekilde geniş bir dağılım gösteren değerlere karşılık, TARSĊHS programı ile çok yakın değerlere sahip kayıtlar üretilmiştir. Kayıtların süreleri TARSĊHS programında sabit, diğer iki yöntemde ise veri durumundaki yer hareketi kayıtlarına dayalı olarak geniş bir aralıkta değişebilmektedir.



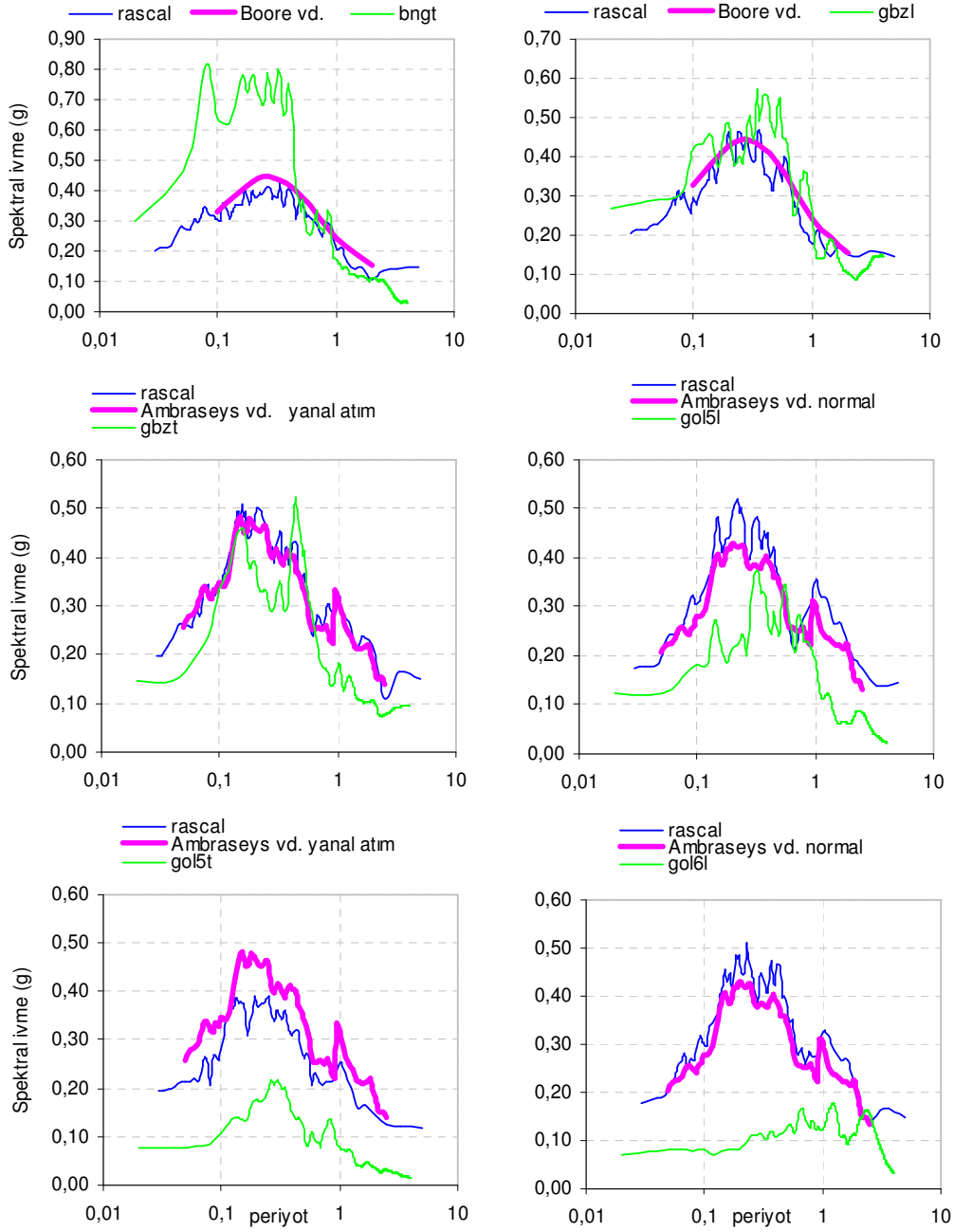
Şekil 5.37 Maksimum ivme ölçekleme yöntemi ile üretilen yer hareketi kayıtları



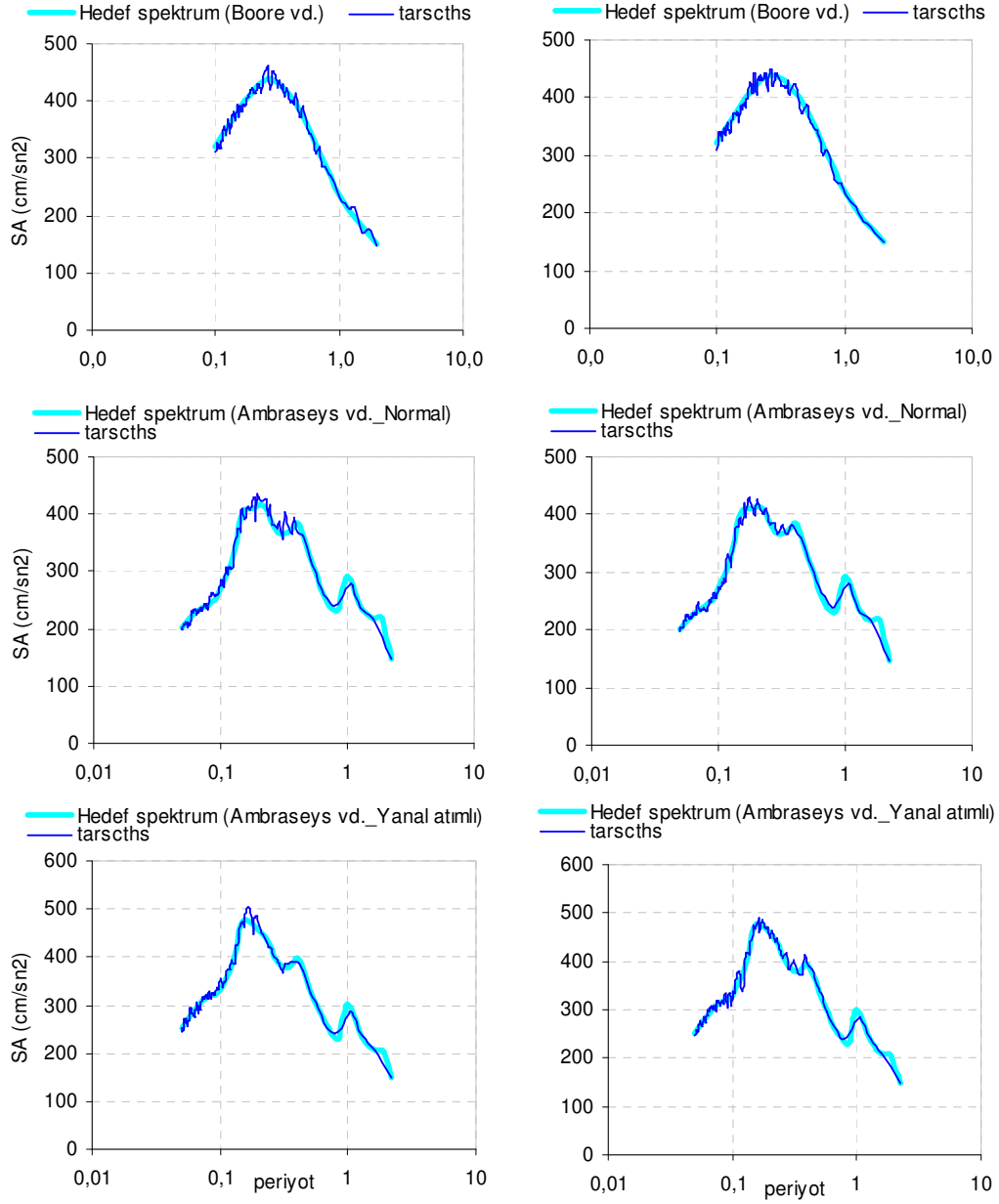
Tablo 5. 4 Üretilen kayıtlara ait bazı yer hareketi parametreleri

|                                  | Maks. İvme (g) | Maks. Hız (cm/sn) | Arias Şiddeti (m/sn) | RMS (ivme) (g) | İvme spektrum şiddeti (g) | Hız spektrum şiddeti (cm/sn) | Süre (Bracketed) (sn) | Süre (Significant) (sn) |
|----------------------------------|----------------|-------------------|----------------------|----------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| <b>Rascal</b>                    |                |                   |                      |                |                           |                              |                       |                         |
| bngt (b)                         | 0.19           | 39.40             | 0.504                | 0.0283         | 0.149                     | 78.46                        | 40.95                 | 23.78                   |
| gbzl (b)                         | 0.19           | 47.85             | 0.379                | 0.0346         | 0.156                     | 79.17                        | 20.43                 | 7.88                    |
| gbzt (ss)                        | 0.19           | 47.79             | 0.582                | 0.0429         | 0.171                     | 106.37                       | 20.48                 | 10.23                   |
| gol5l (n)                        | 0.17           | 55.71             | 0.488                | 0.0393         | 0.173                     | 107.01                       | 20.48                 | 9.65                    |
| gol5t (ss)                       | 0.19           | 28.09             | 0.265                | 0.0289         | 0.137                     | 78.79                        | 20.43                 | 9.62                    |
| gol6l (n)                        | 0.17           | 39.82             | 1.027                | 0.0403         | 0.173                     | 118.20                       | 40.95                 | 25.09                   |
| <b>Tarscths</b>                  |                |                   |                      |                |                           |                              |                       |                         |
| b0                               | 0.17           | 22.33             | 0.542                | 0.0376         | 0.167                     | 93.87                        | 23.13                 | 11.88                   |
| b1                               | 0.15           | 14.34             | 0.695                | 0.0475         | 0.168                     | 90.75                        | 19.27                 | 13.96                   |
| an0                              | 0.16           | 18.98             | 0.540                | 0.0375         | 0.155                     | 97.35                        | 23.15                 | 12.19                   |
| an1                              | 0.16           | 21.02             | 0.630                | 0.0451         | 0.154                     | 100.94                       | 19.42                 | 13.93                   |
| ass0                             | 0.19           | 20.27             | 0.638                | 0.0408         | 0.164                     | 106.07                       | 23.61                 | 11.69                   |
| ass1                             | 0.19           | 21.91             | 0.766                | 0.0499         | 0.165                     | 97.63                        | 19.58                 | 14.04                   |
| <b>Maksimum İvme Ölçeklemesi</b> |                |                   |                      |                |                           |                              |                       |                         |
| bngt                             | 0.225          | 17.65             | 0.540                | 0.0375         | 0.211                     | 64.37                        | 23.92                 | 6.62                    |
| gbzl                             | 0.225          | 62.88             | 0.396                | 0.0358         | 0.157                     | 63.62                        | 15.35                 | 7.54                    |
| gbzt                             | 0.225          | 61.77             | 0.801                | 0.0509         | 0.236                     | 98.38                        | 20.01                 | 8.09                    |
| gol5l                            | 0.225          | 51.18             | 0.588                | 0.0441         | 0.203                     | 98.62                        | 19.63                 | 10.66                   |
| gol5t                            | 0.225          | 80.70             | 0.403                | 0.0365         | 0.191                     | 81.53                        | 19.63                 | 11.14                   |
| gol6l                            | 0.225          | 69.79             | 1.086                | 0.0486         | 0.132                     | 192.12                       | 29.67                 | 15.73                   |

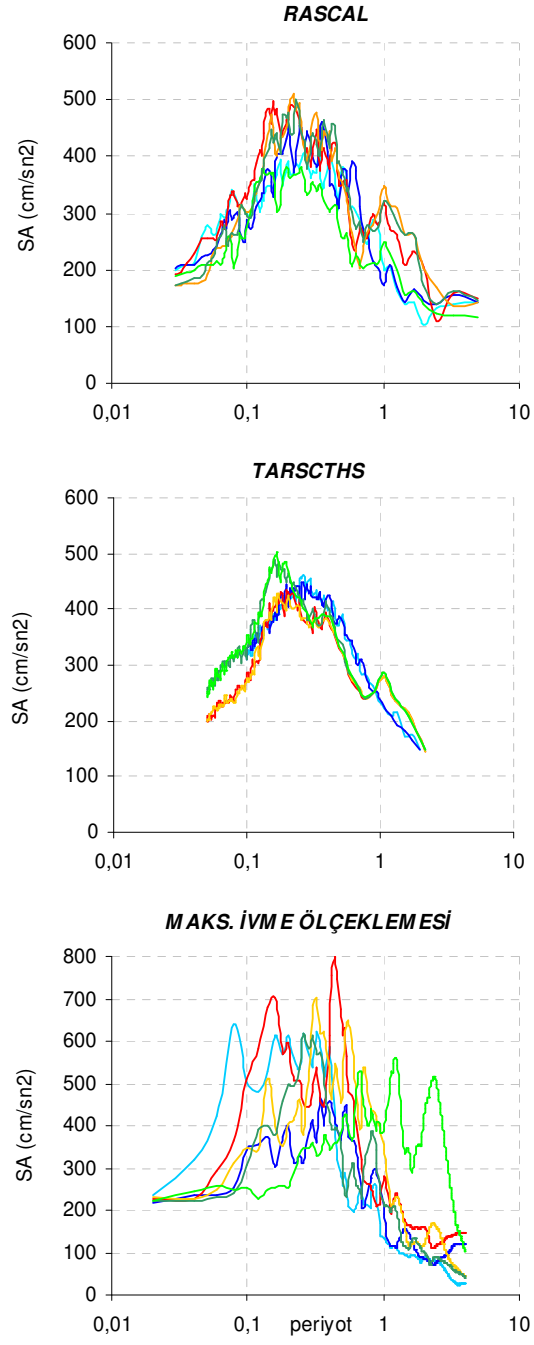
RASCAL ve TARSCTHS programları ile üretilen kayıtlarda aynı 3 hedef spektrum kullanılmıştır. Kayıtlara ait davranış spektrumlarının hedef spektrumlar ile uyumu Şekil 5.38 ve Şekil 5.39 da gösterilmektedir. TARSCTHS ile üretilen kayıtların spektrumlarının hedef spektrum ile tamamen aynı oldukları söylenebilir. RASCAL programında üretilen kaydın hedef spektrum ile uyumu, bir önceki bölümde de gözlendiği gibi veri konumundaki gerçek yer hareketi kayıtlarına dayalı olarak değişmektedir. Şekil 5.40' da, üretilen kayıtların tümü için davranış spektrumları bir arada görülmektedir. Spektrumlardaki en büyük saçılım, gerçek yer hareketi kayıtlarının maksimum ivme değeri için oranlandığı yöntem ile üretilen kayıtlarda gözlenmektedir. RASCAL ile üretilen kayıtlarda spektrumlardaki saçılım azalmaktadır.



Şekil 5.38 RASCAL ile üretilen kayıtlara ait davranış spektrumları (hedef spektrum ve girdi konumundaki gerçek yer hareketi kaydı spektrumu ile)

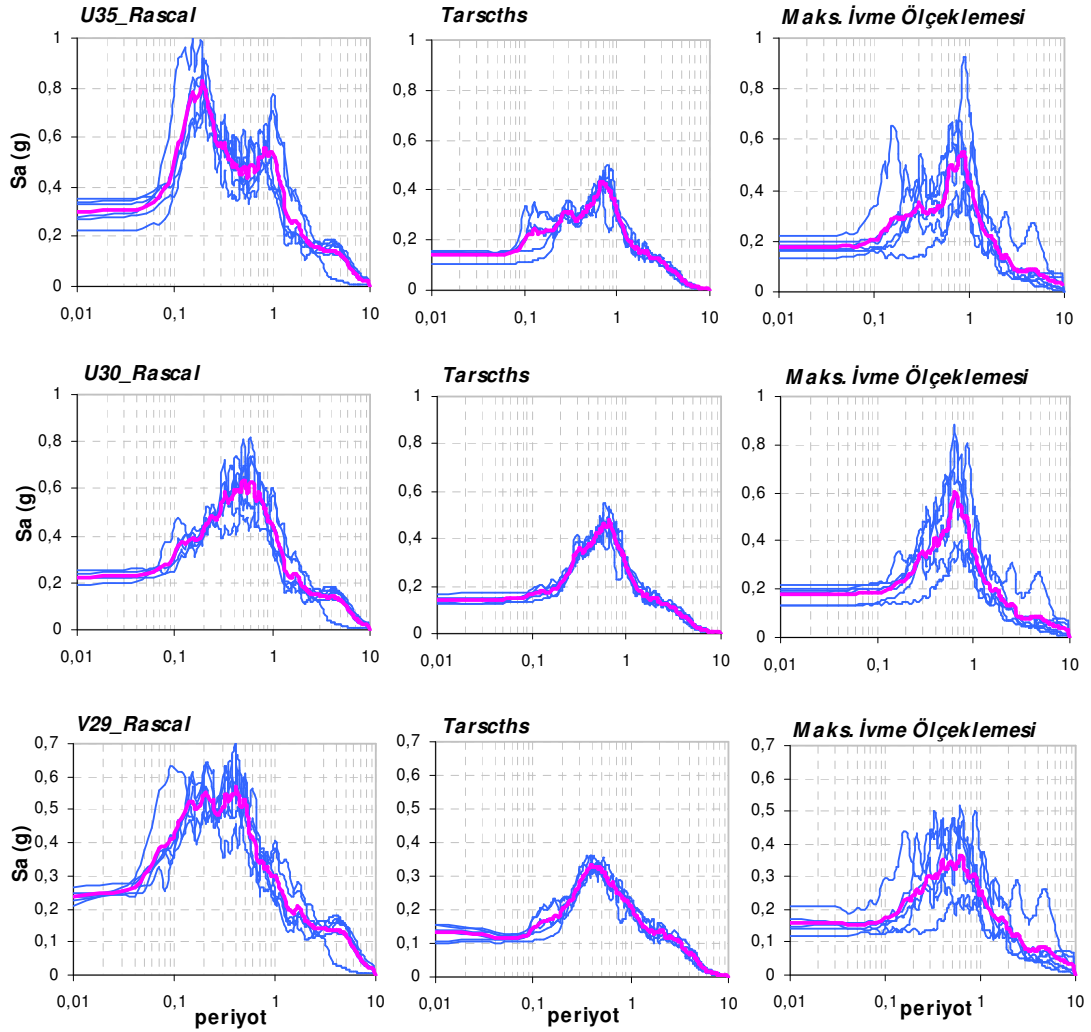


Şekil 5.39 TARSCTHS ile üretilen kayıtlara ait davranış spektrumları (hedef spektrum ile)



Şekil 5.40 RASCAL, TARSCTHS ve maksimum ivme ölçeklemesi ile üretilen kayıtların davranış spektrumları

Farklı yöntemlere dayalı olarak üretilen 18 yer hareketi kaydı, zemin sınıfları farklı olan 3 temsili zemin profilinin SHAKE 91 programı ile yapılan davranış analizlerinde kullanılmıştır. Kullanılan temsili zemin profillerinde, bir önceki bölümde gösterilen U30, U35 ve V29 profillerinin kayma dalgası hızları, 30 m den sonra 70 m kabul edilen ana kaya seviyesinde 700 m/sn olacak şekilde lineer olarak arttırılmıştır. Sonuçlar Şekil 5.41’ de gösterilmektedir.



Şekil 5.41 Farklı zemin profillerinde, üretilen 18 yer hareketi kaydı ile yapılan davranış analizi sonuçları

Yüzeyde elde edilen yer hareketlerinde, davranış spektrumu cinsinden RASCAL programı ve ölçekleme yöntemi kayıtlarının daha yakın sonuçlar gösterdiği, TARSCTHS ile üretilen kayıtlar için ise sonuçların oldukça farklı olduğu görülmektedir. TARSCTHS ile üretilen kayıtların kullanımının güvensiz tarafta sonuçlar verdiği söylenebilir. Maksimum ivme için oranlanan kayıtların kullanılması durumunda ise spektral davranışlardaki belirsizlik seviyesinin yüksek olduğu görülmektedir. RASCAL ile üretilen kayıtların Arias şiddeti, ivme spektrum şiddeti ve hız spektrum şiddeti değerleri, ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtlarınki ile benzer saçılım göstermesine karşılık, zemin davranış analizleri sonucunda, RASCAL ile üretilen kayıtların kullanımında, yüzeydeki spektral davranışın belirsizlik seviyesinin daha düşük olduğu gözlenmektedir.

## 5.5 Sonuçlar

Balıkesir için Ansal [127] tarafından olasılıksal olarak belirlenen ve 50 yılda % 10 aşılma olasılığına karşılık gelen tasarım depremi büyüklüğü  $M_s=7.5$  ve kaynak uzaklığı  $R=40$  km dir. Balıkesir Belediyesi sınırları içinde ana kaya seviyesindeki en büyük yatay ivme değeri ise azalım ilişkisindeki değişkenlik ve saçılımın aşılma olasılıkları cinsinden değerlendirilmesi sonucu, %10 aşılma olasılığı için  $A_p=0.26$  g olarak hesaplanmıştır. En büyük ivme değerinin belirlenmesinde, Ambraseys [129] tarafından önerilen azalım ilişkisinin sadece Türkiye’de alınan kayıtlar kullanılarak Ansal [128] tarafından geliştirilen şekli kullanılmaktadır.

Aktif tektonik bölgelerdeki sığ yer kabuğu hareketleri için son zamanlardaki azalım ilişkileri, veri tabanları doğrultusunda genel olarak, 100 km den daha az uzaklıklar ve moment manyitüd değeri  $M_w \geq 5$  olan depremler için önerilmektedir. Balıkesir istasyonlarında aletsel dönemde alınmış 58 yer hareketi kaydının çok az bir kısmı bu şartları sağlamaktadır. Bu kayıtlar, uygun büyüklük ve uzaklık kriterlerini içeren, en büyük ivme ve spektral azalım ilişkileri ile karşılaştırılmaktadır. Balıkesir için ana kaya seviyesindeki eş tehlike spektrumları, farklı veri tabanlarına ve dolayısıyla farklı fay tipi parametrelerine sahip, Boore vd. [137] ve Ambraseys vd. [133] azalım ilişkilerine dayalı olarak belirlenmiştir.

Kuzey Amerika'nın batısından seçilen kuvvetli yer hareketi verilerine dayanan, Boore vd. [137] azalım ilişkisindeki fay tipi faktörü, diğer birçok ilişkideki gibi, veri tabanlarında normal fay tipindeki depremlerin çok az sayıda bulunması nedeniyle, genel olarak ters ve yanal atımlı depremlere ait hareketler arasındaki farkı yansıtmaktadır. Avrupa ve Ortadoğu'dan elde edilen verilere dayanan Ambraseys vd. [133] azalım ilişkisinde ise normal ve yanal atımlı fay tipleri ayrılmaktadır. Bu ayrıma dayalı olarak yer hareketi simülasyonlarında 3 ayrı hedef spektrum kullanılmaktadır.

Rascal programı ile yapılan parametrik çalışma, yer hareketi modelindeki kaynak ve yol parametrelerinden bölgesel bağımlı gerilme farkı ( $\Delta\sigma$ ) ve kalite faktörü sabiti (Q) ile programın girdisi gerçek yer hareketi kayıtlarına dayanmaktadır. Teorik yer hareketi modelinde bölgesel özellik gösteren bir diğer parametre de yüksek frekans azalım faktörü  $\kappa$  dır. Gerilme farkının  $\Delta\sigma=50-100$  bar ve kalite faktörü sabitinin  $Q=100-300$  arasında değişen değerleri ile belirlenen 6 farklı durum için oluşturulan simülasyonlarda; spektral azalım faktörünün  $\kappa=0$  değeri için belirgin farklılıklar olmasına karşılık,  $\kappa=0.035$  olarak belirlenen spektral azalım faktörü durumunda, gerilme farkı ve kalite faktörü sabitindeki değişimin, spektral ivmeler üzerindeki etkisinin çok düşük olduğu gözlenmektedir. Kaynak ve yol parametrelerindeki değişimin etkisini daha belirgin olarak izleyebilmek amacıyla, oluşturulan  $\kappa=0$  durumunda; sabit gerilme farkı için, Q sabitindeki artış inelastik azalımda düşüşe dolayısıyla spektral ivmelerde yükselmeye neden olmaktadır. Bu artış gerilme farkının yüksek ve düşük olmasına dayalı olarak farklı oranlardadır. Gerilme farkının spektral ivmeler üzerindeki etkisi ise maksimum oranda, inelastik azalımın minimum olduğu  $Q=300$  değeri ile üretilen kayıtlarda gözlenmektedir.

Programın verisi gerçek yer hareketi kayıtları, Balıkesir için belirlenen tasarım parametreleri ile büyüklük ve frekans içeriği açısından uyumlu olabilecek Türkiye'deki depremler arasından seçilmiştir. Belirlenen 6 yer hareketi kaydı ile 3 ayrı hedef spektrum için üretilen yer hareketi kayıtlarına ait spektrumların, gerçek yer hareketi kayıtlarına bağlı olarak hedef spektrum ile uyumları değişmektedir. Bu aşamada üretilen 18 yapay yer hareketi kaydı ile BPH Bölgesinden seçilen 5 temsili

profilin davranış analizleri yapılmıştır. Davranış analizi sonuçları, her bir hedef spektrum için hesaplanan ortalama spektral ivmelere ait maksimum değerlerin, yerel zemin şartlarına dayalı olarak değiştiğini göstermektedir. Yer hareketi özellikleri ile yerel zemin şartları arasındaki karşılıklı etkileşimi yansıtan bu durumun, mikrobölgeleme için yapılacak davranış analizlerinde, kullanılacak yer hareketlerinin seçiminde göz önüne alınması gerektiği düşünülmektedir.

RASCAL ile üretilen yer hareketi kayıtlarında, 3 farklı hedef spektrum ve 6 gerçek yer hareketi kaydı kullanılmaktadır. Bu hedef spektrumlar için TARSCETHS programıyla ve kullanılan gerçek yer hareketi kayıtları için maksimum ivme ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtlar, RASCAL sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Üretilen kayıtların yer hareketi parametrelerindeki değişimler, RASCAL ve maksimum ivme ölçekleme yönteminin benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak davranış spektrumu cinsinden bu iki kayıt grubu karşılaştırıldığında, ölçekleme yönteminde saçılımın yüksek olduğu gözlenmektedir. Benzer şekilde, kayıtların farklı zemin profillerinin davranış analizlerinde kullanılması durumunda, RASCAL ile üretilen kayıtlar yüzeydeki spektral davranışın belirsizlik seviyesini düşürmektedir. TARSCETHS ile üretilen kayıtların kullanılması durumunda ise davranış analizleri sonuçlarına göre güvensiz tarafta kalındığı düşünülebilir.



## **6. ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ VE MİKROBÖLGELEME PARAMETRELERİ**

### **6.5 Giriş**

İnceleme alanlarındaki hücre sistemlerinde modellenen temsili profillerin davranış analizleri, SHAKE 91 programı ile iki grup yer hareketi kaydı kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak, 5. bölümde Balıkesir için belirlenen hedef parametreler doğrultusunda RASCAL ile üretilen 18 kayıt içinden seçilen 6 yer hareketi kullanılmaktadır. Bu kayıtlar, 3 farklı hedef spektrum ve 6 farklı gerçek yer hareketine dayanmaktadır. Davranış analizi sonucunda her hücre için yüzeyde elde edilen 6 davranış spektrumunun geometrik ortalaması bulunmuştur. Ortalama spektrumların 0.1-1 sn periyot aralığındaki aritmetik ortalaması, bir mikrobölgeleme parametresi olarak değerlendirilmektedir. Her hücrede belirlenen ortalama spektrumlar için, NEHRP kriterlerinin sağlandığı bir optimizasyon yaklaşımına dayalı olarak tasarım spektrumu belirlenmiştir. Elde edilen tasarım spektrumlarına ait  $S_{ms}$  ve  $S_{m1}$  parametreleri (0.2 sn ve 1 sn periyotlu spektral ivmeler), aynı tehlike seviyesi için NEHRP' e göre mevcut zemin grupları için önerilen spektral ivmeler ile karşılaştırılmaktadır.

İkinci aşamada, modellenen temsili profillerin davranış analizleri, farklı bir grup yer hareketi kaydı için tekrarlanmaktadır. Bu gruptaki 6 kayıt, Türkiye'den seçilen gerçek yer hareketlerinin, Balıkesir il merkezi için olasılıksal olarak belirlenen 0.26 g değerindeki en büyük ivme ile oranlanması sonucu elde edilmiştir. 105 hücrede 6 yer hareketi kaydı için, toplamdaki 630 davranış analizinin sonuçları, RASCAL ile üretilen kayıtların kullanıldığı davranış analizleri ile yüzeydeki maksimum ivme, Arias şiddeti ve spektral parametreler cinsinden, frekans dağılımlarına dayalı olarak karşılaştırılmaktadır.

## 6.6 Rascal ile Üretilen Kayıtların Kullanıldığı Zemin Davranış Analizleri

Geoteknik olarak modellenen profillerin zemin davranış analizleri SHAKE 91 programı ile yapılmıştır. Program, her bir alt tabakada oluşan eşdeğer üniform deformasyon ile uyumlu kayma modülü ve sönüm değerlerini elde etmek amacıyla iteratif prosedüre dayalı olarak, zeminlerin lineer olmayan davranışlarının hesaplanmasında eşdeğer lineer prosedür kullanılmaktadır. Tek boyutlu analize dayalı programda, düşey yönde hareket eden kayma dalgalarının etkisi altındaki yatay zemin tabakalarının davranışı hesaplanmaktadır [6].

Ana kaya ya da sağlam zemin tabakalarına ait derinliğin belirlenmesinde, 3. bölümde sunulan jeolojik yorumlara ve derin sondajlara dayalı olarak, bu bölümdeki kaynakların elde edildiği birimlerdeki uzmanların görüşleri alınmıştır. Jeolojik verideki farklı veri kaynaklarına bağlı olarak yapılan yorumlarda ayrılıklar olmasına karşılık, sağlam zemin tabakasına ait derinlik için yapılabilecek kabuller 50 m ile 70 m arasındadır. 30 m lik kayma dalgası hız profiline sahip iki derin sondajdaki değişimlerin lineer olduğu kabulü ile uzatılması durumunda,  $V_s=700$  m/sn lik bir hıza 80 m seviyelerinde ulaşılmasının bu kabulü desteklediği düşünülebilir. Bu doğrultuda zemin davranış analizlerinde,  $V_s= 700$  m/sn olduğu kabul edilen sağlam zeminin 70 m derinlikte olduğu varsayımı ile kayma dalgası hızının değişimi 30 m'den sonra lineer olarak arttırılmıştır.

Her hücre için 5. bölümdeki çalışmalar sonucu belirlenmiş olan RASCAL ile üretilmiş 6 yer hareketi kaydı kullanılmaktadır (Tablo 6.1). Kullanılan kayıtların en büyük ivme değerleri, 0.21 g ile 0.23 g arasında değişmektedir (Tablo 6.2). Kayıtların ivme zaman grafikleri Şekil 6.1' de gösterilmektedir. İnceleme alanlarının tamamında temsili profillerin modellendiği toplam 105 hücre bulunmaktadır.

Tablo 6.1 Zemin davranış analizlerinde kullanılan, RASCAL programı ile üretilmiş yer hareketi kayıtları

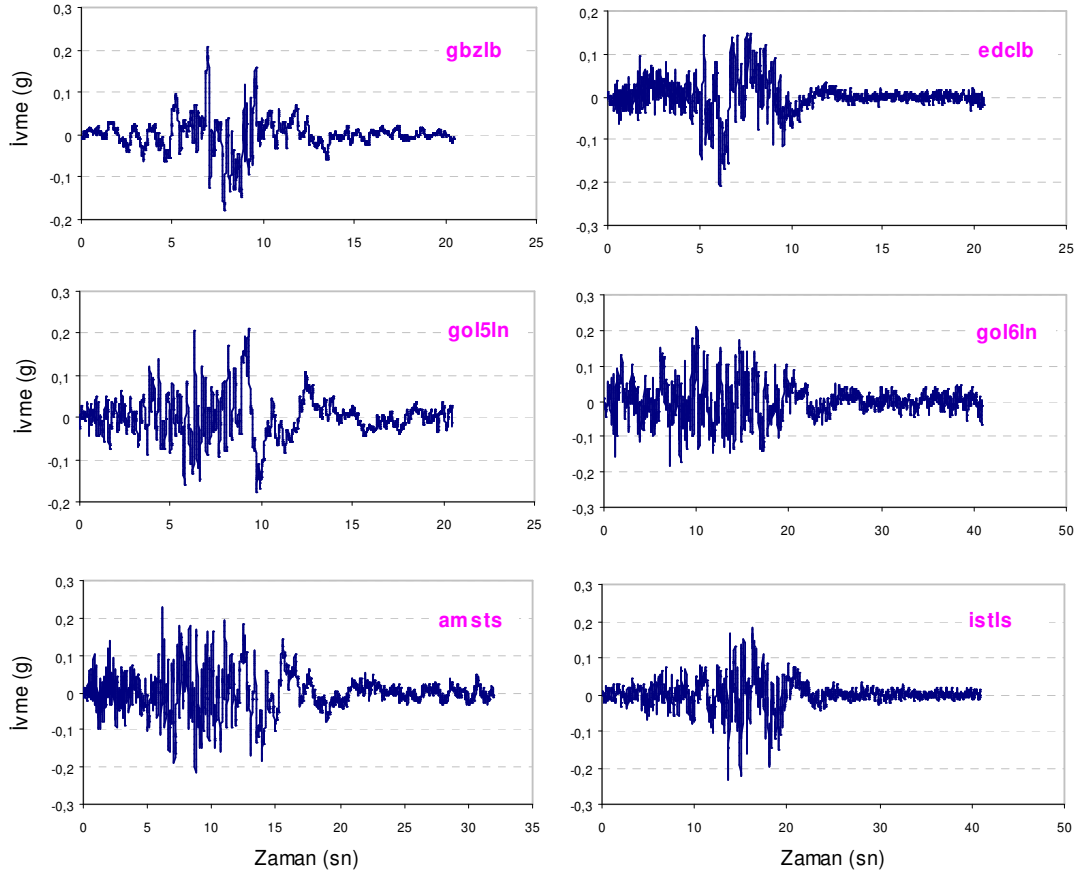
| Zemin davranış analizlerinde kullanılan yer hareketi kayıtları | RASCAL programı girdileri  |  |
|--|----------------------------|--|
|  | Kullanılan yer hareketi    | Kullanılan hedef spektrum                  |
| <b>gbzlb</b>   | Gebze kaydı L bileşeni     | Boore vd. [137]                            |
| <b>edclb</b>   | Edincik kaydı L bileşeni   | Boore vd. [137]                            |
| <b>gol5ln</b>  | Gölbaşı-5 kaydı L bileşeni | Ambraseys vd. [133], Normal fay için       |
| <b>gol6ln</b>  | Gölbaşı-6 kaydı L bileşeni | Ambraseys vd. [133], Normal fay için       |
| <b>İstls</b>   | İstanbul kaydı L bileşeni  | Ambraseys vd. [133], Yanal atımlı fay için |
| <b>amsts</b>   | Amasya kaydı T bileşeni    | Ambraseys vd. [133], Yanal atımlı fay için |

Tablo 6.2 Zemin davranış analizlerinde kullanılan kayıtlara ait yer hareketi parametreleri

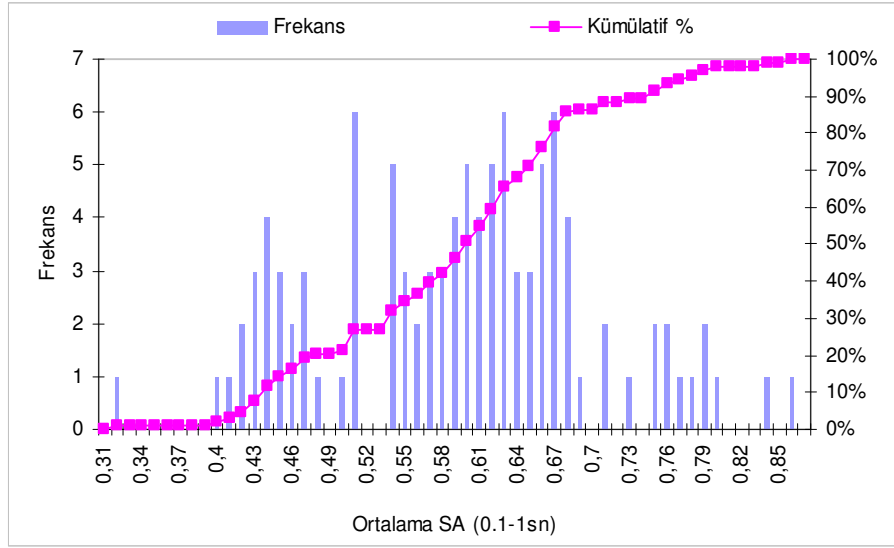
|               | Maks. İvme (g) | Maks. Hız (cm/sn) | Arias Şiddeti (m/sn) | RMS (ivme) (g) | İvme spektrum şiddeti (g) | Hız spektrum şiddeti (cm/sn) | Süre (Bracketed) (sn) | Süre (Significant) (sn) |
|---------------|----------------|-------------------|----------------------|----------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| <b>gbzlb</b>  | 0.2079         | 54.759            | 0.467                | 0.0385         | 0.166                     | 91.43                        | 20.43                 | 8.06                    |
| <b>edclb</b>  | 0.2079         | 62.366            | 0.523                | 0.0407         | 0.172                     | 99.529                       | 20.40                 | 7.59                    |
| <b>gol5ln</b> | 0.2108         | 78.988            | 0.827                | 0.0512         | 0.212                     | 148.61                       | 20.48                 | 9.63                    |
| <b>gol6ln</b> | 0.2108         | 52.726            | 1.532                | 0.0493         | 0.202                     | 154.09                       | 40.95                 | 24.56                   |
| <b>istls</b>  | 0.2317         | 52.106            | 0.907                | 0.0379         | 0.206                     | 145.25                       | 40.67                 | 14.56                   |
| <b>amsts</b>  | 0.2317         | 59.318            | 1.301                | 0.0514         | 0.223                     | 153.28                       | 31.94                 | 16.32                   |

Zemin davranış analizi sonuçlarına dayalı mikrobölgeleme parametrelerinden biri de, Türkiye’deki uygulamalar için hazırlanan mikrobölgeleme kılavuzunda önerilen belirli bir periyot aralığındaki ortalama spektral ivmedir [8]. Bu doğrultuda ortalama spektral ivme, her hücre için yüzeyde elde edilen 6 davranış spektrumunun geometrik ortalamasına ait 0.1-1 sn periyotları arasındaki aritmetik ortalama ile hesaplanmıştır. Seçilen bir periyot aralığındaki ortalama spektral ivmenin, mikrobölgeleme parametresi olarak kullanıldığı son çalışmalarda, sayısal değerler yerine bölgedeki frekans dağılımlarına dayalı rölatif değerlerin kullanımı önerilmektedir [8, 48, 49]. Balıkesir’deki inceleme alanları için hesaplanan, 0.1-1 sn periyotları arasındaki ortalama spektral ivmenin frekans dağılımı Şekil 6.2’de

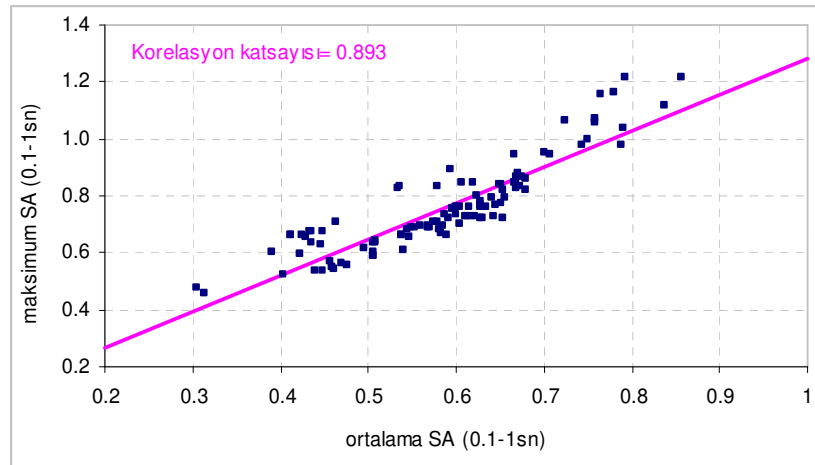
gösterilmektedir. Bu parametrenin, yüzeydeki 6 yer hareketi kaydından elde edilen ortalama davranış spektrumuna ait maksimum spektral ivme ve ivme spektrum şiddeti parametreleri ile karşılaştırılması, korelasyonun yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 6.3-4).



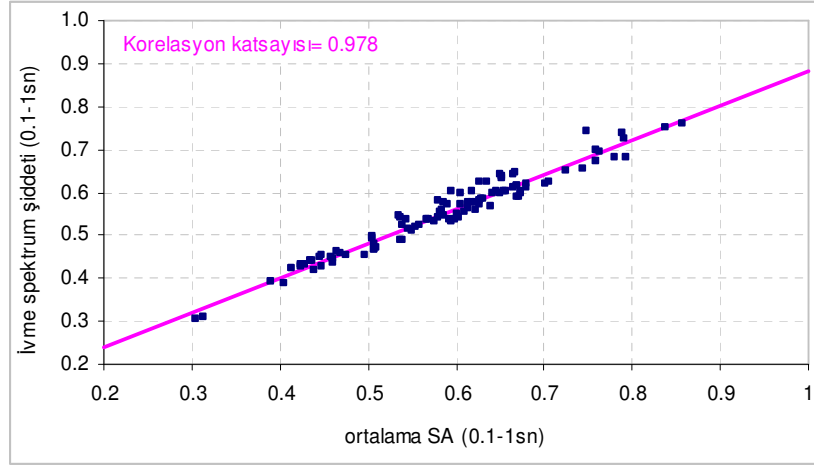
Şekil 6.1 Zemin davranış analizlerinde kullanılan yer hareketleri



Şekil 6.2 Ortalama spektral ivmelerin inceleme alanlarındaki frekans dağılımı



Şekil 6.3 Ortalama spektral ivme ve maksimum spektral ivme arasındaki ilişki

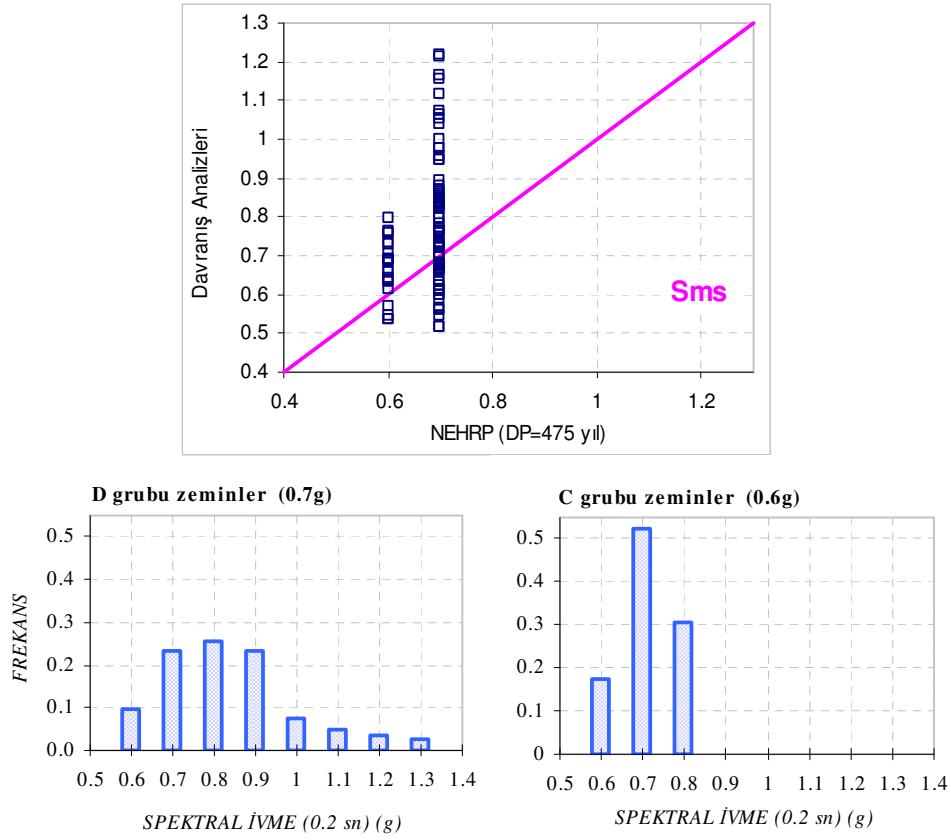


Şekil 6.4 Ortalama spektral ivme ve ivme spektrum şiddeti arasındaki ilişki

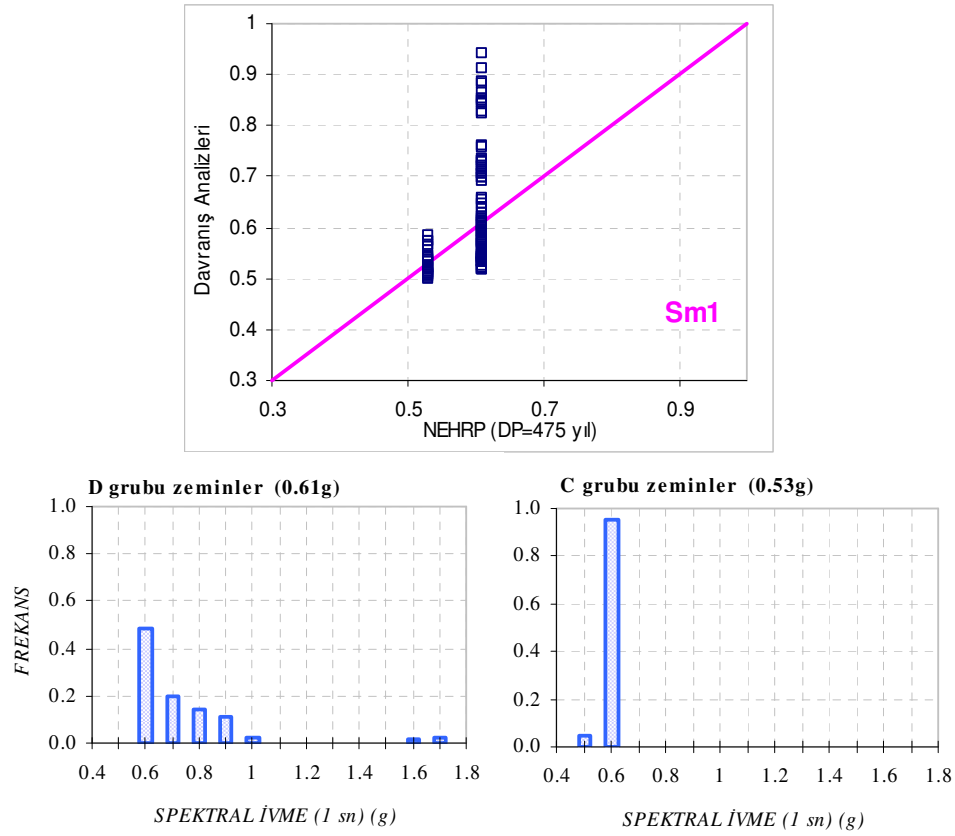
Zemin davranış analizi sonuçlarına dayalı bir diğer yaklaşım, her bir hücrede NEHRP kriterlerine uygun olarak tasarım spektrumu parametrelerinin belirlenmesidir [48]. NEHRP kriterlerindeki, 0.2 sn ( $S_{ms}$ ) ve 1 sn ( $S_{m1}$ ) periyotlu spektral ivmeler, her hücre için yüzeyde elde edilen 6 yer hareketine ait ortalama davranış spektrumundan elde edilmiştir. Bu iki spektral ordinatın belirlenmesi aşamasında,  $S_{ms}$  ve  $S_{m1}$ ' in bağımsız değişken olduğu bir optimizasyon yöntemi uygulanarak, ortalama ivme spektrumu dış zarfı elde edilmektedir.

Davranış analizlerine dayalı optimizasyon yöntemi ile elde edilen tasarım spektrumu parametreleri ( $S_{ms}$  ve  $S_{m1}$ ), aynı tehlike seviyesi için NEHRP prosedürüne göre bulunan spektral ivmelerle karşılaştırılmaktadır (Şekil 6.5-6). NEHRP sınıflandırma sistemine göre inceleme alanları, C ve D zemin sınıflarındaki hücrelerden oluşmaktadır. C ve D zemin grubu ile tanımlanan hücreler için ayrı ayrı belirtilen, optimizasyon yöntemine göre bulunan spektral ordinatların frekans dağılımları, NEHRP prosedürüne göre bulunan spektral değerlere göre saçılımı daha iyi göstermektedir. NEHRP' e göre D grubu zeminlerden oluşan hücrelerde, NEHRP kriterleri için optimizasyon yöntemi ile elde edilen 0.2 sn periyotlu spektral ivmelerin çoğu, NEHRP prosedürüne göre 0.7 g olan değer üstünde geniş bir dağılım göstermektedir. C grubu ile tanımlanan hücrelerde de bulunan değerlerin

çoğu, 0.6 g olan NEHRP prosedürü değerinin üstünde, ancak daha dar bir dağılımdadır. Optimizasyon yaklaşımına dayalı 1sn periyotlu spektral ivmeler, C grubu ile tanımlı hücrelerin tamamında, NEHRP prosedürü için 0.53 g olan değere çok yakın iken, D grubu ile tanımlı hücrelerin yarısında 0.61g 'nin üzerinde geniş bir dağılım göstermektedir.



Şekil 6.5 Davranış analizlerine dayalı optimizasyon yöntemi ve NEHRP prosedürü ile bulunan 0.2 sn periyotlu spektral ivmelerin karşılaştırılması



Şekil 6.6 Davranış analizlerine dayalı optimizasyon yöntemi ve NEHRP prosedürü ile bulunan 1 sn periyotlu spektral ivmelerin karşılaştırılması

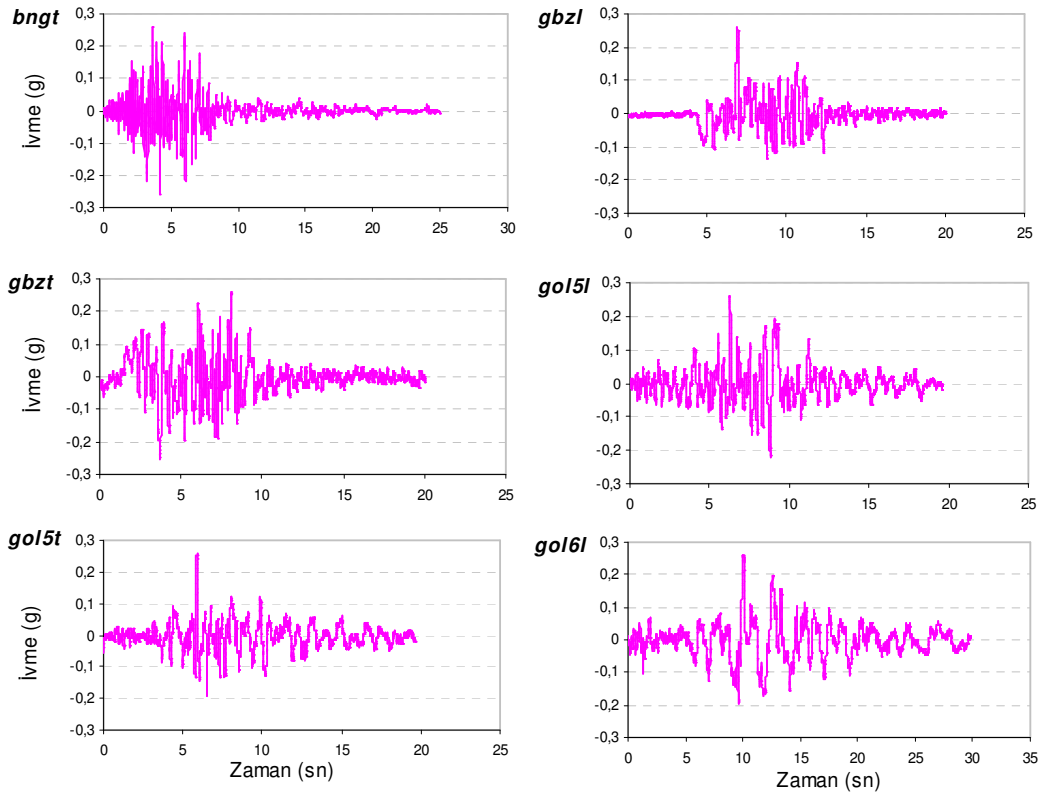
### 6.3 Maksimum İvme için Oranlanan Kayıtların Kullanıldığı Zemin Davranış Analizleri

Maksimum ivme ölçekleme yönteminde, orantı faktörünün 0.25 ile 4 arasında kalması kriterine göre seçilmiş 6 gerçek ivme kaydı, Balıkesir il merkezi için Ansal [128] azalım ilişkisine dayalı olarak belirlenmiş, 475 yıllık dönüş periyoduna sahip, 0.26 g değeri ile oranlanmıştır. Elde edilen kayıtlarla inceleme alanlarındaki 105 hücre için zemin davranış analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, RASCAL ile üretilmiş kayıtlara dayalı davranış analizlerinin sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmalar, maksimum ivme, Arias şiddeti ve optimizasyon yöntemine dayalı olarak bulunan 0.2 sn periyotlu spektral ivmeler cinsinden frekans dağılımları ile gösterilmektedir.



Tablo 6.3 Maksimum ivme ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtlara ait bazı parametreler

|              | Maks. İvme (g) | Maks. Hız (cm/sn) | Arias Şiddeti (m/sn) | RMS (ivme) (g) | İvme spektrum şiddeti (g) | Hız spektrum şiddeti (cm/sn) | Süre Bracketed (sn) | Süre Significant (sn) |
|--------------|----------------|-------------------|----------------------|----------------|---------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|
| <i>bngt</i>  | 0.26           | 20.392            | 0.721                | 0.0433         | 0.244                     | 74.379                       | 23.92               | 6.62                  |
| <i>gbzl</i>  | 0.26           | 72.670            | 0.529                | 0.0414         | 0.181                     | 73.520                       | 15.35               | 7.54                  |
| <i>gbzt</i>  | 0.26           | 71.381            | 1.070                | 0.0589         | 0.273                     | 113.687                      | 20.03               | 8.10                  |
| <i>gol5l</i> | 0.26           | 59.147            | 0.785                | 0.0509         | 0.235                     | 113.960                      | 19.63               | 10.66                 |
| <i>gol5t</i> | 0.26           | 93.257            | 0.538                | 0.0421         | 0.221                     | 94.216                       | 19.63               | 11.14                 |
| <i>gol6l</i> | 0.26           | 80.649            | 1.450                | 0.0561         | 0.152                     | 222.006                      | 29.67               | 15.73                 |



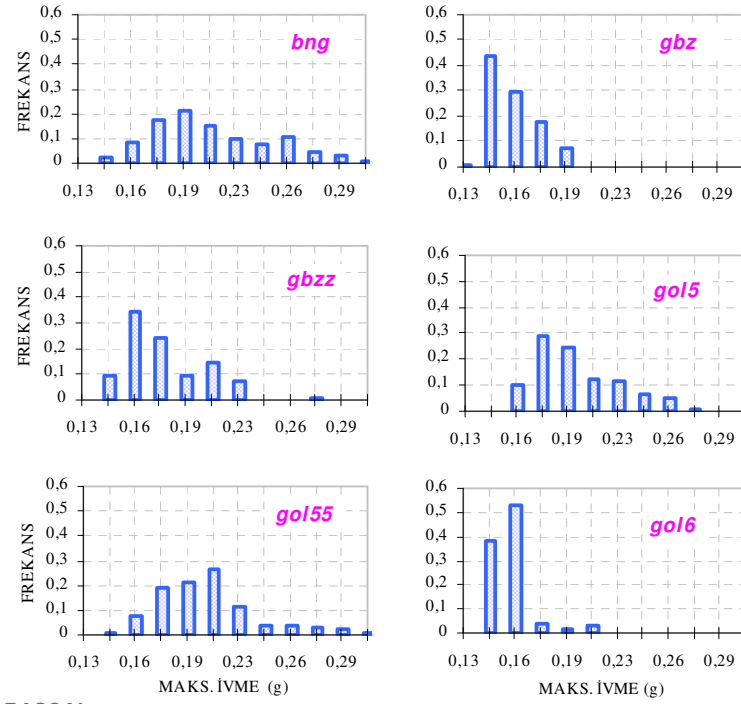
Şekil 6.7 Maksimum ivme ölçekleme yöntemi ile üretilen yer hareketi kayıtları

RASCAL ve ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtların zemin davranış analizlerinde kullanılması durumunda sonuçlar, öncelikle her iki yöntem için girdi konumundaki gerçek kayıtlar göz önüne alınarak karşılaştırılmaktadır (Şekil 6.8-10). Ölçekleme yönteminin kullanılması durumunda, kullanılan her bir gerçek kayıt için yüzeydeki maksimum ivmeler oldukça farklı frekans dağılımları göstermektedir. RASCAL kayıtlarının kullanılması durumunda ise gerçek kayıtların değişiminin, frekans dağılımları üzerindeki etkisinin daha az olduğu söylenebilir. Yüzeydeki Arias şiddeti frekans dağılımlarının, her iki yöntemeye dayalı sonuçlarda da, kullanılan gerçek kayıtların değişiminden etkilendiği görülmektedir. 0.2 sn periyotlu spektral ivmeler, RASCAL ile üretilen kayıtların kullanılması durumunda farklı gerçek kayıtlar için, ölçekleme yöntemine göre daha benzer frekans dağılımları göstermektedir.

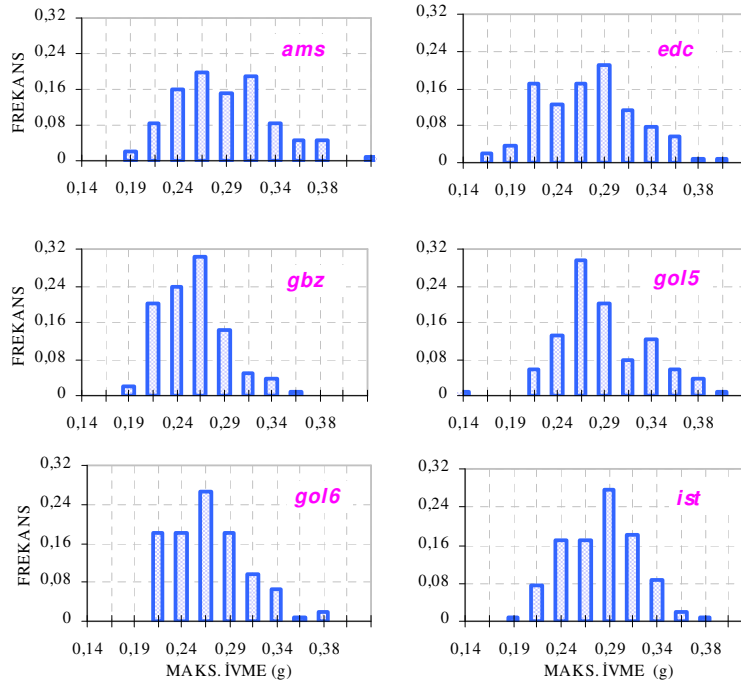
İkinci aşamada, her iki yöntemeye dayalı olarak belirlenen parametrelerin frekans dağılımları bölgesel olarak ayrılarak incelenmektedir (Şekil 6.11-13). Her üç parametreye ait frekans dağılımlarının da, bölgesel olarak belirgin bir farklılık göstermediği ve hatta davranış analizlerinde kullanılan kayıtların elde edildiği yöntemin daha etkili olduğu görülmektedir.

Son aşamada tüm kayıtlara ait frekans dağılımları, istatistiksel parametreler ile birlikte değerlendirilmektedir (Şekil 6.14-16). Zemin davranış analizlerinden elde edilen maksimum ivme ve 0.2 sn periyotlu spektral ivmeler, RASCAL ile üretilen kayıtların kullanılması durumunda, normalize standart sapması daha düşük normal bir dağılım göstermektedir. Yüzeydeki Arias şiddeti frekans dağılımlarında ise ölçekleme yöntemi ile elde edilen kayıtlar için saçılımın daha az olduğu görülmektedir.

### MAKSİMUM İVME ÖLÇEKLEMESİ

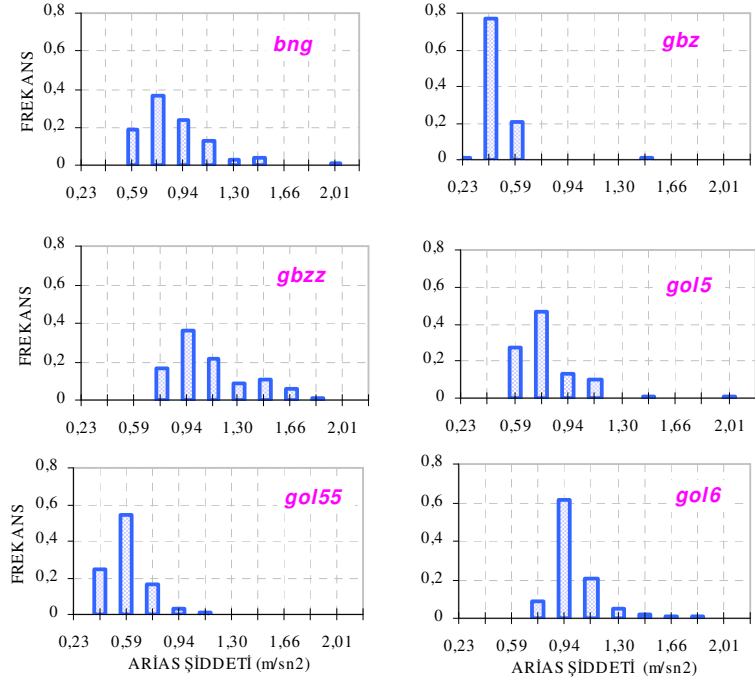


### RASCAL

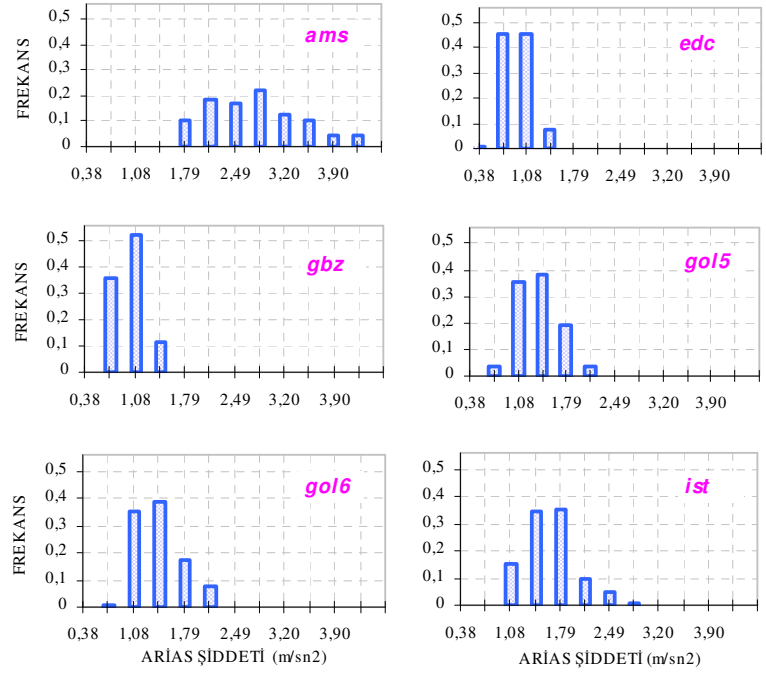


Şekil 6.8 RASCAL ve ölçeleme yönteminde kullanılan yer hareketi kayıtları için maksimum ivme frekans dağılımları

**MAKSİMUM İVME ÖLÇEKLEMESİ**

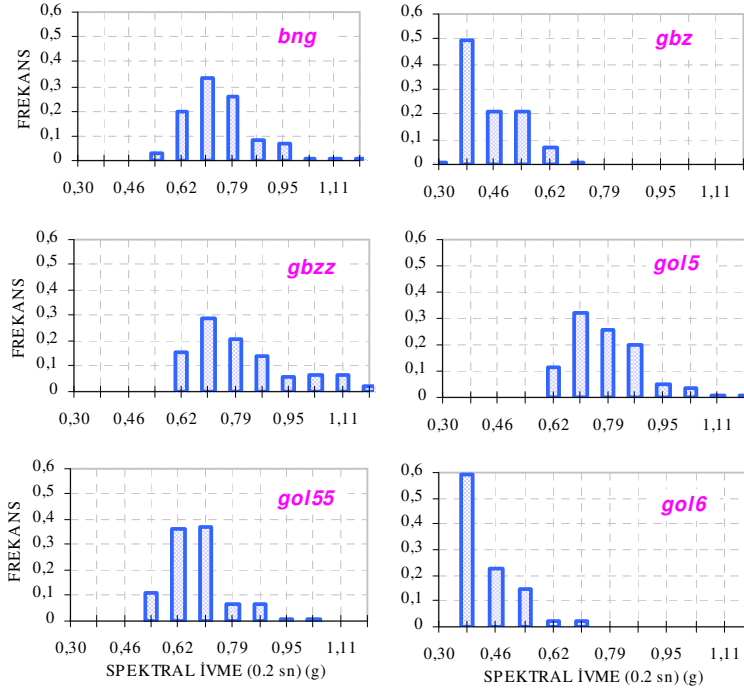


**RASCAL**

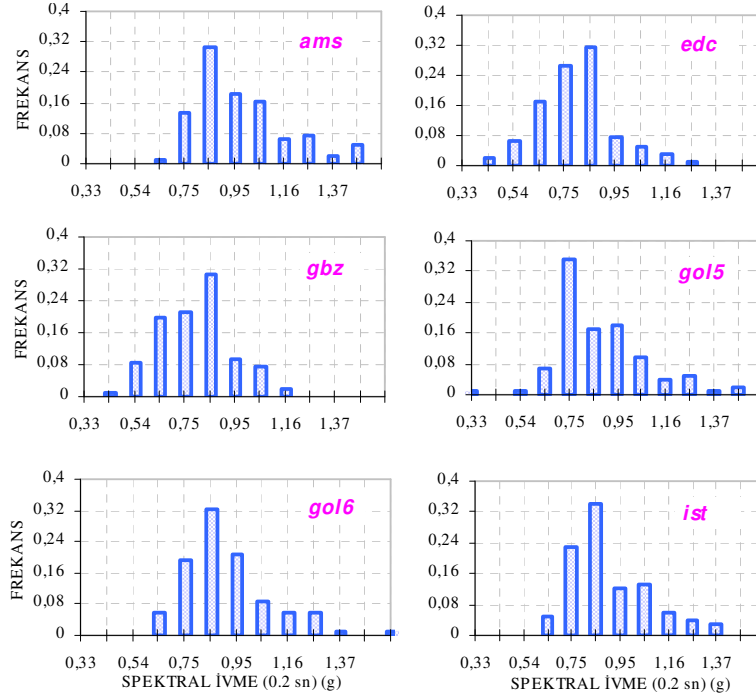


Şekil 6.9 RASCAL ve ölçekleme yönteminde kullanılan yer hareketi kayıtları için Arias şiddeti frekans dağılımları

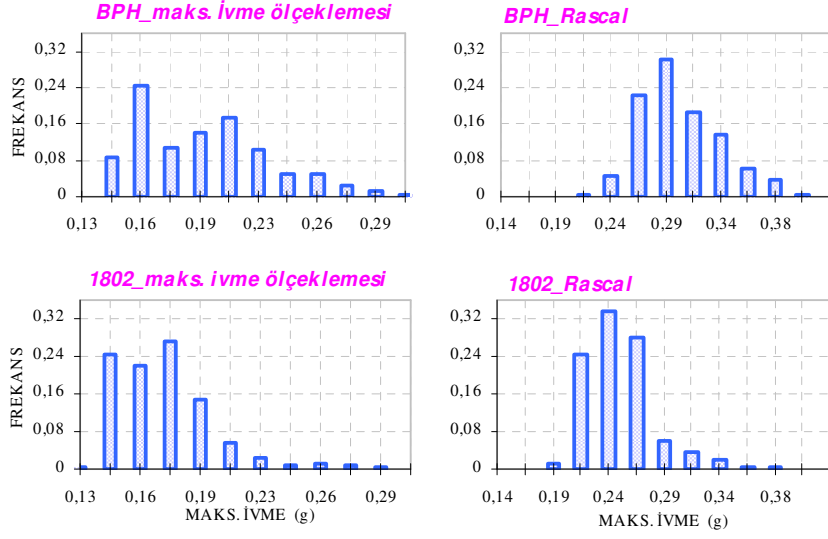
### MAKSİMUM İVME ÖLÇKLEMESİ



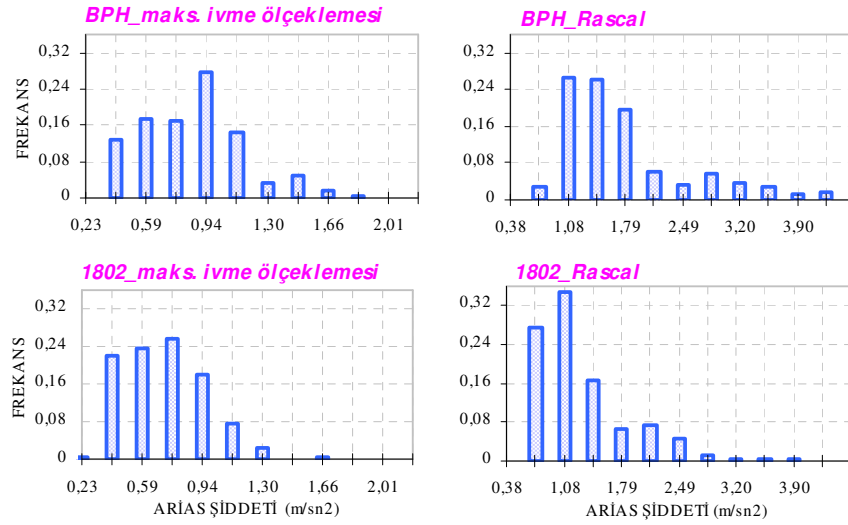
### RASCAL



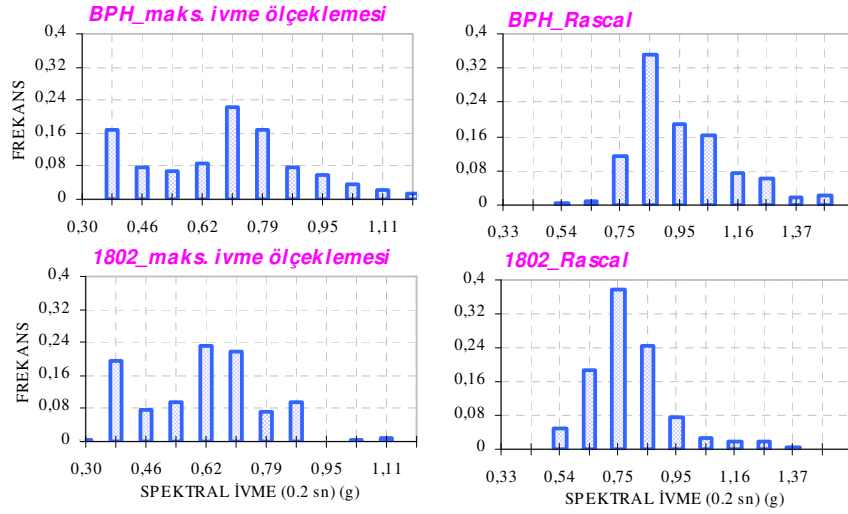
Şekil 6.10 RASCAL ve ölçkleme yönteminde kullanılan yer hareketi kayıtları için 0.2 sn deki spektral ivmelerin frekans dağılımları



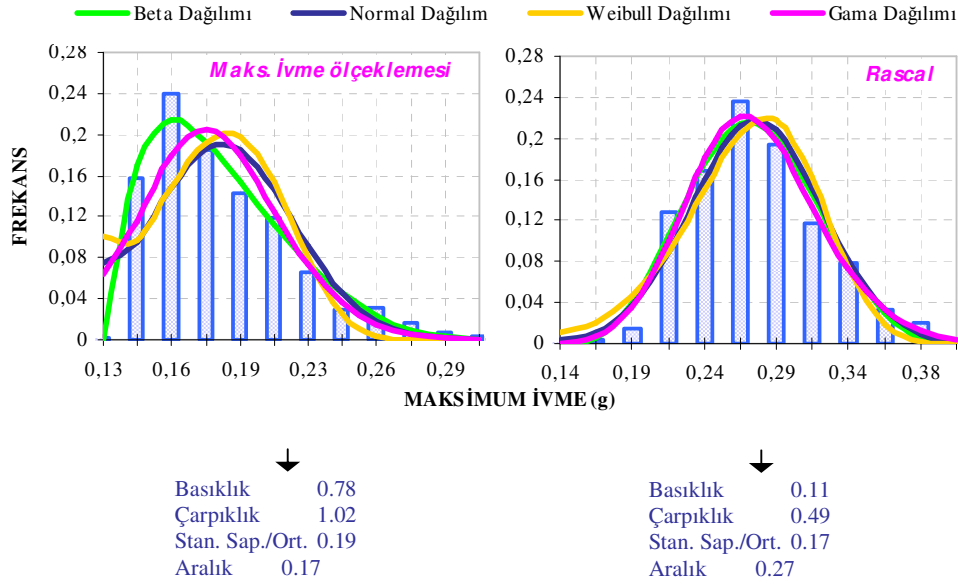
Şekil 6.11 Maksimum ivme frekans dağılımlarının bölgesel olarak ayrılması



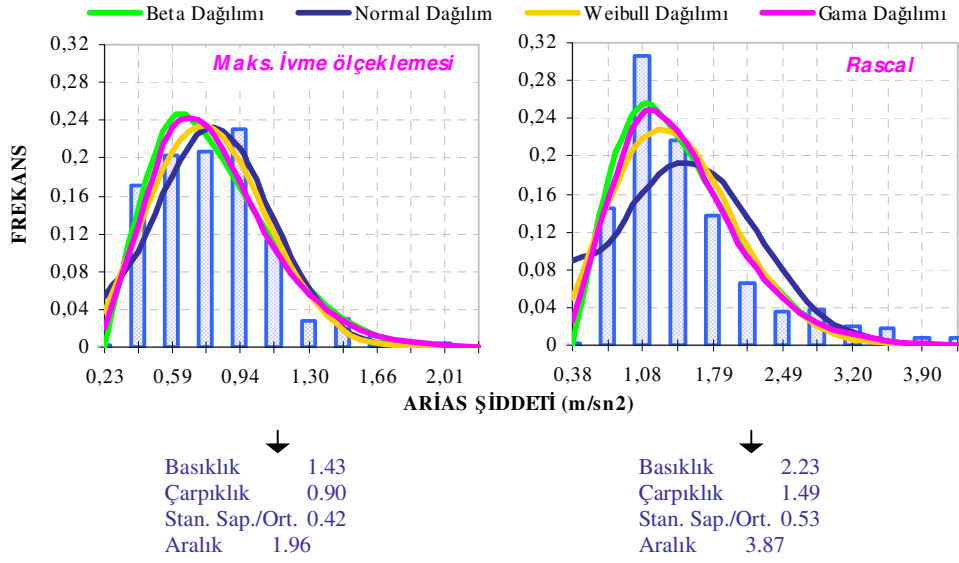
Şekil 6.12 Arias şiddeti frekans dağılımlarının bölgesel olarak ayrılması



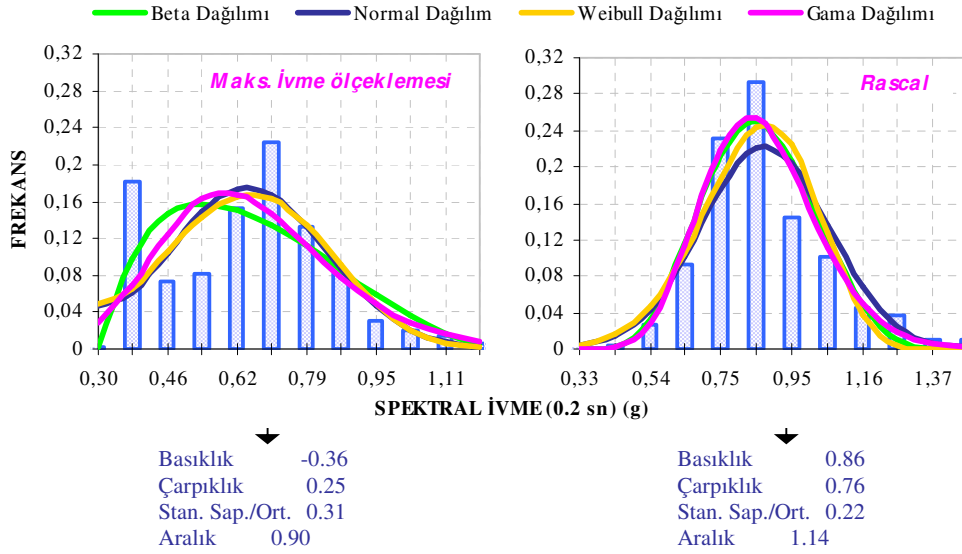
Şekil 6.13 0.2 sn'deki spektral ivme frekans dağılımlarının bölgesel olarak ayrılması



Şekil 6.14 Maksimum ivme frekans dağılımları



Şekil 6.15 Arias şiddeti frekans dağılımları



Şekil 6.16 0.2 sn periyotlu spektral ivmenin frekans dağılımları



## 6.7 Sonuçlar

Modellenen temsili profillerin zemin davranış analizleri, iki farklı grup yer hareketi için SHAKE 91 programı ile yapılmıştır. 3 farklı hedef spektrum ve 6 farklı gerçek yer hareketine dayalı olarak RASCAL ile üretilen 6 yer hareketinin en büyük ivme değerleri 0.21g ile 0.23 g arasında değişmektedir. RASCAL ile üretilen kayıtların kullanıldığı davranış analizlerine dayalı olarak her hücre için ortalama davranış spektrumlarına ait 0.1-1 sn periyot aralığındaki ortalama spektral ivmeler belirlenmiştir. Mikrobölgeleme için kullanılacak bu parametrenin, ortalama spektrumlara ait maksimum spektral ivme ve ivme spektrum şiddeti parametreleri ile yüksek korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Her hücredeki ortalama spektrum için NEHRP kriterlerinin sağlandığı bir optimizasyon yaklaşımına dayalı olarak belirlenen tasarım spektrumu ordinatları, aynı tehlike seviyesi için NEHRP' e göre mevcut zemin grupları için belirlenen spektral ivmeler ile karşılaştırılmaktadır. D grubu zeminler olarak tanımlanan hücrelerde, zemin davranış analizleri sonucu optimizasyon yöntemi ile bulunan 0.2 sn periyotlu spektral ivmelerin büyük bir kısmı, NEHRP prosedürüne göre bulunan 0.7 g değerinin üstündedir. C grubu ile tanımlanan hücreler için de çoğunlukla daha büyük değerler elde edilmesine karşılık, D grubundaki sonuçlara göre daha az bir saçılım göstermektedir. 1 sn periyotlu spektral ivmeler için optimizasyon yaklaşımına dayalı sonuçların, C grubu ile tanımlı hücrelerde NEHRP prosedürü ile bulunan değere daha yakın bir dağılım gösterdiği, D grubu ile tanımlı hücrelerde ise NEHRP değerine göre saçılımın daha fazla olduğu görülmektedir.

En büyük ivme değerleri 0.26 g ile oranlanan 6 yer hareketi kaydı, RASCAL ile üretilen kayıtlar ile bazı yer hareketi parametreleri cinsinden karşılaştırıldığında, maksimum hız ve hız spektrum şiddeti parametrelerinin daha geniş bir değer aralığına sahip oldukları söylenebilir. Ölçekleme yöntemi ile elde edilen bu kayıtların ve RASCAL ile üretilen kayıtların kullanıldığı her iki durum için zemin davranış analizi sonuçları, maksimum ivme, Arias şiddeti ve optimizasyon yöntemine dayalı olarak bulunan 0.2 sn periyotlu spektral ivmeler cinsinden karşılaştırılmaktadır. Yüzeydeki yer hareketi parametrelerinin frekans dağılımlarının karşılaştırıldığı bu aşamada ilk olarak, her iki yöntem içinde kullanılan gerçek yer

hareketi kayıtlarının etkisi incelenmektedir. Kullanılan yer hareketi kayıtlarının etkisi, maksimum ivme ve 0.2 sn periyotlu spektral ivmeler için ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtların kullanılması durumunda daha fazla hissedilmektedir. Arias şiddeti için her iki yöntemeye dayalı analiz sonuçları da kullanılan yer hareketi kaydına bağımlı olarak farklı frekans dağılımları göstermektedir. Ayrıca 1802 ve BPH Bölgesi için bölgesel olarak ayrılan frekans dağılımlarının, belirgin bir farklılık göstermediği görülmektedir. Davranış analizleri ile yüzeyde elde edilen tüm yer hareketi kayıtlarının göz önüne alınması durumunda; RASCAL ile üretilen kayıtlar için maksimum ivme ve 0.2 sn periyotlu spektral ivme dağılımlarında normalize standart sapma değerleri daha düşük iken Arias şiddeti frekans dağılımı, ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtlar için daha düşük normalize standart sapma göstermektedir.

## **7. MİKROBÖLGELEME UYGULAMASI**

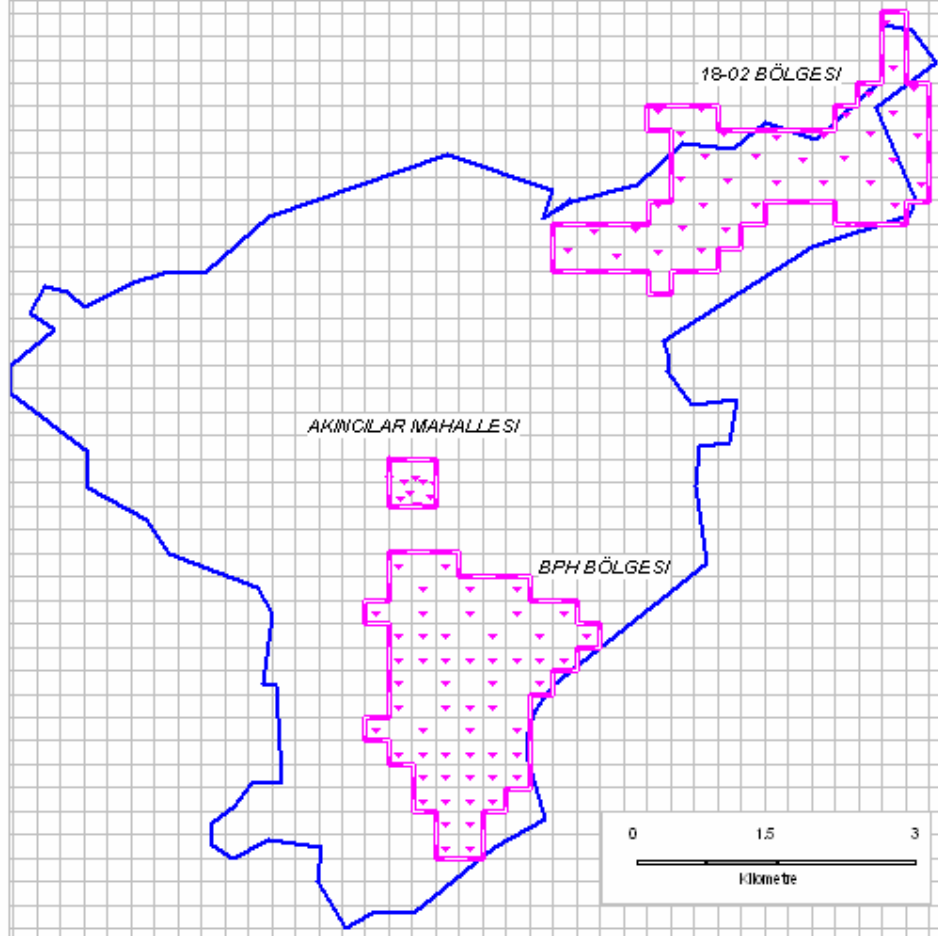
### **7.1 Giriş**

Çalışma alanlarının mikrobölgeleme haritaları, Balıkesir yerleşim alanı sınırlarında oluşturulan 250\*250 m boyutlu hücre sistemine dayalı olarak, coğrafi bilgi sistemi ile hazırlanmıştır. Öncelikle Türkiye ve Amerika yönetmeliklerine göre belirlenen zemin sınıflarının değişimi gösterilmektedir. Yer hareketi için mikrobölgeleme parametresi, iki farklı yaklaşıma dayalı olarak hesaplanan spektral ivmeleri içermektedir. İlki, RASCAL ile üretilen yer hareketi kayıtlarının kullanıldığı zemin davranış analizlerinden hesaplanan, 0.1-1 sn periyot aralığındaki ortalama spektral ivmelerdir. Diğer yaklaşımda spektral ivmeler, Borcherdt [76] tarafından önerilen ampirik ilişkiye dayalı olarak belirlenmiştir.

### **7.2 Mikrobölgeleme Parametreleri ve Haritalama**

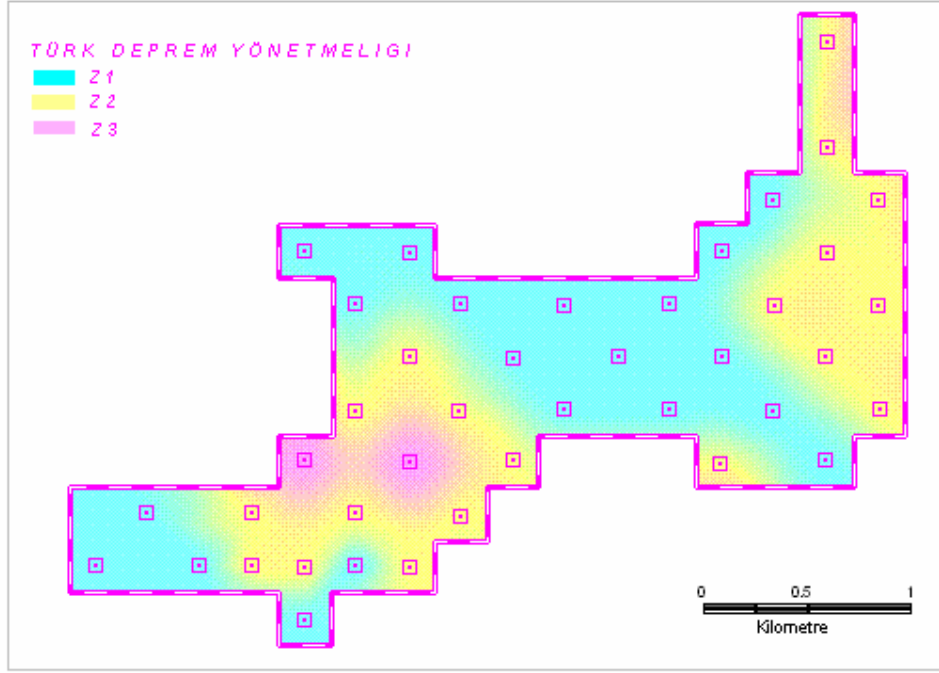
Balıkesir yerleşim alanındaki BPH Bölgesi, 18-02 Bölgesi ve Akıncılar mahallesi çalışma alanlarının, geoteknik modelleme aşamasında, mevcut verinin dağılımı doğrultusunda farklı boyutlardaki hücre sistemleri ile temsil edilmesinin daha uygun olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte temsili zemin profilleri, Balıkesir yerleşim alanını kapsayan jeolojik verinin de dikkate alındığı bölgesel farklılıklar doğrultusunda göreceli olarak modellenmiştir. Bu doğrultuda sonuç mikrobölgeleme haritalarının, yerleşim alanı sınırlarını kapsayan tek bir hücre sistemi içinde oluşturulmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Bu hücre sistemi BPH bölgesi için belirlenen 250\*250 m boyutlu hücrelerin yerleşim alanı sınırlarını kapsayacak şekilde genişletilmesi ile elde edilmiştir. Şekil 7.1' de hücre sistemi ve çalışma alanlarında modellenen temsili zemin profillerinin bu sistem içindeki dağılımı görülmektedir. Sistemin BPH bölgesi temsili profilleri göz önüne alınarak oluşturulması nedeniyle, 18-02 bölgesindeki profil koordinatlarının hücre merkezine atanması gerekmektedir. Tüm yerleşim alanı için geçerli olan hücre sistemi içinde

sınırları belirlenen çalışma alanlarında, coğrafi bilgi sistemi kullanılarak hücre noktaları arasında doğrusal interpolasyon uygulanmıştır.

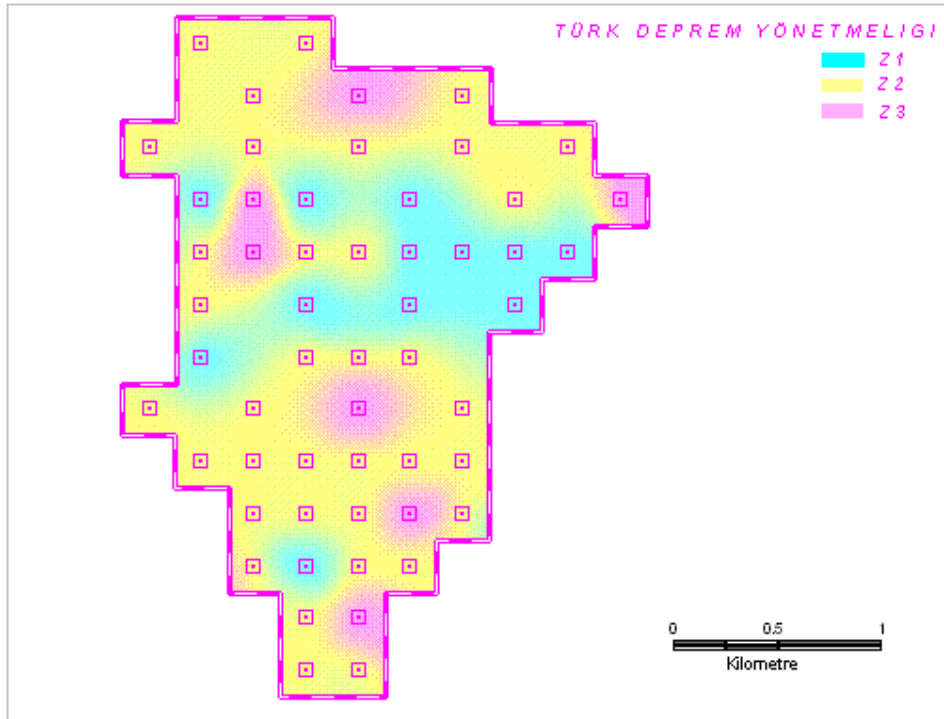


Şekil 7.1 Balıkesir yerleşim alanı sınırlarında oluşturulan 250\*250 m boyutlu hücre sistemi ve zemin davranış analizleri yapılan temsili profillerin koordinatları

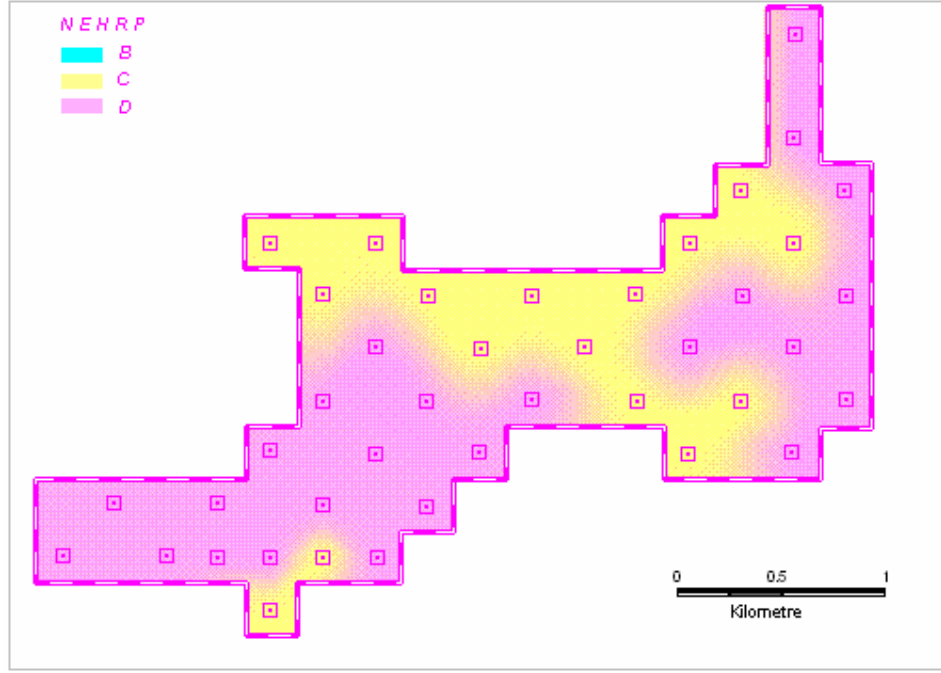
Yerleşim alanı sınırları içindeki iki büyük inceleme alanında, her hücre için belirlenen Türk Deprem Yönetmeliği ve NEHRP' e göre zemin sınıflarının dağılımı, Şekil 7.2-5 arasında gösterilmektedir. Çalışma alanlarının büyük bir çoğunluğunu Türk Deprem Yönetmeliği' ne göre Z1 ve Z2 sınıftaki zeminler oluşturmaktadır. Z3 zemin sınıfı ile tanımlanan hücreler, BPH Bölgesinde dağınık bir dağılım gösterirken, 18-02 Bölgesinde az sayıda sınırlı bir alan oluşturmaktadır. NEHRP' e göre 18-02 Bölgesinde, C ve D zemin sınıfındaki hücreler yaklaşık olarak eşit bir dağılım göstermektedir. BPH Bölgesinde ise çalışma alanının tamamına yakın bir bölümü D sınıfındaki zeminlerden oluşmaktadır.



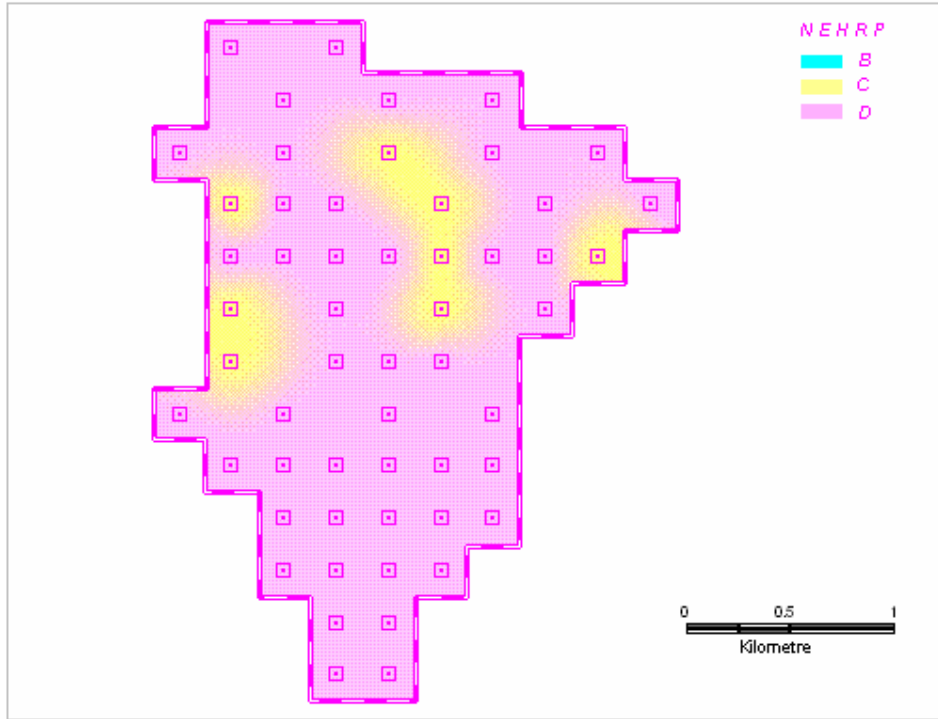
Şekil 7.2 18-02 Bölgesinde Türk Deprem Yönetmeliğine göre zemin sınıflarının değişimi



Şekil 7.3 BPH Bölgesinde Türk Deprem Yönetmeliğine göre zemin sınıflarının değişimi



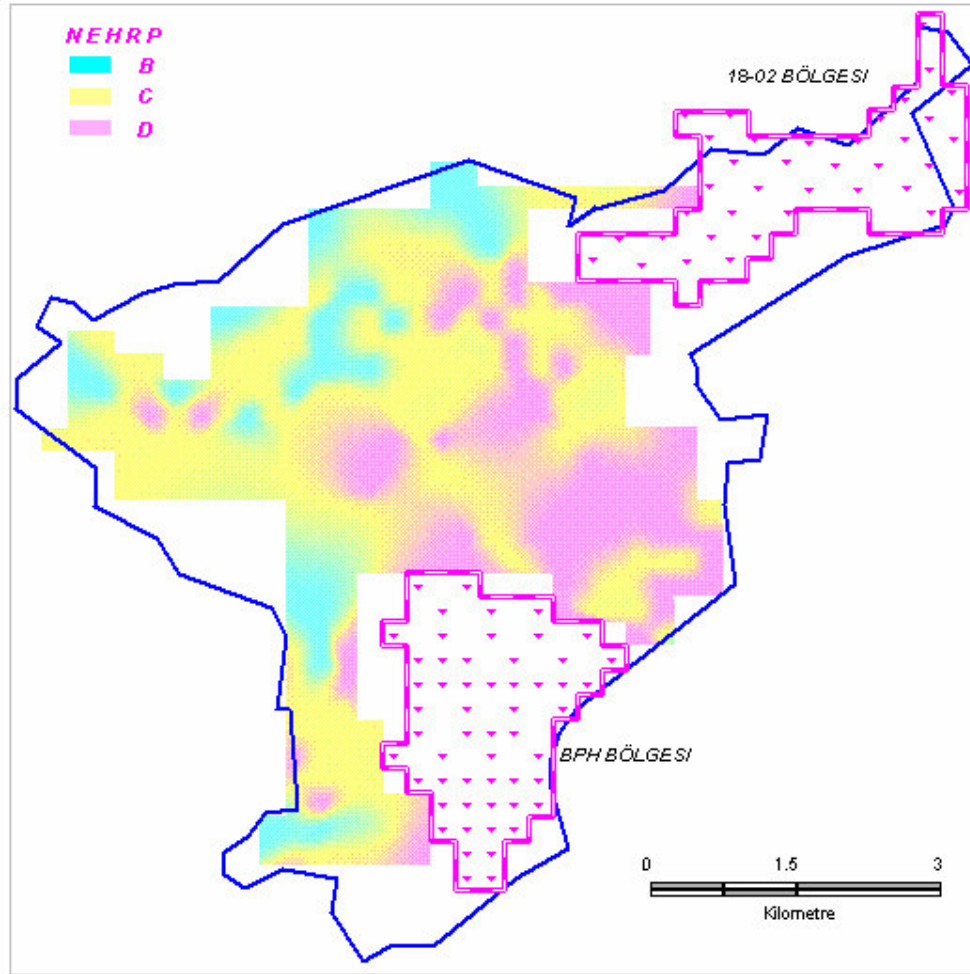
Şekil 7.4 18-02 Bölgesinde NEHRP' e göre zemin sınıflarının değişimi



Şekil 7.5 18-02 Bölgesinde NEHRP' e göre zemin sınıflarının değişimi

Temsili profillerin iki farklı gruptaki yer hareketi kaydı için oluşturulan zemin davranış analizlerine dayalı olarak zemin yüzeyinde hesaplanan bazı yer hareketi parametreleri 6. bölümde karşılaştırılmıştır. 6. bölümdeki değerlendirmeler doğrultusunda mikrobölgeleme parametrelerinden bir tanesi, RASCAL ile üretilen 6 yer hareketi kaydının kullanıldığı zemin davranış analizlerinden bulunan, 0.1-1 sn periyot aralığındaki ortalama spektral ivmeler olarak belirlenmiştir. Bu parametrenin haritalanmasında inceleme alanlarındaki frekans dağılımlarından faydalanılabilir. Ancak Balıkesir yerleşim alanının tamamı için geçerli olabilecek göreceli bir yaklaşımın daha uygun olacağı düşünülmüş ve inceleme alanlarının dışında kalan bölgeler, 4. Bölümde koordinatları gösterilen özel şirketler tarafından yapılmış çok sayıdaki zemin etüdlerine dayalı olarak NEHRP' e göre sınıflandırılmıştır (Şekil 7.6). İnceleme alanlarının dışındaki bu zemin etüdlерinin, detaylı geoteknik veri içermemekle birlikte tüm yerleşim alanındaki değişimi yansıttığı düşünülmektedir. NEHRP' e göre zeminlerin B, C ve D sınıflarında değişim gösterdiği bir bölgede, yönetmelikteki yaklaşım doğrultusunda spektral büyütme faktörleri ve dolayısıyla spektral ivmeler belirlenebilmektedir. Balıkesir için referans zemin yüzeyinde, 50 yılda %10 aşılma olasılığına karşılık 0.2 sn periyotlu spektral ivme, 5. bölümde kullanılan 3 azalım ilişkisi (Boore vd. [137], Ambraseys vd. [133] ilişkisinin normal ve yanal atımlı fay tipleri için) ile hesaplanan spektrumlara dayalı olarak, 0.56 g seçilmiştir. Bu değer, 3 azalım ilişkisi için bulunan maksimum spektral ivmelerin en büyüğü alınarak belirlenmiştir. Referans zemin yüzeyindeki spektral ivme değeri için büyütme katsayısı, zemin sınıfı ile karşılıklı etkileşimine dayalı olarak değişmektedir. 0.56 g için belirlenen büyütme katsayılarına dayalı olarak B, C ve D zemin sınıfları ile tanımlı hücrelerde, yüzeydeki spektral ivmeler 0.56g ile 0.76 g arasındadır. Mikrobölgeleme parametresi olarak belirlenen spektral ivmelerin haritalanmasında, bu değer aralığına ait ortalama 0.66 g değeri sınır olarak kabul edilmiş ve göreceli olarak iki ayrı bölge tanımlanmıştır.

Zemin davranış analizlerine dayalı olarak belirlenen 0.1-1 sn periyot aralığındaki ortalama spektral ivmeleri, 0.66g değerinin üstünde olan hücreler A, altında olan hücreler ise C ile temsil edilmiştir. Göreceli olarak spektral ivmeler cinsinden iki farklı bölgenin tanımlandığı bu yaklaşıma dayalı olarak belirlenen haritalar, Şekil 7.7-8' de gösterilmektedir.



Şekil 7.6 Balıkesir yerleşim alanında inceleme alanları dışındaki bölge için, NEHRP'e göre zemin sınıflarının değişimi

Mikrobölgeleme çalışmalarında yer hareketi için birden fazla parametrenin karşılaştırılması ve birlikte yorumlanması tercih edilen bir yaklaşım olarak uygulanmaktadır. Genel olarak, davranış analizi sonuçları ampirik bağıntılara dayalı parametreler ile birlikte değerlendirilmektedir. Bu çalışmada mikrobölgeleme için belirlenen ikinci parametre, eşdeğer kayma dalgası hızına dayalı olarak Borcherdt [76] tarafından önerilen bağıntı yardımıyla hesaplanan spektral ivmelerdir. Kısa periyot aralığındaki spektral ivmeler için büyütme faktörü  $F_a$ ,

$$F_a = (v_0 / v)^{m_a} \quad (7.1)$$



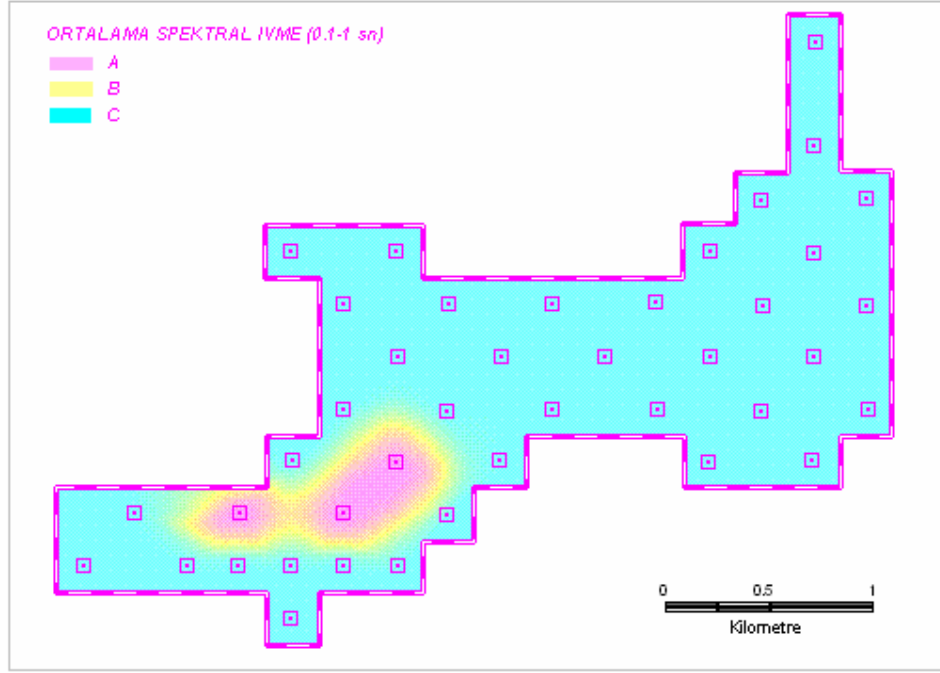
bağıntısı ile belirlenmektedir. Bağıntıda,  $v_0$  ana kaya kabul edilen tabakanın kayma dalgası hızı,  $v$  zemin profillerinin üst 30 metresi için eşdeğer kayma dalgası hızıdır. Üstel katsayı  $m_a$ , ana kayadaki yer hareketi seviyesine dayalı olarak belirlenmektedir. Ana kaya seviyesindeki en büyük ivme, yukarıda açıklanan 3 farklı azalım ilişkisi ile hesaplanan değerler arasında, maksimum olan 0.23 g olarak belirlenmiştir. Borcherdt [76] tarafından önerilen üstel katsayılarla dayalı olarak yer hareketi seviyesi 0.23 g için,  $m_a = 0.21$  değeri hesaplanmıştır. Ana kayadaki kayma dalgası hızı, zemin davranış analizlerinde de uygulandığı şekliyle  $v_0 = 700$  m/sn olarak kabul edilmiştir. Her hücre için eşdeğer kayma dalgası hızına dayalı olarak,

$$F_a = (700/v)^{0.21} \quad (7.2)$$

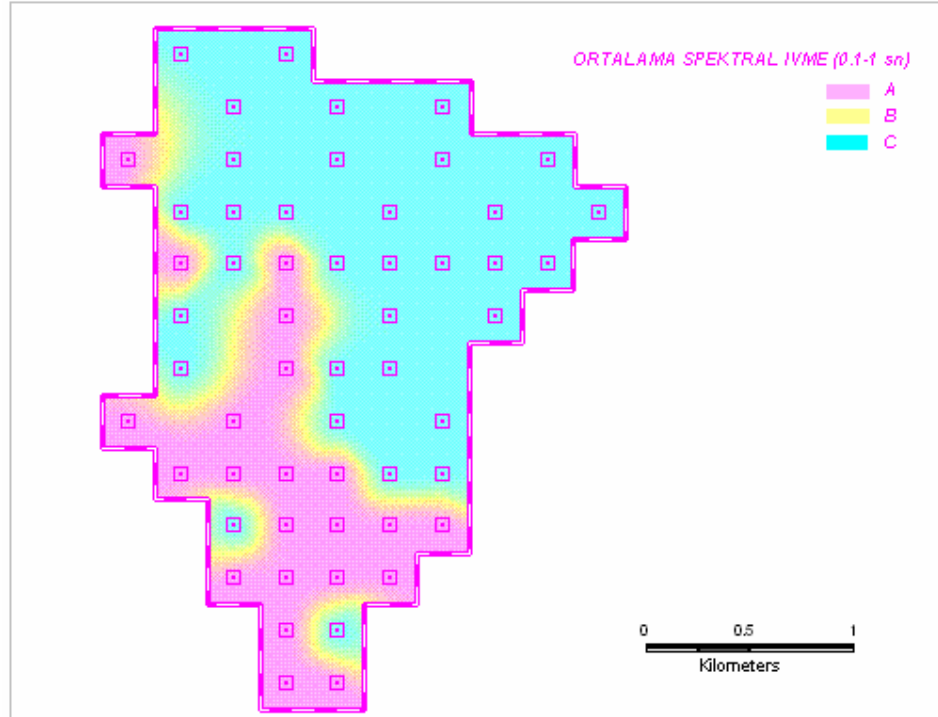
bağıntısı ile hesaplanan büyütme faktörleri, ana kaya seviyesi için yukarıda belirlenen spektral ivme değeri 0.56 g ile çarpılarak, yüzeydeki spektral ivmeler bulunmuştur.

Borcherdt [76] tarafından önerilen ampirik bağıntı ile hesaplanan spektral ivmeler, davranış analizlerine dayalı mikrobölgeleme parametresi için uygulanan yaklaşım doğrultusunda ikiye ayrılarak, çalışma alanları göreceli olarak spektral ivmelerin daha yüksek olduğu A ve daha düşük olduğu C bölgeleri ile tanımlanmıştır (Şekil 7.9-10). Her iki çalışma alanı için haritalanan spektral ivmeler, zemin davranış analizlerine dayalı olarak belirlenen ortalama spektral ivmeler ile karşılaştırıldığında, A ve C ile tanımlanan bölgelerin dağılımında benzerlikler ve tabî ki farklılıklar bulunmaktadır.

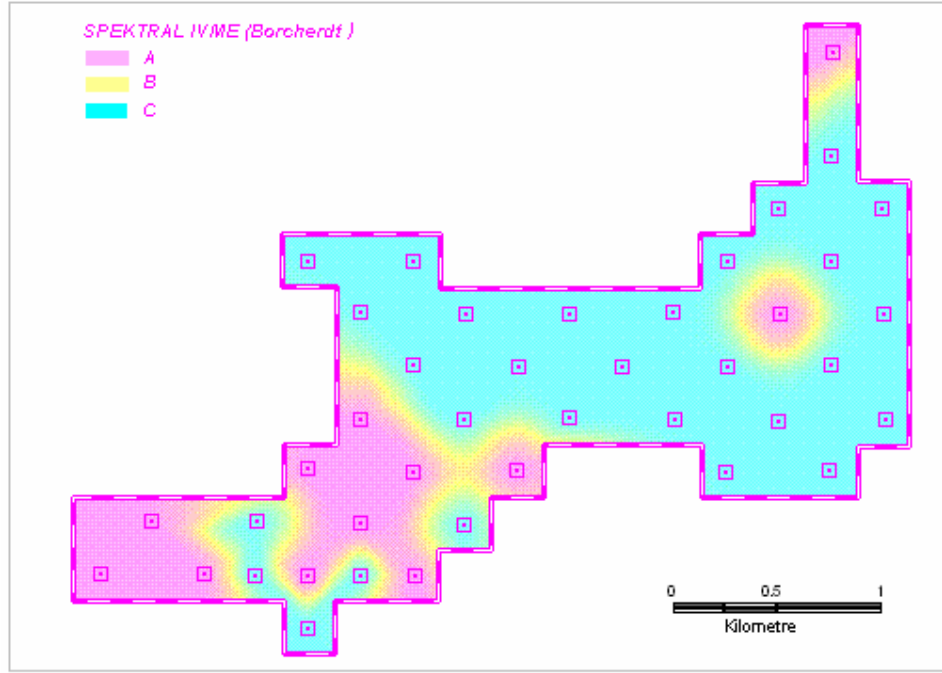
Sonuç mikrobölgeleme haritaları, her iki yaklaşıma dayalı olarak bulunan spektral ivmelerin birlikte kullanılması sonucu, göreceli olarak A, B ve C ile tanımlanan bölgelerden oluşmaktadır (Şekil 7.11-13). Her hücre için iki yaklaşım ile bulunan sonuçların farklı (A ve C) olması durumu, B bölgesi ile tanımlanmıştır. Buna göre yer hareketi seviyesinin en yüksek olduğu bölgeler A, orta derecede olduğu bölgeler B, en düşük olduğu bölgeler C ile temsil edilmektedir.



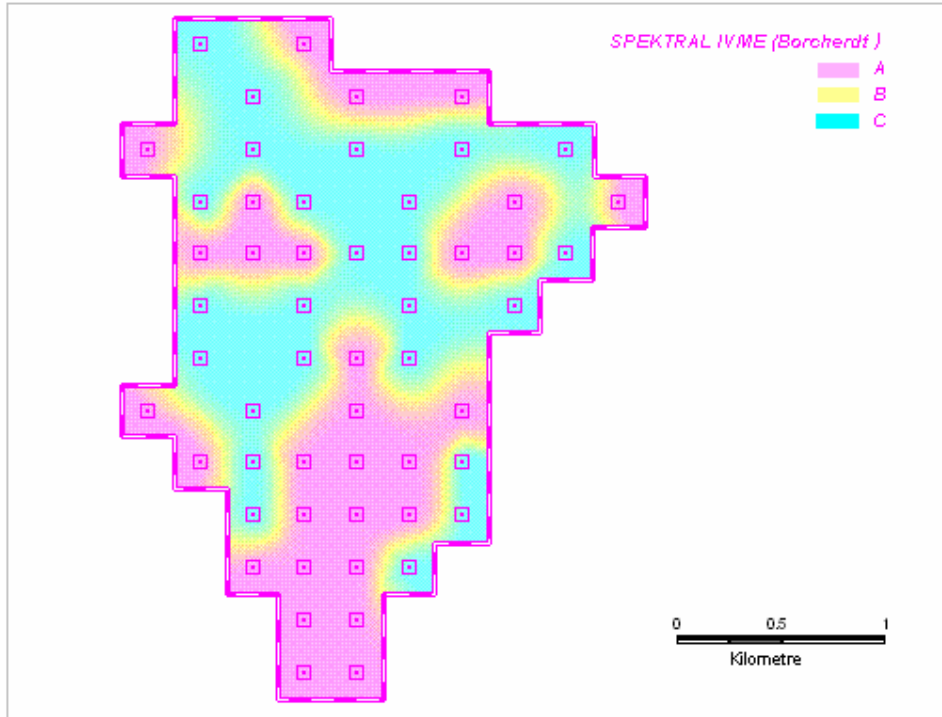
Şekil 7.7 18-02 Bölgesinde zemin davranış analizleri ile belirlenen ortalama spektral ivmelerin değişimi



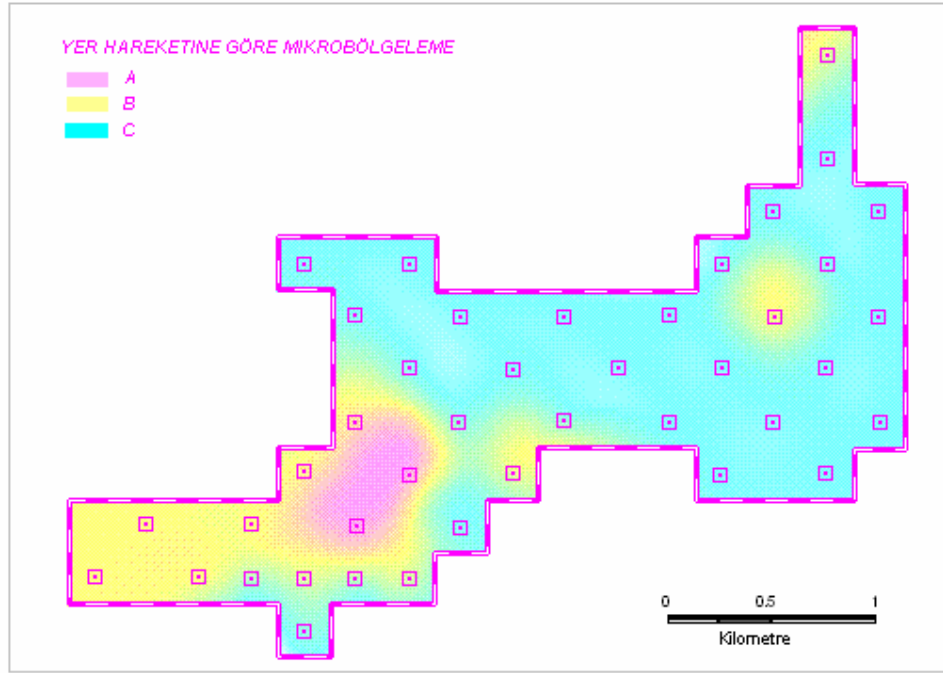
Şekil 7.8 BPH Bölgesinde zemin davranış analizleri ile belirlenen ortalama spektral ivmelerin değişimi



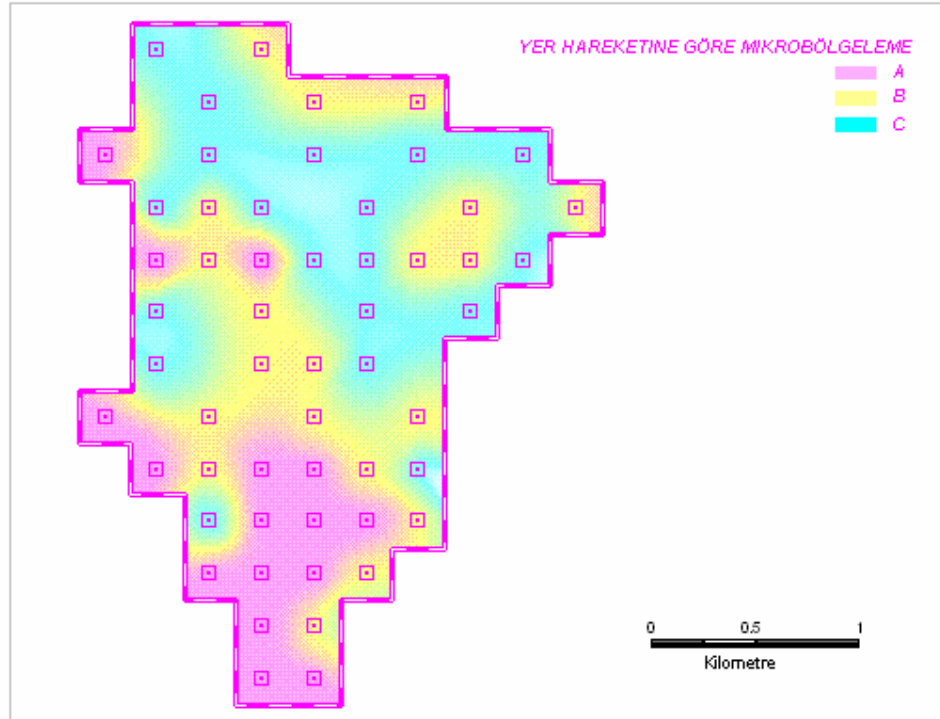
Şekil 7.9 18-02 Bölgesinde eşdeğer kayma dalgası hızlarına dayalı olarak Borcherdt ilişkisi [76] ile belirlenen spektral ivmelerin değişimi



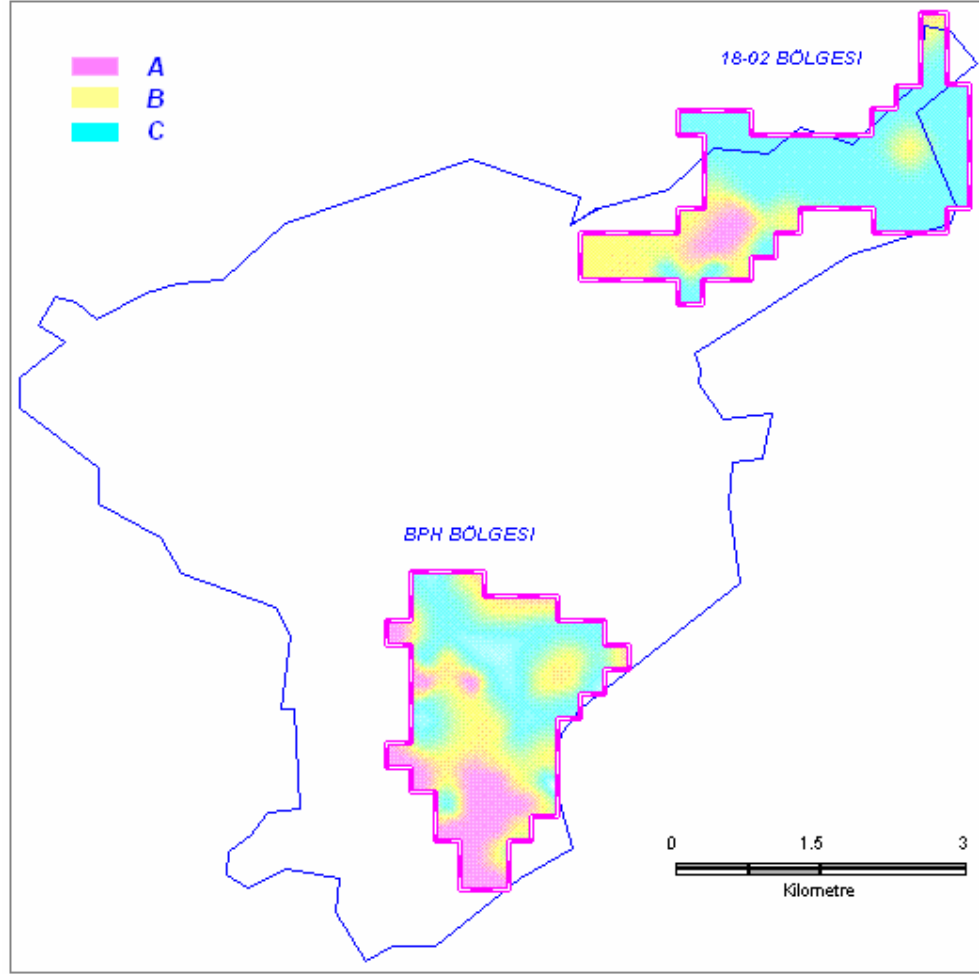
Şekil 7.10 BPH Bölgesinde eşdeğer kayma dalgası hızlarına dayalı olarak Borcherdt ilişkisi [76] ile belirlenen spektral ivmelerin değişimi



Şekil 7.11 18-02 Bölgesinde yer hareketine göre bölgeleme



Şekil 7.12 BPH Bölgesinde yer hareketine göre bölgeleme



Şekil 7.13 Balıkesir yerleşim alanı sınırları içinde yer hareketine göre bölgeleme

### 7.3 Sonuçlar

Tezin kapsamındaki iki büyük çalışma alanı olan 18-02 ve BPH Bölgeleri için, Balıkesir yerleşim alanı sınırlarında belirlenen 250\*250 m boyutlu hücre sisteminde mikrobölgeleme haritaları oluşturulmuştur. Çalışma alanlarında, Türk Deprem Yönetmeliği' ne göre çoğunlukla Z1 ve Z2 sınıfı, NEHRP' e göre C ve D sınıfı zeminler yer almaktadır. Yer hareketine göre mikrobölgeleme, zemin davranış analizleri ve Borchardt [76] ampirik ilişkisi ile hesaplanan spektral ivmelere dayanmaktadır. Haritalama aşamasında spektral ivmelerin sayısal değerleri yerine, Balıkesir yerleşim alanının tamamını göz önüne bir yaklaşımla belirlenen sınır değer için göreceli sonuçlar kullanılmıştır. Yerleşim alanı sınırları içindeki zeminlerin,

NEHRP' e göre B ve D sınıfı arasında değiştiği göz önüne alındığında, referans zemin yüzeyinde 50 yılda % 10 aşılma olasılığı ile hesaplanan 0.2 sn periyotlu spektral ivme için, yönetmelikteki yaklaşım doğrultusunda yüzeydeki spektral ivmeler, 0.56 g ile 0.76 g arasında değişmektedir. Spektral ivmelerdeki bu değişim aralığına ait ortalama 0.66 g değeri, hesaplanan mikrobölgeleme parametrelerine ait sonuçlar için sınır değer kabul edilmiş ve haritalamada göreceli olarak iki farklı alan oluşturulmuştur. Sonuç haritalarda, iki farklı yaklaşım ile hesaplanan spektral ivmelere dayalı olarak belirlenen göreceli sonuçlar birleştirilmiş ve yer hareketi seviyesi 3 farklı bölge ile tanımlanmıştır.

## 8. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, uygulamada gözlenen mikrobölgeleme yöntemlerindeki farklı yaklaşımlar değerlendirilerek, son yıllardaki gelişmeler ile uyumlu ve Balıkesir için uygulanabilecek bir metodoloji geliştirilmiştir. Yöntemin uygulaması yerleşim alanı sınırları içindeki BPH ve 18-02 Bölgesi olarak tanımlanan iki inceleme alanını kapsamaktadır. Çalışmadan elde edilen sonuçların değerlendirilmesine dayalı olarak aşağıda sunulan genel sonuç ve öneriler belirlenmiştir.

Balıkesir yerleşim alanı sınırlarındaki jeolojik yapının ve özelliklerinin değerlendirilmesinde, mevcut rezistivite deney sonuçlarından da yararlanmak istenmiş ve bu aşamadaki değerlendirmelerde, zeminlerin rezistivite değerlerindeki değişimde kil içeriğinin etkili bir parametre olması göz önüne alınmıştır. Bölgedeki farklı tabakaların özellikleri, kalınlıkları ve özellikle ana kaya olarak tanımlanacak seviyenin belirlenmesi amacını taşıyan değerlendirmelerde, düşey elektrik sondajı sonuçlarına dayalı rezistivitelerin, kil içeriğine dayalı olarak belirlenen kriterler doğrultusunda jeolojik veri ile uyumlu olduğu düşünülebilir. Ancak mikrobölgeleme çalışmaları için yukarıda açıklanan amaçlar doğrultusunda zemin tabakalarının rezistivitelerinin, jeolojik veriye dayalı olarak bile yeterli ve güvenli bilgi sağlamadığı görülmüştür.

İnceleme alanlarında mevcut veri dağılımı ile uyumlu olarak belirlenen boyutlardaki hücreler için, temsili zemin profillerinin modellenmesindeki kriterler, iki farklı kaynaktan derlenen geoteknik verilerin birlikte yorumlanmasına dayalı bir yaklaşım ile belirlenmiştir. Kaynaklardan biri ortalama 15 m derinlik için sondaj ve SPT deneylerinden, diğeri ise ortalama 7 m derinlik için zemin tabakalarının çok sayıda laboratuvar deneyi ile tanımlandığı sondajlardan oluşmaktadır. Ayrıca her bölgede iki adet olmak üzere 30 metre derinliğinde sondaj bulunmaktadır. Bu veri tabanına dayalı olarak, bölgedeki zemin grupları ve dinamik davranış modellerinin,

kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler arasında plastisite indisine dayalı kademeli bir geçiş ile temsil edilmesinin uygun olacağı saptanmıştır. Ancak, bölgedeki zemin tabakalaşmasının ve bu tabakaları oluşturan zeminlerin tekrarlı gerilmeler altındaki davranışlarının belirlenmesinde, kullanılan mevcut verinin bir mikrobölgeleme çalışması için gerekli hassaslıkta ve kapsamda olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu aşamada, mikrobölgeleme çalışmaları için yerel geoteknik şartların gerçekçi bir şekilde temsil edilmesinde, arazi ve laboratuvar deneylerinin en azından 30 m derinliğe kadar yapılmasının gerekli olduğu belirtilebilir.

Balıkesir yerleşim alanı sınırlarında olasılıksal olarak belirlenmiş tasarım depremi için referans zemin yüzeyinde üretilen ivme kayıtları, bölgesel olarak uyumlu olabilecek ancak farklı veri tabanı ve fay tipi parametrelerine sahip azalım ilişkilerine dayanmaktadır. RASCAL ile yapılan bu simülasyonlarda aynı zamanda kullanılan azalım ilişkileri ile uyumlu, Türkiye’den seçilen gerçek yer hareketi kayıtları kullanılmıştır. Simülasyonlarda farklı azalım ilişkilerine dayalı hedef spektrumlar ile kullanılan gerçek yer hareketi kayıtlarının karşılıklı etkileşimi sonucu, üretilen kayıtların spektrumları ile hedef spektrum arasındaki uyumun değiştiği görülmektedir. Diğer taraftan RASCAL programı ile bölgesel olarak kaynak ve yol parametrelerine (gerilme farkı, kalite faktörü sabiti), ait değişkenlikte göz önüne alınmış ve bu parametrelerdeki değişimin üretilen kayıtlara ait spektral ivmeler üzerindeki etkisinin düşük olduğu gözlenmiştir. Depremler nedeniyle oluşan yer hareketinin deprem kaynak özellikleri, sismik dalgaların geçtiği ortam ve yüzeydeki zemin tabakaları nedeniyle oldukça karmaşık olduğu bilinmektedir. Balıkesir’de referans zemin şartları için RASCAL ile üretilen kayıtlarda ise, bölgesel olarak uyumlu farklı azalım ilişkilerinin, farklı yer hareketi kayıtlarının ve parametrik çalışma sonuçlarına göre güvenli tarafta kalacak şekilde seçilmiş gerilme farkı ve kalite faktörü sabitinin kullanımı ile deprem kaynak ve yol özelliklerine bağlı değişkenlik göz önüne alınabilmektedir. Bu kayıtlar ile 5 temsili zemin profili için yapılan davranış analizlerinde, her bir hedef spektrum için hesaplanan ortalama spektral ivmelere ait maksimum değerler, yerel zemin şartlarına dayalı olarak değişmektedir. Bu durum, simülasyon aşamasındaki hedef spektrum için seçilen azalım ilişkisinin, yüzeydeki yer hareketini de etkilediğini göstermektedir. Bu doğrultuda yer hareketi simülasyonunda, bölgesel jeolojik ve tektonik koşullarla



uyumlu farklı azalım ilişkilerinin kullanılmasının, deprem ve zemin özelliklerinin karşılıklı etkileşimine dayalı değişkenliğin yansıtılmasında faydalı olduğu düşünülebilir.

RASCAL ile üretilen yer hareketi kayıtları, aynı hedef spektrumlar için TARSCTHS programı ve aynı gerçek yer hareketi kayıtları için maksimum ivme ölçekleme yöntemi ile elde edilen kayıtlarla karşılaştırıldığında, yer hareketi parametrelerindeki değişimler cinsinden, RASCAL ve maksimum ivme ölçekleme yöntemlerinin daha benzer sonuçlar gösterdiği söylenebilir. Ancak davranış spektrumu cinsinden bu iki yöntemle üretilen kayıtlar için, ölçekleme yönteminde saçılımın yüksek olduğu gözlenmektedir. Benzer şekilde, kayıtların farklı zemin profillerinin davranış analizlerinde kullanılması durumunda, RASCAL ile üretilen kayıtlar yüzeydeki spektral davranışın belirsizlik seviyesini düşürmektedir. TARSCTHS ile üretilen kayıtların kullanılması durumunda ise davranış analizleri sonuçlarının güvensiz tarafta kaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, meydana gelebilecek bir depremin özelliklerinin belirlenmesi konusunda kapsamlı çalışmaların yapılması gereğini ve özellikle üretilen kayıtlar için kullanılan yöntemlerin ve yaklaşımların önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamındaki değerlendirmelere dayalı olarak güvenilir yer hareketi parametrelerinin elde edilmesi için referans zemin yüzeyindeki yer hareketinin üretilmesinde RASCAL programının kullanımı önerilmektedir.

İnceleme alanlarındaki temsili profillerin, RASCAL ile üretilen kayıtlara dayalı zemin davranış analizleri sonucunda, her hücre için hesaplanan 0.1-1 sn periyot aralığındaki ortalama spektral ivmelerin, ivme spektrum şiddeti ve ortalama spektrumlara ait maksimum spektral ivmeler ile yüksek korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Maksimum spektral ivmeler yer hareketine ait tek bir karakteristiği, ivme spektrum şiddeti ise büyüklük ve frekans içeriği olmak üzere iki karakteristiği yansıtmaktadır. 0.1-1 sn periyot aralığındaki ortalama spektral ivmelerin de birden fazla yer hareketi karakteristiğini yansıtması açısından mikrobölgeleme için uygun bir parametre olduğu düşünülmektedir.

Her hücredeki ortalama spektrumlar için, NEHRP kriterlerinin sağlandığı bir optimizasyon yaklaşımına dayalı olarak belirlenen tasarım spektrumu parametreleri (0.2 sn ve 1 sn periyotlu spektral ivmeler), aynı tehlike seviyesi için NEHRP' e göre bulunan spektral ivmeler ile karşılaştırıldığında, genel olarak NEHRP prosedürüne göre belirlenen değerlerin üzerinde olduğu ve özellikle D grubu zeminler için saçılımın daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuçların, NEHRP prosedürünün yer hareketi şiddeti ve zemin özellikleri arasındaki etkileşimi göz önüne almasına karşılık, yer hareketine ait diğer karakteristiklerin özellikle frekans içeriğinin etkisini kapsamıyor olması nedeniyle doğal olduğu düşünülmektedir. Özellikle D grubu zeminler için yer hareketi özellikleri ile zemin özellikleri arasındaki etkileşimin neden olduğu değişkenliğin daha yüksek olduğu belirtilebilir.

İnceleme alanlarında, RASCAL ve ölçekleme yöntemi ile elde edilen kayıtlara dayalı olarak yüzeyde hesaplanan maksimum ivme, Arias şiddeti ve 0.2 sn periyotlu spektral ivmeler için frekans dağılımlarına dayalı karşılaştırmalar, üretilen kayıtlar için kullanılan yöntemlerin etkisini bir kez daha vurgulamaktadır. RASCAL ile üretilen kayıtların kullanılması durumunda, yüzeydeki maksimum ivme ve 0.2 sn periyotlu spektral ivme frekans dağılımlarının, normalize standart sapması daha düşük normal bir dağılım gösterdiği, diğer taraftan Arias şiddeti frekans dağılımlarında, normalize standart sapmaların ölçekleme yöntemi ile üretilen kayıtlar için daha düşük olduğu görülmektedir.

Her hücre için teorik (0.1-1 sn periyot aralığındaki ortalama spektral ivme) ve ampirik (Borcherdt [76]) olarak belirlenen spektral ivmeler, Balıkesir yerleşim alanı içinde NEHRP' e göre değişen spektral ivme aralığı göz önüne alınarak yorumlanmış ve yer hareketine göre mikrobölgeleme parametresi için birleştirilmiştir. Bu yaklaşım doğrultusunda inceleme alanlarındaki mikrobölgeleme haritaları, Balıkesir yerleşim alanının tamamı için geçerli olan göreceli sonuçları yansıtmaktadır.

Sonuç olarak Balıkesir' deki inceleme alanları için uygulanan bu mikrobölgeleme yönteminde, yerel geoteknik koşulların tanımlanmasında veri tabanı istenen hassaslıkta olmamasına karşılık, bölgede meydana gelebilecek bir depremin neden olacağı yer hareketinin özellikleri konusunda oldukça kapsamlı bir çalışma

yapılmış ve bu çalışmalarla, deprem ve zemin özelliklerinin karşılıklı etkileşiminden kaynaklanan değişkenliğin istatistiksel olarak değerlendirilmesinin gereği ortaya konmuştur.

## KAYNAKLAR

- [1] Balıkesir Belediyesi, Bahçelievler, Plevne, Hasan Basri Çantay, Akıncılar Mahalleleri ve 18-02 Konut Bölgelerinin Temel ve Zemin Araştırması Etüd Raporları, (2000).
- [2] Balıkesir Belediyesi 1802 nolu İmar Sahasının İmar Planlarına Esas Jeolojik Etüd Raporu, MTA, Kuzey Batı Anadolu Bölge Müdürlüğü, Balıkesir, (1999).
- [3] Derin Su Sondajı Logları, DSİ, Balıkesir Bölge Müdürlüğü
- [4] Silva W., RASCAL, Response Spectrum and Accelerogram Scaling Manual, (1987)
- [5] TARSCETHS (Target Acceleration Spectra Compatible Time Histories ) Version1.0
- [6] Idriss, I. M., Sun, J.I., “ SHAKE 91-A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits, (1992)
- [7] NEHRP 2000 Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, (Fema 369), (2000)
- [8]Belediyeler için Sismik Mikrobölgeleme, World İnstitute for Disaster Risk Management (DRM), Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, (2004).
- [9] Ansal, A., Biro, Y., Erken, A., Gülerce, Ü., Özçimen, N., "Seismic zonation in Istanbul: A case study" Geotechnical Earthquake Engineering and Microzonation Seminar, İstanbul, (2001).
- [10] Finn, W.,D., L. and Ventura, C., E., “Challenging issues in local microzonation”, 5 th International Conference on Seismic Zonation, Nice, France, (1995).
- [11] Ansal, A., Springman, S., Studer, J., Demirbaş, E., Önalp, A., Erdik, M., Gardini, D., Şeşetyan, K., Demircioğlu, M., Akman, H., Fah, D., Christen, A., Laue, J., Buchheister, J., Çetin., Ö, Siyahi, B., Fahjan, Y., Gülkan, P., Bakır, S., Lestuzzi, P., Elmas, M., Köksal, D., Gökçe, O., “Adapazarı ve Gölcük için Mikrobölgeleme çalışmaları”, 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, (2003).

- [12] Marcellini, A., Slejko, D., "State of the art of seismic hazard and microzonation in Italy", 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, (1995).
- [13] Ansal, A., Marcellini, A., "Variability of source and site factors in seismic factors in seismic microzonation, state-of-the-art report", Proc. Of 11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, (1998).
- [14] Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards, Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMFE, (1993).
- [15] Meneroud, J., P., "Seismic zonation problems", 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, (1995).
- [16] Kramer, S.L., Geotechnical Earthquake Engineering, ed. William J. H., Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, New Jersey, USA, (1996).
- [17] Okur, V., Ansal, A., "Dynamic characteristics of clays under irregular cyclic loading", XV ICSMGE TC4 Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes" İstanbul, Turkey, (2001).
- [18] Ansal, A., İyisan, R., Yıldırım, H., "The Cyclic Behaviour of Soils and Effects of Geotechnical Factors in Microzonation" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2001), **21**, p.444.
- [19] Raptakis, D., Makra, K., Anastasiadis, A., and Pitilakis, K., "Complex Site Effects in Thessaloniki (Greece): I. Soil Structure and Comparison of Observations with 1D Analysis", *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2004), **2**, p.271.
- [20] Makra, K., Chavez-Garcia, F.J., Raptakis, D., Pitilakis, K., "Parametric analysis of the seismic response of a 2D sedimentary valley: implications for code implementations of complex site effects", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2005), **25**, p.303
- [21] Seed, H. B., R. Murarka, J. Lysmer, and I. M. Idriss. "Relationships Between Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source and Local Site Conditions for Moderately Strong Earthquakes." *Bulletin of the Seismological Society of America*, (1976), 66 (4), p.1323-1342.
- [22] Idriss, I. M.. "Response of Soft Soil Sites During Earthquakes." In *Proceedings of the Symposium to Honor Professor H. B. Seed*, Berkeley, (1990).
- [23] Idriss, I. M.. "Influence of Local Site Conditions on Earthquake Ground Motions." In *Proceedings of the 4<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, (1990), 1, p. 55-57.
- [24] Rodriguez-Marek, A., Bray, J.D., Abrahamson, N.A., "An empirical Geotechnical seismic site response procedure" *Earthquake Spectra*, (2001).

- [25] Hays W.W., "Site Amplification of Earthquake Ground Motion", *Third U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Charleston, South Carolina, (1986), 1, p.357-368.
- [26] Seed, H. B., M. P. Romo, J. I. Sun, A. Jaime, and J. Lysmer.. "The Mexico Earthquake of September 19, 1985--Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions." *Earthquake Spectra*. (1988), 4(4), p.687-729.
- [27] Seed, R., S. E. Dickenson, M. F. Riemer, J. D. Bray, N. Sitar, J. K. Mitchell, I. M. Idriss, R. E. Kayen, A. Kropp, L. F. Harder Jr., and M. S. Power.. "Preliminary Report on the Principal Geotechnical Aspects of the October 17, 1989, Loma Prieta Earthquake". Report UCB/EERC-90/05. Berkeley, California: EERC. (1990).
- [28] Trifunac, M. D., "Nonlinear soil response as a natural passive isolation mechanism. Paper II. The 1933, Long Beach, California earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2003), **23**, p.549.
- [29] Trifunac, M. D., Todorovska, M. I., "1971 San Fernando and 1994 Northridge, California, earthquakes: did the zones with severely damaged buildings reoccur?", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2004), **24**, p.225.
- [30] Pitilakis, K., "Site effects", Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation, ed. by A. Ansal, (2004), Kluwer Academic Publishers, p.139.
- [31] Zare, M., Bardy, D.Y., Ghafory-Ashtany, M., "Site Characterizations for the Iranian strong Motion Network" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (1996), **18**, p.101.
- [32] Yamazaki, F., Wakamatsu, K., Onishi, J., Shabestari, K., T., "Relationship between geomorphological land classification and site amplification ratio based on JMA strong motion records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2000), **19**, p.41.
- [33] Ovanda-Shelley, E., Alcantara, L., Romo, M.P., "Soil Properties and Dynamic Response in the City of Puebla During the 15 June 1999 earthquake" XV ICSMGE TC4 Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes" Istanbul, Turkey, (2001).
- [34] ElGamal, A., Zeghal, M., Parra, E., Gunturi, R., Tang, H.T., Stepp, J.C., "Identification and Modelling of Earthquake Ground Response- I. Site Amplification" *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, (1996), **15**, p.499.
- [35] Trifunac, D., Todorovska, M. I., "Long period microtremors, microseisms and earthquake damage: Northridge, CA, earthquake of 17 January 1994", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, (2000), **19**, p.253.

- [36] Ansal, A., Erdik, M., Kurtuluş, A., Erken, A., Şeşetyan, K., Siyahi B., “Microzonation for Earthquake Risk Mitigation Part E. State-of-the Art Report Review of Current Literature on Seismic Microzonation”, Project Merm, Department of Earthquake Engineering Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute Boğaziçi University İstanbul, Turkey, (2002).
- [37] Borchardt, R.D., “Effects of Local Geology on The Ground Motion Near San Francisco Bay”, BSSA, (1970), (60), p.29-61.
- [38] Nakamura Y., “A Method for Dynamic Characteristic Estimation of Subsurface Using Microtremors on The Ground Surface”, Q Rev RTRI 1989, 30(1), p.25-33.
- [39] Jimenez, M. J., Garcia-Fernandez, M., Zona, G., Cella, F. “Mapping soil effects in Barcelona, Spain, through an integrated GIS environment”, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, (2000), **19**, p.289
- [40] Panou, A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P., Stylianidis, K., Papazachos, C. B., “Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment: the case of the city of Thessaloniki (Northern Greece)”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2005), Vol.25, pp.261–274
- [41] İyisan, R., Ansal, A., Kaya, N., "Sismik ve Mikrotremor Deney sonuçlarının Karşılaştırılması" Dördüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, ODTU, Ankara, (1997).
- [42] Teves-Costra, O., Matias, L. and Bard, P.Y., "Seismic Behaviour Estimation of Thin Alluvium Layers Using Microtremor Recordings" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (1996), **15**, p.201.
- [43] Yamazaki, F., Katayama, T., "Soil Amplification Based on Seismometer Array and Microtremor Observations in Chiba, Japan" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (1992), **21**, p.95.
- [44] Rodriguez, V., H., S., Midorikawa, S., “Applicability of the H/V spectral ratio of microtremors in assessing site effects on seismic motion”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (2002), **31**, p.261
- [45] Schenkova, Z., Zahradnik, J., "Interpretation of the Microtremor Spectra at the Zafarraya Basin, Southern Spain" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (1994), **15**, p.69.
- [46] Apostolidis, P., Raptakis, D., Roumelioti, Z., Pitilakis, K., “Determination of S-wave velocity structure using microtremors and spac method applied in Thessaloniki (Greece)”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2004), **24**, p.49.

- [47] Midorikawa, S., “Prediction of Isoseismal Map İn Kanto Plain due to Hypothetical Earthquake”, *Journal of Structural Dynamics*, (1987), 33, p.43-48.
- [48] Ansal, A., Özaydın, K., Erdik, M., Yıldırım, H., Kılıç, H., Adatepe, Ş., Özener, P.T., Tonaroğlu, M., Şeşetyan, K., Demircioğlu, M., “Seismic Microzonation for urban planning and vulnerability assessment”, Kobe, (2005).
- [49] Ansal, A., Biro, Y., Erken, A., Gülerce, Ü., “Seismic Microzonation: a case study”, *Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation*, ed. by A. Ansal, (2004), Kluwer Academic Publishers, p.253.
- [50] NEHRP 2003 Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, (Fema 450), (2003).
- [51] Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance, prEN1998-1, Draft 4, (2001).
- [52] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Türkiye, (1998)
- [53] Heuze, F. E., Ueng, T. S., Hutchings, L.J., Jarpe, S.P., Kasameyer, P. W., “A coupled seismic-geotechnical approach to site-specific strong motion”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (1997), **16**, p.259.
- [54] Moinfar, A.A., Naderzadeh, A., Naiieri, A., “Development of scenario earthquakes for the seismic microzoning of Tehran”, 12 th European Conference on Earthquake Engineering, Londra, (2002), pr.204.
- [55] Sinadinovski, C., McCue, K., F., Sommerville, M., “Characteristics of strong ground motion for typical Australian intra-plate earthquakes and their relationship with the recommended response spectra”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2000), **20**, p.101.
- [56] Özaydın, K., “Yer hareketleri üzerinde yerel zemin koşullarının etkisi ve zemin büyütmesi”, Türkiye Deprem Vakfı-TDV/TR 96-003, (1996).
- [57] Raptakis, D., Chavez-Garcia, F.J., Makra, K. & Pitilakis, K. “Site Effects at Euroseistest-I. Determination of The Valley Structure and Confrontation of Observations with 1D Analysis”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2000), **19**, p.1.
- [58] Chavez-Garcia, F.J., Raptakis, D., Makra, K. & Pitilakis, K. “Site Effects at Euroseistest-II. Results from 2D numerical modeling and comparison with observations”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2000), **19**, p.23.



- [59] Calosi, E., Ferini, M., Cancelli, A., Foti, S., Lo Presti, D., Pallara, O., Avanzi, G.D., Pochini, A., Puccinelli, A., Luzi, L., Rinone, M., Signanini, P., "Geological and geotechnical investigations for the seismic response analysis at Castelnuova Garfagnana in Central Italy", XV ICSMGE TC4 Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes" Istanbul, Turkey, (2001).
- [60] Ferrini, M., Petrini, V., Lo Presti, D., Puci, I., Luzi, L., Pergalani, F., Signanini, P., "Numerical Modelling for the Evaluation of Seismic Response at Castelnuovo Garfagnana in Central Italy XV ICSMGE TC4 Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes" Istanbul, Turkey, (2001).
- [61] Gazetas, G., "The 1999 Parnitha (Athens) Earthquake: soil Effects on Distribution of Damage" XV ICSMGE TC4 Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes" Istanbul, Turkey, (2001).
- [62] Tezcan, S.,S., Kaya, E., Bal, İ.,E., Özdemir, Z., "Seismic amplification at Avcılar, İstanbul", *Engineering Structures*, (2002), **24**, p.661.
- [63] Erdik, M., Durukal, E., Siyahi, B., Fahjan, Y., Şeşetyan, K., Demircioğlu, M., Akman, H., "Depreme dayanıklı yapı tasarımında deprem yer hareketinin belirlenmesi", 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, (2003).
- [64] Panza, G.F., Vaccari, F., Costa, G., Suhadolc, P., Fah, D., "Seismic input modelling for zoning and microzoning", *Earthquake Spectra*, (1996), **12**, p.529.
- [65] Alvarez, L., Vaccari, F., Panza, G., F., Pico, R., "Seismic microzoning from synthetic ground motion parameters: case study, Santiago de Cuba", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2005), **25**, p.383.
- [66] Lokmer, I., Herak, M., Panza, G.F., Vaccari F., "Amplification of strong ground motion in the city of Zagreb, Croatia, estimated by computation of synthetic seismograms", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2002), **22**, p.105.
- [67] Erdik, M., Durukal, E., "A hybrid procedure for the assessment of design basis earthquake ground motions for near-fault condition", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2001), **21**, p.431.
- [68] Ansal A., Slejko, D., "The long and winding road from earthquakes to damage" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2001), **21**, p.369.
- [69] İzmir Deprem Senaryosu, <http://www.koeri.boun.edu.tr>
- [70] Bommer, J.J., Scott, S.G., Sarma, S.K., "Hazard-Consistent Earthquake Scenarios", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2000), **19**, p.219.
- [71] McGuire, R.K., "Deterministic ve probabilistic earthquake hazards and risks" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2001), **21**, p.377.

- [72] Marcellini, A., Daminelli, R., Franceschina, G., Pagani, M., "Regional and local seismic hazard assesment" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2001), **21**, p.415.
- [73] Fah, D., Kind, F., Lang, K., Giardini, D., "Earthquake scenarios for the city of Basel" *Soil Dynamics and Earthquake engineering*, (2001), **21**, p.405.
- [74] Todd, D., Harris J.R., "De facto Microzonation Through The Use of Soils Factors in Design Triggers", 5.th International Conference on Seismic Zonation, Nice, France, (1995).
- [75] Hamburger, R., O., "Application and Impacts of Seismic Zonation" Earthquake Engineering Abstracts, [www.nisee.berkeley.edu](http://www.nisee.berkeley.edu), (2000).
- [76] Borchardt, R.D., "Estimates of Site Dependent Response Spectra for Design Methodology and Justification" *Earthquake Spectra*, (1994), **11**, p.173.
- [77] Hwang, H.M., Lin, H. and Huo, J., "Site Coefficients for Dizayn of Buildings in Eastern United States" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (1997), **16**, p.29.
- [78] Rathje, E.M., Lauro, F.J., "Incorporating frequency content into simplified site response procedures", XV ICSMGE TC4 Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes", İstanbul, Turkey, (2001).
- [79] Lermo, J., Chavez-Garcia, F.J., "Site Effect Avaluation at Mexico city: Dominant Period and Relative Amplification form Strong Motion and Microtremor Records", *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, (1994), **13**, p.413.
- [80] Gaull, B.A., Kagami, H., Taniguchi, H., "The microzonation of Perth, Western Australia, Using Microtremor Spectral Ratios", *Earthquake Spectra*, (1995), **11**.
- [81] Gitterman, Y., Zaslavsky, Y., Shapira, A. and Shtivelman, V., "Emprical Site Response Evaluations: Case Studies in Israel", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (1996), **15**, p.447.
- [82] Chavez-Garcia, F.J., Cuenca, J., "Site effects in Mexico City Urban Zone, A Complemantary Study", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (1996), **15**, p.141.
- [83] Romdhane, M. B., Mecher, P., Duval, A. M., Meneround J. P., Vidal, S. "Microzoning the city of Tunis by recording background noise", 11 th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, (1998)
- [84] Vagn H. J., "Seismic microzonation in Australia", *Journal of Asian Earth Sciences*, (2000), **18**, p.3.

- [85] Rocabado, V., Schmits, M., Gonzalez, J., Audemard, F., Andrade, L., Vilorio, A., Rojas, R., Enomoto, T., Abeki N. and Delgado, J., "Seismic Microzoning Study in Barquisimeto Venezuela", 12 th European Conference on Earthquake Engineering, Londra, (2002), p.815.
- [86] Schmitz, M., Enomoto, T., Ampuero, J.P., Rocabado, V., Kantak, P., Sanchez, J., Rendom, H., Gonzalez, J., Abeki, N., Villotte, J.P., Navorro M. and Delgado, J., "Seismic Microzoning Study in Chacao District, Caracas, Venezueela", 12 th European Conference on Earthquake Engineering, Londra, (2002), p.808.
- [87] Trifunac D., Todorovska, M. I., "Nonlinear soil response as a natural passive isolation mechanism- the 1994 Northridge, California, earthquake", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, (1998), **17**, p.41.
- [88] Lungu, D., Aldea, A., Nedelcu C., Cornea, T. "Use of the GIS technology for microzonation of frequency content and effective peak values of soil response to earthquakes", 11 th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, (1998).
- [89] Lav, A., "İstanbul ve Erzincan Şehirlerinde Zemin Büyütme Etkilerine göre Mikrobölgeleme", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1994).
- [90] Pergalani, F., Romeo, R., Luzi, L., Petrini, V., Pugliese, A., Sano, T. "Seismic Microzoning of the Area Struck by Umbria-Marche (Central Hally) Ms. 5.9 Earthquake of 26 September 1997", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, , (1999), **18**, p.279.
- [91] Güllü, H., "Dınarın zemin büyütmelerine göre coğrafik bilgi sistemleri ile Mikrobölgelemesi", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2000).
- [92] Ojedai, A., Martinez, S., Bermudez, M., Atakan, K. "The new accelerograph network for Santa Fe De Bogota, Colombia and implications for microzonation", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, (2002)
- [93] Akyol, N., Akıncı, A., Eyidoğan, H., "Site-specific hazard evaluation for the Bursa City, Northwestern Turkey" XV ICSMGE TC4 Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes" İstanbul, Turkey, (2001).
- [94] Wen, Y.K., Wu, C.L., "Uniform Hazard Ground Motions for Mid-America Cities", *Earthquake Spectra*, (2001), **17**, No.2
- [95] Loh, C.H. and Tsay, C.Y., "Responses of the Earthquake Engineering Research Community to the Chi-Chi (Taiwan) Earthquake", *Earthquake Spectra*, (2001), **17**, p.635.

- [96] Marcellini, D., Raminelli, M., Pagani, F., Riva, A., Tento, T., Crespallani, C., Madiari, G., Vannucchi, G., Frassinetti, L., Martelli, D. Palumbo & G. Viel, “Seismic microzonation of some Municipalities of the Rubicone area (Emilia- Romagna region)”, 11 th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, (1998).
- [97] Muson, R.M.W., Henni, P.H.O., “Methodological considerations of probabilistic seismic hazard mapping”, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, (2001), **21**, p.385.
- [98] Marinos, P., Bouckovalas, G., Tsiambaos, G., Sabatakakis, N., Antoniou, A. “Ground zoning against seismic hazard in Athens, Greece”, *Engineering Geology*, (2001), **62**, p.343.
- [99] Pitilakis, K., D., “Seismic microzonation practice in Greece: A critical review of some important factors”, 10 th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, (1995).
- [100] Karim, K.,R., and Yamazaki, F., “ Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (2002), **31**, p.1191.
- [101] Marzorati, S., Luzi, L., Petrini, V., Meroni, F., Pergalani, F., “Detection of local site effects through the estimation of building damages”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2003), **23**, p.497.
- [102] Pergalani, F., Compagnoni, M., Petrini, V., “Evaluation of site effects in some localities of ‘Alta Val Tiberina Umbra’ (Italy) by numerical analysis”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2003), p.85.
- [103] Todorovska M. I., Trifunac, M. D., “Hazard mapping of normalized peak strain in soils during earthquakes: microzonation of a metropolitan area”, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, (1996), **15**, p.321.
- [104] [www.geop.ubc.ca/ubcgif/](http://www.geop.ubc.ca/ubcgif/) (The UBC Geophysical Inversion Facility)
- [105] [www.geop.itu.edu.tr/~jeotermal/jeoelek.html](http://www.geop.itu.edu.tr/~jeotermal/jeoelek.html) (Jeoelektrik Yöntemler, Prof. Dr. İlyas Çağlar,2002)
- [106] [www.mines.edu/fs-home/tboyd/GP311](http://www.mines.edu/fs-home/tboyd/GP311) (Introduction to Geophysical Exploration, Thomas M. Boyd)
- [107] [www.sfu.ca](http://www.sfu.ca) (An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John M Reynolds)
- [108] Arulmoli, K., Arulanandan, K., Seed, H.B., “New Method for Evaluating Liquefaction Potential”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1985, vol.3, no.1, p.95-114

- [109] Yoon, G.L, Park, J.B. "Sensitivity of Leachate and Fine Content on Electrical Resistivity Variations of Sandy Soils", *Journal of Hazardous Materials*, 2001, **84**/2-3, p.147.
- [110] <http://ok.water.usgs.gov/norlan/dcre Resist.html> DC Resistivity Sounding: Data and Images
- [111] Gautam, P., Raj Pant, S., Ando, H. "Mapping of subsurface karst structure with gamma ray and electrical resistivity profiles: a case study from Pokhara valley, central Nepal" *Journal of Applied Geophysics*, (2000), **45**, p.97.
- [112] Beresnev, I. A., Hruby, C. E., Davis, C. A., "The use of multi-electrode resistivity imaging in gravel prospecting" *Journal of Applied Geophysics*, (2002), **49**/4, p.245.
- [113] Nowroozi A.A., Whittecar, G. R., Daniel, J. C. " Estimating the yield of crushable stone in an alluvial fan deposit by electrical resistivity methods near Stuarts Draft, Virginia" *Journal of Applied Geophysics*, (1997), **38**, p.25.
- [114] Pitilakis, K., Raptakis, D., Lontzetidis, K., Tika-Vassilikou, Th. & Jongmans, D. "Geotechnical and Geophysical Description of Euro-Seistest, Using Field, Laboratory Tests, and Moderate Strong Motion Recordings", *Journal of Earthquake Engineering*, (1999), **3**/3, p.381.
- [115] Khaled, A., , Jun, K., Ryoji, I., "Estimation of Uncertainties in The Dynamic Response of Urban Soils in Japon", Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 1996, p.736
- [116] Destegül, U., "Sensitivity Analysis of Soil Site Response Modelling in Seismic Microzonation for Latitpur, Nepal" Thesis of Master of Science, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, The Netherlands, (2004)
- [117] Vucetic, M. and Dobry, R. "Effect of soil plasticity on cyclic response," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, (1991), Vol. 117, No. 1, p. 89-107.
- [118] Sun, J.I., Golesorkhi, R., and Seed, H.B. "Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils," *Report No. EERC-88/15*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, (1988).
- [119] Ishibashi, I. and Zhang, X. "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay," *Soils and Foundations*, (1993), Vol. 33, No. 1, p. 182-191.
- [120] Seed, H.B. and Idriss, I.M. "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses," *Report No. EERC 70-10*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, (1970).

- [121] Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K., “Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils” *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, (1986), Vol. 112, No. 11, p. 1016-1032.
- [122] Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B. “ SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites”, *Report No. UCB/EERC-72/12*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, (1972).
- [123] Schneider, J.A., Hoyos, L., Jr., Mayne, P.W., Macari, E.J., and Rix, G.J., “Field and Laboratory Measurements Of Dynamic Shear Modulus of Piedmont Residual Soils”, GSP 92, ASCE, Reston, VA, (1999), pp.12-25
- [124] Okur,V., Ansal,A. “Dynamic Characteristics of Clays under Irregular Cyclic Loading” Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference, (2001), p.267-270
- [125] Seed, R. B., Çetin, K. O., Moss, R.E.S, Kammerer, A.M., Wu,J.,Pestana,J.M.,Riemer, M.F. “Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Response Evaluation” Geotechnical Earthquake Engineering and Microzonation Seminar, 2001, İstanbul
- [126] İyisan, R., “Zeminlerde Kayma Dalgası Hızı ile Penetrasyon Deney Sonuçları Arasındaki Bağlılıklar”, İMO Teknik Dergi, 1996, 1187-1199
- [127] Ansal, A., “Balıkesir Şehri Bahçelievler, Plevne, Hasan Basri Çantay, Akıncılar Mahalleleri ve 18-02 Konut Bölgesinin Yerleşime Uygunluk Çalışmalarının, Depremsellik ve İnşaat Mühendisliği Açısından Değerlendirilmesi”, İTÜ Geliştirme Vakfı, Uygulamalı Araştırma Raporu, (2001)
- [128] Ansal,A.M. “İstanbul İçin Tasarım Deprem Özelliklerinin Belirlenmesi” Prof.Dr.Rifat Yarar Sempozyumu Kitabı, (1997), 1, p.233-244.
- [129] Ambraseys,N.N., “The prediction of earthquake peak acceleration in Europe” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (1995), 24, p.467-490
- [130] Sadigh A., Chang C. Y., Egan J. A., Makdisi F., Youngs R.R., “Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data”, *Seismological Research Letters*, (1997), Volume 68, No 1
- [131] Abrahamson A. N., Shedlock K.M., “Overview”, *Seismological Research Letters*, (1997), Volume 68, Number 1
- [132] Abrahamson N. A., Silva W. J., “Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes”, *Seismological Research Letters*, (1997), Volume 68, Number 1

- [133] Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K., “Equations for estimation of strong motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration”, (2004)
- [134] Özbey C., Sarı A., Manuel L., Erdik M., Fahjan Y., “Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations for Northwestern Turkey”, Fifth National Conference on Earthquake Engineering, Turkey, (2003), Paper No: AE-040
- [135] Spudich P., Fletcher, J.B., Hellweg, M., Boatwright, J., Sullivan, C., Joyner, W.B., Hanks, T.C., Boore, D.M., McGarr, A., Baker, L.M. and Lindh, A.G., “SEA96- A New Predictive Relation for Earthquake Ground Motions in Extensional Tectonic Regimes” Seismological Research Letters, (1997), Volume 68, Number 1
- [136] Campbell K.W, “Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra” Seismological Research Letters, (1997), Volume 68, Number 1
- [137] Boore D.M., Joyner W. B., Fumal T.E., “Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work” Seismological Research Letters, (1997), Volume 68, Number 1
- [138] Carballo J.E., Cornell C.A., “Probabilistic Seismic Demand Analysis: Spectrum Matching and Design” Report No. RMS-41, (2000)
- [139] Durukal E., “Kuvvetli Deprem Yer Hareketinin Benzeşimi”, Belediyeler için Sismik Mikrobölgeleme Kursu, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2004)
- [140] Boore D.M., “Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method” Pure and Applied Geophysics, (2003), 160, 635-676
- [141] Erdik, M., Durukal, E., “Strong Ground Motion”, ed. by A. Ansal, (2004), Kluwer Academic Publishers, pp.139-197
- [142] Atkinson G. A., Boore D. M., “Some Comparisons Between Recent Ground Motion Relations” Seismological Research Letters, (1997), Volume 68, No 1
- [143] Atkinson G. M., Beresnev I., “Don’t call it stress drop” Opinion, Seismological Research Letters, (1997), Volume 68, Number 1
- [144] Sokolov, V., Bonjer, K.P., Wenzel, F., “Accounting for site effect in probabilistic assessment of seismic hazard for Romania and Bucharest: a case of deep seismicity in Vrancea zone”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2004), **24**, p.929.

- [145] Sokolov, V., Loh, C.H., Wen, K.L., “Evaluation of models for Fourier amplitude spectra for the Taiwan region”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2002), **22**, p.719.
- [146] Atkinson G. M., Silva W., “Empirical Study of Source Spectrum of California Earthquakes” ,[erp-web.er.usgs.gov/reports/annsum/vol37/sc/G2521.HTM](http://erp-web.er.usgs.gov/reports/annsum/vol37/sc/G2521.HTM)
- [147] Sorensen M.B., Akıncı A., Malagnini L., Herrmann R. B., ”Ground Motion Scaling In The Marmara Region: Attenuation Of Seismic Waves”  
[www.ifjf.uib.no/Seismologi/REPORTS/TALKS/Attenuation\\_marmara\\_03.ppt](http://www.ifjf.uib.no/Seismologi/REPORTS/TALKS/Attenuation_marmara_03.ppt)
- [148] Atkinson G., “Updated Ground Motion Relations for Earthquakes in Eastern NorthAmerica”,[erp-eb.er.usgs.gov/reports/annsum/vol45/ceu/02HQGR0001ann.pdf](http://erp-eb.er.usgs.gov/reports/annsum/vol45/ceu/02HQGR0001ann.pdf)
- [149] Wong Y. L., Zheng S., “Simulated Strong Ground Motion in Southern China based on Regional Seismographic Data and Stochastic Finite-Fault Model”,
- [150] Atkinson G. M., Boore D. M., “Stochastic Point-Source Modeling of Ground Motions in The Cascadia Region”, *Seismological Research Letters*, (1997), Volume 68, Number 1
- [151] Durukal, E., “Critical evaluation of strong motion in Kocaeli and Düzce (Turkey) earthquakes”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2002), **22**, p.589.
- [152] Benetatos, C.A., Kiratzi, A.A., “Stochastic strong ground motion simulation of intermediate depth earthquakes: the cases of the 30 May 1990 Vrancea (Romania) and of the 22 January 2002 Karpathos island (Greece) earthquakes”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (2004), **24**, p.1.