

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

KIRIKKALE ŞEHİR MERKEZİNİN DEPREM RİSK ANALİZİ VE SİSMİK
MİKROBÖLGELEMESİ

YETİŞ BÜLENT SÖNMEZER

ŞUBAT-2016

İnşaat Anabilim Dalında Yetiş Bülent SÖNMEZER tarafından hazırlanan KIRIKKALE ŞEHİR MERKEZİNİN DEPREM RİSK ANALİZİ VE SİSMİK MİKROBÖLGELEMESİ adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.


Doç. Dr. Orhan DOĞAN

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.


Doç. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

Danışman

Jüri Üyeleri

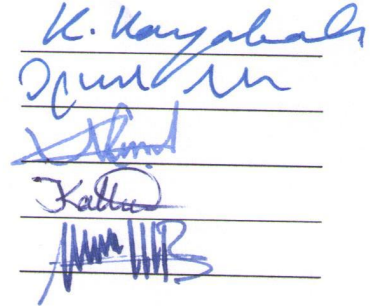
Başkan : Prof. Dr. Kamil KAYABALI

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

Üye : Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK

Üye : Doç. Dr. İlker KALKAN

Üye : Doç. Dr. Mehmet BARAN


K. Kayabali
Sami Oğuzhan AKBAŞ
Nihat Sinan IŞIK
İlker KALKAN
Mehmet BARAN

18 / 02 / 2016

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

KIRIKKALE ŞEHİR MERKEZİNİN DEPREM RİSK ANALİZİ VE SİSMİK MİKROBÖLGELEMESİ

SÖNMEZER, Yetiş Bülent

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Doktora tezi

Danışman: Doç. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

Şubat 2016, 236 sayfa

Türkiye, deprem potansiyeli oldukça yüksek olan önemli fay sistemlerinin bulunduğu bir ülkedir. Türkiye deprem bölgeleri haritasına göre I. derece deprem bölgesi içerisinde yer alan Kırıkkale şehir merkezi çalışma alanı, etrafında önemli faylar bulunması sebebiyle aktif bir sismik bölge içerisinde yer almaktadır. Bu çalışmanın amacı, kentsel planlamaya yönelik olarak çalışma alanının, sismik mikrobölgelemesini yapmak ve mevcut yapı stoğunun deprem riskini ortaya koymaktır.

Kırıkkale'nin sismik mikrobölgelemesi ve yapı stoğunun deprem riski ayrıntılı jeolojik, jeofizik ve geoteknik verilere dayanılarak değerlendirilmiştir. İnceleme alanında, tarihi ve aletsel dönem deprem verilerinden faydalanılarak 50 yılda %10 aşılma ihtimaline göre meydana gelmesi muhtemel deprem, Poisson olasılık dağılımı kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen deprem büyüklüğüne, çalışma alanının faya olan mesafesine ve yerel zemin koşullarına göre yeni nesil azalım ilişkileri kullanılarak anakaya seviyesi için hedef ivme spektrumu elde edilmiştir. Hedef spektrumla ölçeklenmiş deprem kayıtları kullanılarak, 500 m × 500 m boyutlarındaki hücre sistemini temsil eden zemin profilleri üzerinde, 1-D eşdeğer lineer zemin davranış analizleri SHAKE2000 programında gerçekleştirilmiştir. Davranış analizlerinde zemin büyütmesi, pik yer ivmesi, pik yer hızı, zemin hakim periyodu, kısa periyot (0,2

s) ve uzun periyot (1 s) spektral ivme değerleri belirlenmiş ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak haritalanmıştır.

Çalışma alanının deprem potansiyeli yüksek bir bölge olması sebebiyle mevcut yapı stoğu sokaktan hızlı tarama metodu kullanılarak incelenmiştir. İnceleme yönteminde, 1-7 katlı betonarme binalar sokaktan gözlenebilen bina parametreleri kullanılarak (bina kat sayısı, yumuşak kat, ağır çıkma vs.) bir risk değerlendirmesine tabi tutulmaktadır. Kırıkkale'de 2074 adet bina bu yöntemle incelenmiş ve yüksek riskli ve düşük riskli bina oranları belirlenmiştir. Ayrıca zemin davranış analizlerinde elde edilen yüzey ivme spektrumuna, Eurocode 8 Yönetmeliği ve Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 (DBYBHY 2007) spektrumlarına ölçeklenerek elde edilen deprem kayıtları kullanılarak, yapı stoğunda seçilen tipik binalar üzerinde SAP2000 programında zaman tanım alanında doğrusal elastik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu yapılan karşılaştırmalarda, binalardaki taban kesme kuvveti, devrilme momenti, tepe deplasmanı ve görelî kat ötelenmesi değerlerindeki farklılıklar belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, 50 yılda %10 aşılma ihtimaline göre çalışma alanını etkileyebilecek deprem büyüklüğünün $M=7$ olduğu belirlenmiştir. Çalışma alanında, zemin büyütmesi oranları 2,5-3 arasında değişmekle birlikte, deprem etkileri sonucu özellikle alüvyon birimlerin bulunduğu bölgelerin nispeten daha yüksek büyütme oranı, pik yer ivmesi ve periyot değerleri verdiği belirlenmiştir. Sokak taraması yöntemi kullanılarak yapılan inceleme sonucunda, meydana gelmesi muhtemel depremde yapı stoğunda yıkılabilecek ve ağır hasar görebilecek yüksek riskli binaların oranının %11 ile %25 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin Davranış Analizi, Deprem Risk Analizi, Zemin Büyütmesi, Sokaktan Hızlı Değerlendirme, Doğrusal Elastik Analiz, Kırıkkale.

ABSTRACT

EARTHQUAKE RISK ANALYSIS AND SEISMIC MICROZONATION IN THE CITY CENTER OF KIRIKKALE (TURKEY)

SÖNMEZER, Yetiş Bülent

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Science

Civil Engineering Division, Ph. D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

February 2016, 236 pages

Turkey hosts a number of major faults with high earthquake potential. Located within the first degree earthquake zone according to Turkey earthquake zone map, the study area, i.e., the Kırıkkale city center, is actually in an active seismic region with major faults around it. The scope of this thesis is to carry out seismic microzonation and analysis studies for city planning purposes in the study area.

The seismic microzonation and the earthquake risk of building stock in the study area were evaluated based on detailed geological, geophysical and geotechnical data. In the study area, the probability of an earthquake in 50 years with 10% exceedance probability was determined via the Poisson probability distribution using the historical and measured earthquake data. The target acceleration spectrum at the bedrock level was obtained using the new generation attenuation relationships based on the earthquake magnitude determined from seismic hazard analysis (i.e., $M=7$), the distance of the study area to the fault and the local soil characteristics. One dimensional (1D) equivalent linear soil response analyses on soil profiles representing 500m x 500 m cells were performed by SHAKE2000 software program using the earthquake accelerations scaled to the target spectrum. The soil amplification, peak ground acceleration, peak ground velocity, predominant soil period, short period (0.2 s) and

long period (1 s) spectral accelerations were then identified and mapped using Geographical Information Systems (GIS).

Since the study area is located in a high risk earthquake zone, the current building stock in the study area was examined by the rapid street detection method. In this method, 1-7 story buildings are subjected to risk analyses utilizing the building parameters such as number of stories, presence of soft stories and overhangs etc. A total of 2074 buildings were investigated with this methodology and then their high and low risk ratios were determined. Also, linear elastic time history analyses on the selected typical buildings were carried out with SAP2000 software program using earthquake accelerations scaled to the surface acceleration spectra obtained from the soil response analyses, the Eurocode 8 and the Turkish Earthquake Code 2007 in a comparative manner. The analyses results enabled to determine the differences between base shear forces at foundation level, overturning moments, displacement at top of buildings and story drift.

The study results indicated that the earthquake magnitude which may impact the study area was determined as $M=7$. Although the soil amplification ratio in the study area was found to range between 2.5 and 3.0, especially, the regions with alluvial units were determined to produce relatively higher soil amplification ratios, peak ground accelerations and periods. According to the rapid street detection method, 11-25% of the building stock with high risk buildings were found to collapse or get damaged during a probable earthquake.

Keywords: Soil Response Analysis, Earthquake Risk Analysis, Soil Amplification, Rapid Street Detection, Linear Elastic Time History Analysis, Kırıkkale.

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında yardımını esirgemeyen ve katkılarıyla bana destek olan tez yöneticisi hocam Sayın Doç. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ'a, tez çalışmalarım esnasında bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK'a, ve Sayın Doç. Dr. İlker KALKAN'a, tez çalışması kapsamında yaptığım sismik çalışmalara destek olan Kırıkkale Üniversitesi BAP koordinasyon birimine ve ayrıca bana birçok konuda olduğu gibi tezimi hazırlamam esnasında da yardımlarını esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. MİKROBÖLGELEMENİN TANIMI VE TEMEL KAVRAMLAR	3
2.1. Sismik Mikrobölgeleme.....	3
2.2. Birinci Derece Mikrobölgeleme	5
2.3. İkinci Derece Mikrobölgeleme	6
2.4. Üçüncü Derece Mikrobölgeleme	6
2.5. Literatürdeki Çalışmalar	8
3. KIRIKKALENİN JEOLJİSİ, TEKTONİĞİ VE SİSMİK AKTİVİTESİ 12	
3.1. Coğrafi Konum ve Morfoloji.....	12
3.2. Genel Jeoloji	14
3.2.1. Tortul Kayaçlar	15
3.2.1.1. Eosen Birimleri.....	16
3.2.1.2. Neojen Birimler	16
3.2.1.3. Kuvaterner Birimler	16
3.2.2. Bozçaldağ Formasyonu	17
3.2.3. Kasımağa Formasyonu	17
3.2.4. Ceritkale Formasyonu.....	17
3.2.5. Kartal Formasyonu	18
3.2.6. Kızılırmak Formasyonu	19
3.2.7. Kuvaterner	19
3.3. Tektonik	20
3.3.1. Kuzey Anadolu Fay Zonu.....	25
3.3.2. Tuzgölü Fayı.....	25

3.3.3. Ezinepazarı Fayı	25
3.3.4. Seyfe Fay Zonu	26
3.3.5. Karakeçili Fayı.....	26
3.4. Kırıkkale ve Çevresinin Depremselliği	27
4. SAHA VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI	30
4.1. Saha Çalışmaları	30
4.2. Laboratuvar Testleri.....	37
4.3. Jeofizik Çalışmaları	39
4.4. BAP Projesi Kapsamında Yapılan Çalışmalar.....	48
4.5. Aktif Kaynaklı Yüzey Dalgası Yöntemi (MASW).....	49
4.6. Kırılma-Mikrotremor Yöntemi (ReMi)	50
4.7. Şirinevler Caddesi Masw Sonuç Görüntüleri	52
4.8. 1 No'lu Ölçüm Noktası (Şirinevler Caddesi) Remi Sonuç Görüntüleri	54
4.9. Şirinevler Caddesi Masw-Remi Birleşik Ters Çözüm Sonuç Görüntüleri	57
5. SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ VE YER HAREKETİNİN TAHMİNİ	60
5.1. Sismik Tehlike Analizi	61
5.1.1. Deterministik Deprem Tehlike Analizi.....	61
5.1.2. Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi	62
5.2. Poisson Olasılık Modeli.....	64
5.3. Kırıkkale için Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi	66
5.3.1. Oluşum Sayısı Büyüklük İlişkisi Parametrelerinin Belirlenmesi	70
5.4. Yer Hareketinin Tahmini	74
5.5. Azalım İlişkileri	82
5.5.1. Abrahamson, Silva ve Kamai (2013) Azalım İlişkisi Modeli	76
5.5.2. Boore, Stewart, Seyhan ve Atkinson (2013) Azalım ilişkisi	77
5.5.3. Campell ve Bozorgnia (2013) Azalım İlişkisi	78
5.6. Kırıkkale İçin Yer Hareketi Parametrelerinin Tahmini	79
5.7. Kırıkkale için Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi ..	84
5.8. Yer Hareketlerinin Ölçeklenmesi	85
6. DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİ, DAVRANIŞ ANALİZİ VE BÜYÜTME.....	100
6.1. Dinamik Zemin Özellikleri	101

6.2. Kırıkkale için Kayma Dalgası Hızının Belirlenmesi ve Zemin Sınıflandırması.....	105
6.3. Zemin Davranış Analizi.....	113
6.4. Zemin Davranış Analizlerinde Kullanılan Zemin Parametreleri.....	114
6.5. Zemin Davranış Analizlerindeki Zemin Profillerinin Modellenmesi.....	118
6.6. Zemin Davranış Analizlerinde Kullanılan Deprem Kaydı.....	121
6.7. Zemin Büyütmesi.....	123
6.8. Kırıkkale’de Zemin Büyütmesi, İvme Spektrumu ve Pik Yer İvmesi.....	125
6.9. Büyütme Oranlarının Kayma Dalgası Hızından Belirlenmesi.....	137
6.10. Kırıkkale için Büyütme Oranlarının Karşılaştırması.....	141
7. YAPILARIN DEPREM RİSKİNİN SOKAKTAN HIZLI TARAMA YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ.....	143
7.1. Sokaktan İnceleme Parametreleri.....	144
7.2. Kırıkkale için Deprem Riskinin Sokaktan Hızlı Tarama Yöntemi ile Belirlenmesi.....	149
8. KIRIKKALE YAPI STOĞUNDAKİ TİPİK BİNALARIN ZAMANA BAĞLI DOĞRUSAL ELASTİK ANALİZİ.....	167
9. SONUÇLAR.....	203
KAYNAKLAR.....	206
ÖZGEÇMİŞ.....	236

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
3. 1. Kırıkkale yerleşim alanı yükselti haritası.....	13
3. 2. Kırıkkale yerleşim alanı eğim haritası	14
3. 3. Kırıkkale ve yakın civarının jeoloji haritası.....	15
3. 4. Kırıkkale ili zeminlerine ait stratigrafik dikme kesiti	20
3. 5. Türkiye'yi etkileyen aktif tektonik bölgeler	21
3. 6. Kırıkkale'nin etrafındaki önemli depremlerin merkez üstlerinin dağılımı	23
3. 7. Kırıkkale'nin etrafındaki önemli faylar	24
4. 1. Kırıkkale'de DSİ tarafından yapılan derin su sondajı zemin profilleri.....	31
4. 2. Sondaj noktalarının genel dağılımı.....	36
4. 3. Çalışma alanında laboratuvar test sonuçlarına göre zemin sınıfları	37
4. 4. Sismik kırılmada ilk gelen dalgaların dalga cepheleri	41
4. 5. $x_n > x_c$ olduğu zamanki ilerleme izi.....	41
4. 6. Sismik kırılma testi	43
4. 7. Sismik kırılma testi için atış noktaları.....	43
4. 8. P düz atış	44
4. 9. P ters atış	44
4. 10. S düz atış	45
4. 11. P dalgası uzaklık zaman grafiği	45
4. 12. S dalgası uzaklık zaman grafiği	46
4. 13. Çalışma alanında yapılan sismik kırılma testlerinin lokasyonları.....	47
4. 14. MASW ve ReMi testlerinin lokasyonları.....	50
4. 15. MASW ve ReMi yöntemlerinde uygulanan serim geometrisi.....	51
4. 16. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) MASW kaydı	52
4. 17. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) MASW kaydı dispersiyon görüntüsü ve dispersiyon eğrisi	53
4. 18. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) MASW kaydı dispersiyon eğrisi	53
4. 19. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) MASW kaydından ters çözüm sonucu elde edilen V_s -derinlik kesiti	54

4. 20. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) ReMi kaydı	54
4. 21. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait 1-7 nolu ReMi kayıtlarından hesaplanan dispersiyon görüntüsü ve seçilen dispersiyon eğrisi	55
4. 22. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait ReMi kaydı dispersiyon eğrisi	56
4. 23. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait ReMi kaydından ters çözüm sonucu elde edilen kayma dalgası hızı derinlik kesiti.....	56
4. 24. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait MASW-ReMi dispersiyon eğrilerinin birleştirilmiş hali.....	57
4. 25. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait MASW-ReMi dispersiyon eğrilerinin birleştirilmesinden ters çözüm sonucu elde edilen kayma dalgası hızı derinlik kesiti	57
5. 1. Deterministik deprem tehlike analizinin aşamaları.....	62
5. 2. Probalistik deprem tehlike analizi aşamaları.....	64
5. 3. 1998-2012 yılları arası meydana gelen depremler (EMSC)	66
5. 4. Büyüklük-Oluşum sayısı ilişkisi	72
5. 5. 5 km mesafe için PGA değerlerinin mesafe ile değişimi.....	81
5. 6. 10 km mesafe için PGA değerlerinin mesafe ile değişimi.....	81
5. 7. ASK13 Azalım ilişkisinden belirlenen 5-10 km mesafe için ivme spektrumları	82
5. 8. BSSA13 Azalım ilişkisinden belirlenen 5-10 km mesafe için için ivme spektrumları	82
5. 9. CB-13 Azalım ilişkisinden belirlenen 5-10 km mesafe için ivme spektrumları	83
5. 10. 5 km mesafe için ASK13, BSSA13 ve CB13 azalım ilişkileri ile belirlenen % 5 sönüm oranı için hedef spektrum grafikleri	84
5. 11. Hedef spektrum ve seçilen kayıtların spektrumu.....	89
5. 12. Hedef spektrum ve ölçeklenmiş kayıtların spektrumu.....	90
5. 13. 1999 Düzce depremi Lamont 1061 kaydı	92
5. 14. 1999 Düzce depremi Mudurnu kaydı.....	92
5. 15. 1990 Manjil depremi Abbar kaydı	93
5. 16. 2010 Darfield depremi Hearhcote Valley Primary School	93

5. 17. 2010 Darfield depremi SPFS kaydı	94
5. 18. 2010 El Mayor-Cucapah depremi Sam W. Stewart kaydı	94
5. 19. Seçilen kayıtların ortalama grafiği	96
5. 20. Orijinal kaydın ve üretilen yapay kaydın ivme, hız ve deplasman kayıtları.	97
5. 21. Üretilen kaydın Arias şiddeti değişim grafiği	97
5. 22. Hedef spektrum ve üretilen kaydın spektrumu	98
5. 23. Hedef spektrum ve üretilen kaydın spektrumları arasındaki fark	98
5. 24. Üretilen kaydın ivme-zaman grafiği	99
6. 1. Pasticite indisinin etkisi a) Kayma modülü oranı (G/G_{max}) b) Sönüm oranı (D)	103
6. 2. Ortalama efektif gerilmenin etkisi a) Kayma modülü oranı (G/G_{max}) b) Sönüm oranı (D)	104
6. 3. Plastisite indisinin etkisi a) kayma modülü oranı (G/G_{max}) b) sönüm oranı (D) (Darendeli 2001)	105
6. 4. Farklı araştırmacılara göre SPT-N - V_s değişim grafiği	108
6. 5. Farklı araştırmacılara göre SK-79 noktasına ait kayma dalgası hızının derinlikle değişimi	109
6. 6. Kırıkkale için sismik kırılma testi sonuçlarına göre V_{s30} değerlerinin dağılımı	112
6. 7. Zemin tabakalarında yer hareketlerinin etkisi	113
6. 8. Killer için modül azalımı eğrileri	116
6. 9. Killer için sönüm oranı eğrileri	116
6. 10. Kumlar için modül azalım eğrileri	117
6. 11. Kumlar için sönüm oranı eğrisi	117
6. 12. Zemin davranış analizlerinde kullanılan hücre sistemi	119
6. 13. a) SK-79 zemin profili b) SK-1 zemin profili	120
6. 14. SHAKE2000 programı parametre giriş sayfası	121
6. 15. SHAKE2000 programı zemin profilleri	122
6. 16. SHAKE2000 programı giriş deprem kaydı	122
6. 17. 1985 Michoacan depreminde meydana gelen büyüme	124
6. 18. 5 km mesafe için hedef spektruma ölçeklenmiş kayıtların ivme spektrumları	126
6. 19. 5 km mesafe için SK-1 zemin profiline göre yüzey ivme spektrumları	127

6. 20. 5 km mesafe için SK-1 zemin profiline göre büyütme oranları.....	128
6. 21. SK-1 zemin profili için PGA'nin derinlikle değişimi	130
6. 22. SK-79 zemin profili için PGA'nin derinlikle değişim	130
6. 23. Kırıkkale için Pik yer ivmesi (PGA) haritası	132
6. 24. Kırıkkale için zemin Büyütme haritası	133
6. 25. Kırıkkale için zemin hakim periyodu haritası	134
6. 26. Kırıkkale için 0,2 s periyotlu spektral ivme haritası	135
6. 27. Kırıkkale için 1 s periyotlu spektral ivme haritası	136
6. 28. Farklı ilişkilere göre büyütme faktörlerinin karşılaştırması.....	138
6. 29. Kırıkkale için Midorikawa (1987) kayma dalgası hızına bağlı büyütme faktörleri	140
6. 30. Kırıkkale zeminleri için farklı metotlara göre büyütme faktörlerinin karşılaştırılması.....	141
7. 1. Betonarme binalarda yumuşak kat örneği.....	145
7. 2. Betonarme binalarda ağır çıkma örneği	146
7. 3. Betonarme binalarda kısa kolon örneği.....	147
7. 4. Kırıkkale'de PGV'nin dağılımı.....	150
7. 5. Kırıkkale'de gözlemlenen binaların katsayılarına göre dağılımı	151
7. 6. Düşük ve yüksek riskli binalar için doğruluk oranının hesaplanan performans skoru ile değişimi	152
7. 7. Sınır değer 50'ye göre Kırıkkale'de gözlemlenen binaların performans puanı dağılımı ve güvenli ve güvensiz bina oranları	153
7. 8. Sınır değer 50'ye göre güvenli ve güvensiz binaların haritası	154
7. 9. Sınır değer 50'ye göre güvensiz binaların haritası.....	155
7. 10. Sınır değer 60'a göre Kırıkkale'de gözlemlenen binaların performans puanı dağılımı ve güvenli ve güvensiz bina oranları	156
7. 11. Sınır değer 60'a göre güvenli ve güvensiz binaların haritası.....	157
7.12. Sınır değer 50'ye göre güvensiz binaların haritası.....	158
7. 13. Katsayılarına göre güvenli güvensiz bina oranları (SD=50).....	160
7. 14. Katsayılarına göre güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=60).....	160
7. 15. Ağır çıkmalı güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=50)	161
7. 16. Ağır çıkmalı güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=60)	161
7. 17. Yumuşak katlı, güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=50).....	162

7. 18. Yumuşak katlı, güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=60).....	162
7. 19. Kısa kolonlu, güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=50).....	163
7. 20. Kısa kolonlu, güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=60).....	163
7. 21. Görünen kalitenin güvenli ve güvensiz binalar üzerindeki etkisi (SD=50)..	164
7. 22. Görünen kalitenin güvenli ve güvensiz binalar üzerindeki etkisi (SD=60)..	165
8. 1. Kırıkkale’de mevcut yapılar.....	168
8. 2. Kırıkkale’de mevcut yapılar.....	169
8. 3. Kırıkkale’de mevcut yapılar.....	169
8. 4. Kırıkkale’de mevcut yapılar.....	170
8. 5. Kırıkkale’de mevcut yapılar.....	170
8. 6. Kırıkkale’de mevcut yapılar.....	171
8. 7. Kırıkkale’de mevcut yapılar.....	171
8. 8. Kırıkkale’de mevcut yapılar.....	172
8. 9. Model 1’in resimleri.....	173
8. 10. Model 1’in kat planı.....	174
8. 11. Model 2’nin resimleri.....	174
8. 12. Model 2’nin resimleri.....	175
8. 13. Model 2’nin kat planı.....	175
8. 14. Model 3’ün resimleri.....	176
8. 15. Model 3’ün kat planı.....	177
8. 16. EC8, DBYBHY 2007 ve YS grafikleri.....	179
8. 17. Brawley Airport istasyonu orijinal ve EC8’e ölçeklenmiş ivme- zaman grafiği.....	180
8. 18. Calipatria Fire istasyonu orijinal ve EC8’e ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği.....	180
8. 19. El Centro Array istasyonu orijinal ve EC8’e ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği.....	181
8. 20. Brawley Airport istasyonu orijinal ve DBYBHY 2007’e ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği.....	181
8. 21. Calipatria Fire istasyonu orijinal ve DBYBHY 2007’e ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği.....	182
8. 22. El Centro Array istasyonu orijinal ve DBYBHY 2007’ye ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği.....	182

8. 23. Brawley Airport istasyonu orijinal ve Yerel spektruma ölçeklenmiş ivme- zaman grafiği	183
8. 24. Calipatria Fire istasyonu orijinal ve Yerel Spektruma ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği	183
8. 25. El Centro Array istasyonu orijinal ve Yerel Spektruma ölçeklenmiş ivme- zaman grafiği	184
8. 26. EC8 ve ölçeklenmiş kayıtların spektral ivme grafikleri.....	185
8. 27. DBYBHY 2007 ve ölçeklenmiş kayıtların spektral ivme grafikleri.....	185
8. 28. Yerel spektrum ve ölçeklenmiş kayıtların spektral ivme grafikleri.....	186
8. 29. Model 1'in Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Taban Kesme Kuvveti değerleri	195
8. 30. Model 2'nin Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Taban Kesme Kuvveti değerleri	196
8. 31. Model 3'ün Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Taban Kesme Kuvveti değerleri	196
8. 32. Model 1'in Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Devrilme Momenti değerleri.....	197
8. 33. Model 2'nin Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Devrilme Momenti değerleri.....	197
8. 34. Model 3'ün Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Devrilme Momenti değerleri.....	198
8. 35. Model 1'in Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Tepe Deplasmanı değerleri	198
8. 36. Model 2'nin Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Tepe Deplasmanı değerleri	199
8. 37. Model 3'ün Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Tepe Deplasmanı değerleri.....	199
8. 38. Model 1'in Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Görelî Kat Öteleme Oranları	200
8. 39. Model 2'nin Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Görelî Kat Öteleme Oranları.....	200

8. 40. Model 3'nin Farklı Spektrumlar ve Deprem Kayıtları için Görelî Kat Ötelenmesi oranları.....	201
---	-----



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Mikrobölgeleme Aşamaları.....	5
4. 1. Çalışma alanının sondaj koordinatları, derinlikleri ve yeraltı su seviyesi derinliği.....	32
4. 2. Laboratuvar test sonuçları	38
4. 3. Çalışma alanındaki zeminlerin V_p , V_s ve h_1 değerleri	48
4. 4. MASW ve ReMi ölçüm yeri ve koordinat bilgisi	49
4. 5. MASW ve ReMi ölçümlerinde kullanılan arazi parametreleri	52
4. 6. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait kayma dalgası hızı derinlik değişimi.....	58
4. 7. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait yer dinamik parametreleri	58
5. 1. Öncü ve Artçı depremlerin ayırt edilmesinde kullanılacak olan uzaklık ve zaman pencerelerinin boyutları	68
5. 2. Sismik tehlike analizinde kullanılan depremler	69
5. 3. Depremlerin oluş sayısı ve yığınsal frekans değerleri	71
5. 4. Farklı yıl ve olasılık değerlerine karşılık gelen tasarım depremleri.....	72
5. 5. ASK13 modelinde kullanılan parametreler.....	76
5. 6. BSSA13 modelinde kullanılan parametreler.....	77
5. 7. CB13 modelinde kullanılan parametreler	78
5. 8. PGA değerleri belirlenirken kullanılan parametreler.....	80
5. 9. Farklı mesafeler için PGA değerleri	80
5. 10. Deprem kayıtlarının seçilmesinde kullanılan parametreler.....	85
5. 11. PEER veri tabanından seçilen deprem kayıtları.....	88
5. 12. Seçilen depremlerin MSE ve ölçek faktörü değerleri	91
6. 1. V_s ve SPT-N arasında literatürde yer alan bağıntılar	106
6. 2. NEHRP' e göre zemin sınıfları	110
6. 3. Kırıkkale için sismik kırılma testi sonuçlarına göre V_{s30} değerleri.....	111
6. 4. Dinamik eğriler için derinlik oranları ve temsil eden derinlikler.....	115
6. 5. SK-1 ve SK-79 için zemin davranış analizlerinin sonuçları	129

6. 6. Ortalama kayma dalgası hızı ile büyütme faktörü arasındaki ilişkiler.....	138
6. 7. Midorikawa (1987) bağıntısına bağlı büyütme faktörleri	139
7. 1. Bina için belirlenen başlangıç ve olumsuzluk puanları	149
8. 1. Yapısal analizlerde kullanılan deprem kayıtları.....	178
8. 2. Ölçeklenmiş kayıtların pik yer ivmesi (PGA) değerleri	186
8.3. Model 1'in sokak taraması sonuçları	187
8. 4. Model 2'nin sokak taraması sonuçları	188
8. 5. Model 3'ün sokak taraması sonuçları	188
8. 6. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için taban kesme kuvvetleri ve YS'a göre % faktörleri.....	189
8. 7. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için taban kesme kuvvetleri ve YS'a göre % faktörleri.....	190
8. 8. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için taban kesme kuvvetleri ve YS'a göre % faktörleri.....	190
8. 9. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için devrilme momentleri ve YS'a göre % faktörleri	191
8. 10. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için devrilme momentleri ve YS'a göre % faktörleri	191
8. 11. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için devrilme momentleri ve YS'a göre % faktörleri	192
8. 12. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için tepe deplasmanı ve YS'a göre % faktörleri.....	192
8. 13. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için tepe deplasmanı ve YS'a göre % faktörleri.....	193
8. 14. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için tepe deplasmanı ve YS'a göre % faktörleri.....	193
8. 15. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için göreceli kat ötelemesi oranları ve YS'a göre % faktörleri	194
8. 16. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için göreceli kat ötelemesi oranları ve YS'a göre % faktörleri	194
8. 17. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için göreceli kat ötelemesi oranları ve YS'a göre % faktörleri	195

1. GİRİŞ

Mevcut yerleşim alanlarının ve yerleşime yeni açılacak alanların imar planlarının oluşturulmasında, bölgenin deprem tehlikesinin ve yerel zemin koşullarının belirlenmesi, yeni ve daha güvenilir yerleşim alanlarının oluşturulması açısından büyük önem taşımaktadır. Ulusal ölçekte yapılan ve anakaya seviyesindeki sismik etkileri dikkate alan olasılıksal analizlere dayalı makrobölgeleme haritaları, küçük ölçekte yeterli ayrıntıyı içermeyebilmekte ve yerel zemin şartlarını yeterince dikkate alamamaktadır. Bu eksikliği gidermeye yönelik olarak yapılan çalışmaların başında mikrobölgeleme çalışmaları gelmektedir. Mikrobölgeleme; Deprem kaynağı, uzaklık ve yerel zemin koşullarını dikkate alan ve zeminlerin deprem etkisi altındaki davranışlarının, zemin yüzeyinde meydana getirdiği değişiklikleri ortaya koyan çalışmalar şeklinde açıklanabilir.

Mikrobölgeleme, Ansal vd. [1] tarafından bir bölgede meydana gelmesi muhtemel deprem özelliklerine göre, yerel zeminlerin nasıl davranış göstereceklerini ve deprem kuvvetleri sonucu, zemin yüzeyinde ve binalarda nasıl değişim olacağının bölge içindeki dağılımını inceleyen çalışmalar şeklinde tanımlanmıştır.

Yerleşim alanları, yeterince araştırılmadan ve ayrıntılı çalışmalar yapılmadan ulaşım kolaylığı ve ekonomik nedenlerden dolayı genellikle tarım açısından verimli alüvyon zeminler üzerine kurulabilmektedir. Yerleşim alanlarının alüvyon düzlüklere yapılması, muhtemel deprem sonrasında ekonomik, sosyal ve psikolojik açıdan tamiri güç sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunları ortadan kaldırmak ve yeni yerleşim alanlarının belirlenmesinde yerel yönetimlere yol göstermek amacıyla mikrobölgeleme çalışmaları yapılmaktadır. Mikrobölgeleme çalışmalarında zeminlerin dayanım ve deformasyon özellikleri jeolojik, sismik ve geoteknik veriler kullanılarak ayrıntılı olarak ele alınmakta ve haritalanmaktadır. Bu haritalar, nazım imar planlarının ve uygulama imar planlarının hazırlanmasında uygulayıcılara ve yerel yönetimlere yol gösterici olmaktadır.

Türkiye, önemli sismik aktiviteye sahip, etrafı aktif fay zonları ile çevrili bir deprem ülkesidir. Bu aktif fay zonlarının en önemlisi 1600 km kırık uzunluğuna sahip Kuzey Anadolu Fay Zonu'dur (K.A.F.Z.) [2, 3, 4]. K.A.F.Z.'nda meydana gelen ve binlerce kişinin ölümüne yol açan 1999 İzmit ($M_w=7,4$) ve Düzce ($M_w=7,1$) depremleri bu sismik aktivitenin tipik örnekleridir.

Kırıkkale, Türkiye'nin I. Derece deprem bölgesinde [5] yer alan etrafı Seyfe Fay Zonu, Karakeçili Fay Zonu ve Kırıkkale-Sungurlu Fay Zonu gibi aktif faylarla çevrili bir şehirdir. Kırıkkale'ye uzaklığı 50 km olan Seyfe Fay Zonunda 1938'de $M_w=6,4$ büyüklüğünde meydana gelen Akpınar depremi bölgedeki sismik aktiviteyi gösteren önemli depremlerdendir. Bu nedenle, Kırıkkale'de yeni ve daha güvenli yapım stratejilerine bağlı olarak, yapı kalitesinin artırılması, yeni yerleşim planlarının geliştirilmesi ve mevcut yapı stoğunun depreme dayanıklı hale getirilmesi için yerel zemin koşullarını dikkate alan teorik ve deneysel verilere dayanan kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Kırıkkale şehir merkezi yerleşim alanında, deprem etkileri sonucunda meydana gelecek zemin büyütmesi, zemin hakim periyodu ve pik yer ivmesi (PGA) değişimlerini belirlemek ve kentsel planlamaya yönelik olarak mevcut yapı stoğunun deprem riskini ortaya koymaktır.

2. MİKROBÖLGELEMENİN TANIMI VE TEMEL KAVRAMLAR

2.1. Sismik Mikrobölgeleme

Sismik mikrobölgeleme ve sismik tehlike haritalarının hazırlanması, yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanmasında ve kentsel planlamada, doğal tehlikelerin etkisini değerlendirilmek açısından önemli çözümler sunmaktadır. Mikrobölgeleme esas olarak, bölgesel ölçekte kentsel alanların küçük bölgelere ayrılarak, doğal olayların doğrudan ve dolaylı etkilerinin, mikrobölgeleme prensiplerini de uygulayarak değerlendirilmesidir. Sismik mikrobölgelemeyi ayrıca zemin özellikleri ve bölgede oluşması muhtemel depreme göre zeminlerin davranış özelliklerinin tespiti ve bunun zemin yüzeyindeki değişiminin belirlenmesi olarak tanımlamak da mümkündür.

Sismik mikrobölgeleme literatürde farklı araştırmacılar tarafından değişik şekillerde tanımlanmıştır. Nigg [6] tarafından mikrobölgeleme, depremden sonra oluşabilecek hasarları en alt seviyede tutabilmek için bölgenin küçük alanlara bölünerek değerlendirilmesi olarak tanımlanmıştır.

Wang ve Law [7], mikrobölgelemeyi iki kritere göre tanımlamışlardır. Birinci kriter deprem şiddeti, ikinci kriter ise tepki spektrumu olarak tanımlanmıştır. Yazarlar mikrobölgelemeyi bu iki kritere bağlı olarak, alanın daha küçük alanlara bölünerek değerlendirilmesi olarak belirtmişlerdir.

Finn ve Ventura [8] ise mikrobölgelemeyi, sismik tehlike analizi olarak adlandırılan yer hareketi parametrelerinin farklı seviyelerdeki aşılma olasılıkları için haritalanması olarak tanımlamışlardır. Sismik tehlike analizi, sismik risk ve sismik tehlike için mikrobölgelemenin önemli bir parçası olarak kabul edilmektedir.

Lee vd. [9] tarafından sismik mikrobölgeleme, deprem etkileri sonucu ortaya çıkan, heyelan, sıvılaşma ve yer sarsıntı şiddeti açısından farklı potansiyellere sahip alanların, yerel veya bölgesel ölçekte tanımlanması ve haritalanması olarak belirtilmiştir.

Deprem tehlikelerine karşı güvenliği ikiye ayırarak incelemek mümkündür. Birincisi dinamik kuvvetlere karşı güvenlik, ikicisi ise bölgenin zemin büyütmesine, heyelana ve sıvılaşma potansiyeline göre güvenlidir. Dünyanın birçok yerinde deprem zararlarını ve riski azaltmak amacıyla, dinamik yıkıcı kuvvetler, depreme dayanıklı yapı tasarımı yönetmeliklerinde hesaba katılmaktadır. Ancak, büyütme, sıvılaşma ve heyelan etkisi yönetmeliklerde yeterince dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle mikrobölgeleme çalışmaları genelde zemin büyütmesine, yamaç duraylılığına ve sıvılaşmaya göre üç ayrı kategoride yapılmaktadır. [10, 11].

1990'larda bazı araştırmacılar, deprem riskini azaltmak ve gelecekte olabilecek olayların farkındalığını artırmaya yönelik olarak mikrobölgeleme çalışmalarının ilk temellerini oluşturmuşlardır. Bu amaca yönelik olarak Fah vd. [12] tarafından, zeminlerin sismik yer hareketlerine maruz kalması durumunda, davranışlarını tahmin etmek ve yerel zemin koşullarının etkilerini değerlendirmek amacıyla üç adımlı bir yaklaşım sunulmuştur. İlk adımda, elde edilen tüm jeolojik ve geoteknik veriler yorumlanmakta ve haritalanmaktadır. İkinci adımda, bölgenin zemin hakim periyodunu tahmin etmek ve yorumlamak amacıyla sismik gürültü ölçümleri ve kayma dalgası hızını ampirik bağıntılardan belirlemek amacıyla standart penetrasyon testleri (S.P.T.) yapılmaktadır. Üçüncü adımda ise zemin profilleri, bir ve iki boyutlu sayısal modellemelerle analiz edilerek bölgenin mikrobölgelemesi tamamlanmış olmaktadır. Ayrıca Uluslararası Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği tarafından görevlendirilen Geoteknik Deprem Mühendisliği Teknik Komitesi (ISSMGE-TC4, 1999) tarafından önerilen mikrobölgeleme uygulamalarında yapılması gereken çalışmalar ve analizler Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Mikrobölgeleme Aşamaları [10]

Mikrobölgeleme Aşamaları			
	1. Aşama (Genel Bölgeleme)	2. Aşama (Ayrıntılı Bölgeleme)	3. Aşama (Çok Ayrıntılı Bölgeleme)
Zemin Büyütmesi	Tarihsel depremler, Bölgenin tektonik ve jeolojik yapısı, Jeolojik haritalar ve Yöre halkı ile mülakatlar	Geoteknik incelemeler, Mikrotrömer ölçümleri	Ayrıntılı geoteknik incelemeler, Zemin davranış analizi, Zemin tabakaları 1 ve 2 boyutlu analizler
Şev Stabilitesi	Tarihsel depremler, Bölgenin tektonik ve jeolojik yapısı, Jeolojik haritalar ve Yöre halkı ile mülakatlar	Hava fotoğrafları, Uzaktan algılama, Arazi incelemeleri, Bitki örtüsü ve yağış bilgisi	Ayrıntılı geoteknik incelemeler, Şev stabilitesi analizleri
Sıvılaşma	Tarihsel depremler, Bölgenin tektonik ve jeolojik yapısı, Jeolojik haritalar ve Yöre halkı ile mülakatlar	Hava fotoğrafları, Uzaktan algılama, Arazi incelemeleri, Yöre halkı ile mülakatlar	Ayrıntılı geoteknik incelemeler, Sıvılaşma analizleri
Harita Ölçeği	1/1000000 ile 1/500000	1/1000000 ile 1/10000	1/25000 ile 1/5000

2.2. Birinci Derece Mikrobölgeleme

Birinci derece değerlendirme, tarihi kaynaklardan ve/veya aletsel dönemden elde edilen deprem bilgileri ve eldeki mevcut raporlardan derlenen jeolojik ve geoteknik verilerin yorumlanmasına dayanmaktadır. Tarihi ve aletsel dönem deprem verileri deprem kataloglarından kolaylıkla elde edilmekte ve sismik kaynak bölgeleri belirlenerek gelecekte olması muhtemel depremlerin büyüklükleri ve sıklığı tahmin edilebilmektedir. Bu tahmin değerleri ve bölgenin jeolojik ve geoteknik verileri kullanılarak zayıf korelasyonlara dayalı farklı tehlike seviyeleri için ilk mikrobölgeleme haritaları 1/1000000 ile 1/50000 ölçekte üretilmektedir.

2.3. İkinci Derece Mikrobölgeleme

Birinci derece bölgelemeden elde edilen sonuçların kalitesi, ek çalışma ve veri kaynakları kullanılarak, düşük maliyetlerle önemli oranda iyileştirilebilmektedir. Kamu kuruluşlarından veya belediyelerden veya özel kuruluşlardan alınacak geoteknik etüt raporları, arazi ve laboratuvar test sonuçları veya hava fotoğrafları, bölgenin jeolojik durumu ve fay yapısının değerlendirilmesinde yararlı olmaktadır. Bu ilave bilgiler bölgenin zemin büyütmesi, sıvılaşma potansiyeli ve şev duraylılığı ile ilgili yerel zemin koşulları hakkında ayrıntılı bilgiler vermektedir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen harita ölçekleri genellikle 1/10000 ile 1/100000 arasında değişmektedir.

2.4. Üçüncü Derece Mikrobölgeleme

Üçüncü aşama bölgelemede ise daha ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Zeminler, zayıf yer hareketlerine maruz kaldığında doğrusal, kuvvetli yer hareketlerine maruz kaldığında ise doğrusal olmayan davranış gösterirler. Zeminlerin doğrusal olmayan davranışından dolayı büyük yer değiştirmeler meydana gelmektedir [13]. Bu yer değiştirmeler yapılarda ciddi hasarların meydana gelmesine sebebiyet verebilmektedir. Bu nedenle, zeminlerin dinamik yükler altında doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaca yönelik olarak, modelleme sırasında kullanılacak zemin parametreleri, arazi ve laboratuvar deney ve ölçümleri sonucu elde edilerek, bilgisayar destekli yer davranışı, sıvılaşma ve şev stabilitesi analizleri gerçekleştirilmektedir. Maliyet açısından oldukça pahalı olan bu bölgeleme sonucunda elde edilen haritalar 1/1000 ile 1/25000 arası bir ölçekte olabilmektedir.

Türkiye’de mikrobölgeleme çalışmaları, 17 Ağustos 1999 İzmit depremi sonrasında depremlerin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü’nün girişimleriyle “Deprem Risklerini azaltmak için Mikrobölgeleme” (MERM) adlı çalışmayla başlamıştır. Afet Risk Yönetimi Dünya Enstitüsü (DRM) bu çalışmayı çeşitli kuruluşların desteğiyle yürütmüş ve 2004 yılında

“Belediyeler için Sismik Mikrobölgeleme El Kitabı” yayınlanmıştır [14]. Bu el kitabında mikrobölgeleme de yapılması gereken başlıca çalışmalar altı ana başlık halinde sunulmuştur. Bunlar; mikrobölgeleme için deprem tehlikesinin belirlenmesi, yer sarsıntısı şiddeti sınırlama potansiyelinin tespiti, toprak kayması olasılığı, depremle ilişkili su baskınlarını gösteren harita çalışmaları ve yüzeysel faylanma ve tektonik hareketlerin olduğu aktif fay hatlarının tespiti şeklindedir.

Mühendislik bilimleri ve sosyal bilimler kentsel alanlarda deprem etkisini değerlendirmeye katkıda bulunmaktadır [15]. Buna göre, Sismoloji ve Kentleşme çalışmalarının birleşimiyle üç farklı aşamada sınıflandırma yapılabilmektedir.

- a. Sismik mikrobölgeleme gibi değerlendirme teknikleri kullanmak,
- b. Kentsel bölgeleme gibi afet öncesi ve afet sonrası planlama ve uygulama stratejileri geliştirmek
- c. Risk yönetimi için karar vermede konunun uzmanlarını görüşlerine başvurmak

Mesafe, yüzey jeolojisi veya topoğrafya gibi yerel zemin koşulları bölgedeki pik yer ivmesi (PGA) değerlerini büyütür veya azaltabilir [16]. Uzun mesafeli depremlerin, yer hareketlerini büyüten alüvyon zemin seviyeleri üzerine yerleşen, yüksek yoğunluklu kentsel alanlar üzerinde yıkıcı etkileri olabilir. Mikrobölgeleme çalışmalarının kentsel alanlarda sismik risk değerlendirmesine artan oranlarda katkısı bulunmaktadır [15]. Kentsel sismik mikrobölgeleme, Panza vd. [17], Faccioli ve Pessina [18], Ansal [19] ve Parvez vd. [20] gibi değişik araştırmacılar tarafından çalışılmıştır.

Parvez vd. tarafından, depreme dayanıklı bina tasarımı için iyi tanımlanmış sismik girdi parametreleri ve kentsel planlama sürecinde politik, sosyo-ekonomik, çevresel ve zemin hakkındaki bilgilerin sismik mikrobölgeleme parametreleriyle birlikte kullanımını sağlayan birleştirilmiş uzman sistemler için proje başlatılmıştır.

Kılıç vd. [21] tarafından, İstanbul Zeytinburnu çalışma alanı, mikrobölgeleme çalışmaları için eldeki geoteknik bilgileri değerlendirmek ve analiz etmek amacıyla

250 *250 m hücrelere bölünmüştür. Çalışma alanında temsili zemin profilleri, yapılan zemin sondajlarına dayalı olarak anakaya seviyesi üzerinde tanımlanmıştır. Her hücreye ait temsili zemin profilleri, o hücrede mevcut olan bir veya daha çok sondaj verisi kullanılarak oluşturulurken, hiçbir sondaj verisinin olmadığı hücreler için komşu hücrelerdeki veriler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, CBS uygulamaları kullanılarak ve araştırma noktaları arasında doğrusal interpolasyon yapılarak haritalanmıştır. Olası bir deprem sırasında bölgenin davranışı 1-D davranış analizi ile araştırılmıştır ve mikrobölgeleme haritaları, yeni mikrobölgeleme kılavuzuna uygun olarak yer sarsıntısı şiddetine göre hazırlanmıştır [22, 23].

2.5. Literatürdeki Çalışmalar

Literatürde, mikrobölgeleme konusunda yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar depremlerle direkt bağlantılı zemin büyütmesi, sıvılaşma ve heyelan potansiyeli gibi tek kritere bağlı olarak yapılmış olabileceği gibi, topoğrafik şartları da dikkate alınarak yapılan, birden çok kriteri kapsayan mikrobölgeleme çalışmaları da mevcuttur.

Mexico şehrinin hakim periyot haritası, 1985-1992 yılları arasında yapılmış mikrotremor ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak yenilenmiştir. Mexico şehri için yerel zemin koşullarının etkisi, tek tabakalı doğrusal model ile analiz edilmiştir. Mikrotremor ölçümlerinden elde edilen hakim periyot değerlerinin, kuvvetli yer hareketi kayıtları ve transfer fonksiyonlarından elde edilenler ile iyi bir uyum içinde oldukları gösterilmiştir [24].

Barquisimeto (Venezuela), Kuvaterner birimler üzerinde hızla büyüyen bir şehir olarak tanımlanmış ve sismik mikrobölgeleme çalışmalarında, zemin hakim periyodu ve anakaya derinliği haritalanmıştır. Mikrotremor ölçümlerinden elde edilen zemin hakim periyodu değerleri, ortalaması 0,5 s olmak üzere 0,2-1,1 s arasında değişmektedir. Yapılan 77 sondaj ve 11 sismik kırılma ölçümünden elde edilen veriler ışığında anakaya derinliğinin 5-15 m arasında olduğu, kayma dalgası hızının 400-650 m/s olduğu belirtilmektedir. Elde edilen mikrobölgeleme haritalarında zemin

hakim periodu değerleri ile zemin tabakası kalınlığının uyumlu olduğu grlmştir [25].

Gündüz [26] tarafından, İstanbul'un Avcılar, Esenyurt, Yakuplu, Beylikdüzü, Kıracı, Grþınar ve Beylikdüzü belediye sınırları içerisinde, 550 civarında SPT verisi kullanılarak, eşdeğer kayma dalgası hızları hesaplanmış ve elde edilen bu hızlardan bölgenin V_{s30} , zemin büyütmesi ve zemin hakim titreşim periyodu haritaları oluşturulmuştur.

Gaull vd. [27] tarafından, Batı Avustralya eyaletinin Perth şehrinin mikrobölgeleme haritası, mikrotremor spektral oranları kullanılarak hazırlanmıştır. Aynı çalışmada deprem sırasındaki spektral oranlar ile mikrotremor ölçümleri arasında kuvvetli korelasyonlar tespit edilmiştir. Mikrotremor gibi düşük birim deformasyonlu titreşimlerden elde edilen verilerin, deprem sırasındaki kuvvetli yer hareketleri için bir öngörü sağlayabileceği yine sismik tehlike değerlendirmesinde mikrotremor ölçümlerinin zemin büyütmesini belirlemede faydalı olabileceği belirtilmiştir.

Dikmen ve Mirzaoğlu [28], yaptıkları çalışmalarında, 151 noktada yapılan sismik gürültü ölçümleriyle Bursa ili Yenişehir İlçesinin sismik mikrobölgeleme haritalarını elde etmeye çalışmışlardır. Çalışma alanında Nakamura tekniğine göre sismik büyütme ve zemin hakim periyodunun değişimini gösteren haritalar sunmuşlardır. Analizlerde, havzanın merkeziyle karşılaştırıldığında kuzey ve güney kenarlarında nispeten daha yüksek büyütme oranları ve hakim periyot değerleri tespit edilmiştir.

Ansal vd. [29] Afyon ili Dinar ilçesindeki Mikrobölgeleme alışmalarını, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) metodolojisi kullanarak gerçekleştirmiş ve zemin büyütmelerini mikrotremor spektral oranlarından tahmin etmişlerdir. Arazi penetrasyon testi ve sismik dalga hızı ölçüm sonuçları yanı sıra hasar dağılımı mikrotremor kayıtlarından elde edilen büyütme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, yerel zemin koşulları ve zemin büyütmelerini değerlendirmek için mikrotremor spektral oranların uygulanabilirliğini göstermiştir.

Topal vd. [30], Bursa ili, Yenişehir ilçesinde mevcut ve gelecekteki yerleşim alanları için zemin koşullarını belirlemek amacıyla, jeolojik, geoteknik, sismotektonik ve hidrojeolojik verileri mikrobölgeleme çalışmalarında dikkate almışlardır. Bölgeyi eğim ve yön haritalarına, sıvılaşma potansiyeline ve kohezyonlu zeminlerin şişme davranışına bağlı olarak iki geoteknik bölgeye ayırmışlardır.

Hasançebi ve Ulusay [31] çalışmalarında, Bursa ili, Yenişehir ilçesinde zemin büyütmeleleriyle mikrotremor ölçümlerini karşılaştırmışlardır. Üç farklı metod (ampirik bağıntılara dayalı kayma dalgası hızı, SHAKE programında bir boyutlu davranış analizi ve mikrotremor verisi) kullanılarak mikrobölgeleme haritaları oluşturulmuştur. Zemin hakim periyodu, SHAKE modellemesiyle elde edilmiş ve mikrotremor verilerinden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma alanında mikrotremor ölçümlerini değerlendirmek için Nakamura tekniği kullanılmıştır. Yenişehir ilçesinin zemin hakim periyodu ve zemin büyütme oranı haritaları elde edilmiştir.

Motamed vd. [32] sismik mikrobölgeleme kapsamında Bam'da (İran) yaptıkları çalışmada eş büyütme oranı ve eş frekans haritalarını hazırlamışlardır. Bam'da zemin tipinin çok sert ve birçok alanda 7,5 m derinlikte 750 m/s kayma dalgası hızına ulaştığı görülmüştür. Ancak, büyütme oranları nispeten yüksek değerler vermiştir. Sediman kalınlığı, mikrobölgeleme çalışmaları için bir ön araç olarak mikrotremor sonuçlarından tahmin edilmiştir.

Grasso ve Maugeri [33] Catania (İtalya) şehrinde 11 Ocak 1693'de meydana gelen depremi maksimum senaryo deprem olarak kabul ederek, temsili zemin profilleri üzerinde 1-D eşdeğer doğrusal ve 2-D doğrusal analizler yapmışlar ve yüzeydeki pik yer ivmesi ve spektral ivme değerlerini elde edilmişlerdir. Çalışma alanında yaklaşık 1200 sondaj ve su sondajı verileri kullanılarak zemin etkisi değerlendirilmiştir. Catania şehri pik yer ivmesi dikkate alınarak farklı birkaç bölgeye ayrılmış ve mikrobölgeleme haritaları oluşturulmuştur.

Ansal vd. [34] İstanbul Zeytiburnu bölgesinde yaptıkları çalışmada, sismik mikrobölgeleme ve deprem hasar senaryolarını dikkate alan iki aşamalı bir metodoloji sunmuşlardır. Birinci aşamada, kentsel çalışma alanı için, tahmini deprem

karakteristiğine göre mikrobölgeleme haritaları üretilmekte ve bu aşamada yerel zemin şartları, mühendislik ana kayasına kadar uzatılan temsili zemin profilleri üzerinde gerçekleştirilen 1-D davranış analizlerinden elde edilen parametrelere göre dikkate alınmaktadır. İkinci aşamada ise boru hatlarının ve binaların hasar görülebilirliği yer hareket parametrelerine dayalı olarak belirlenmektedir. Sonuçlar basitleştirilmiş ampirik yöntemlere kıyasla zemin yüzeyinde deprem özelliklerinin hesaplanmasında zemin koşullarının ve zemin davranış analizlerini önemini göstermiştir.

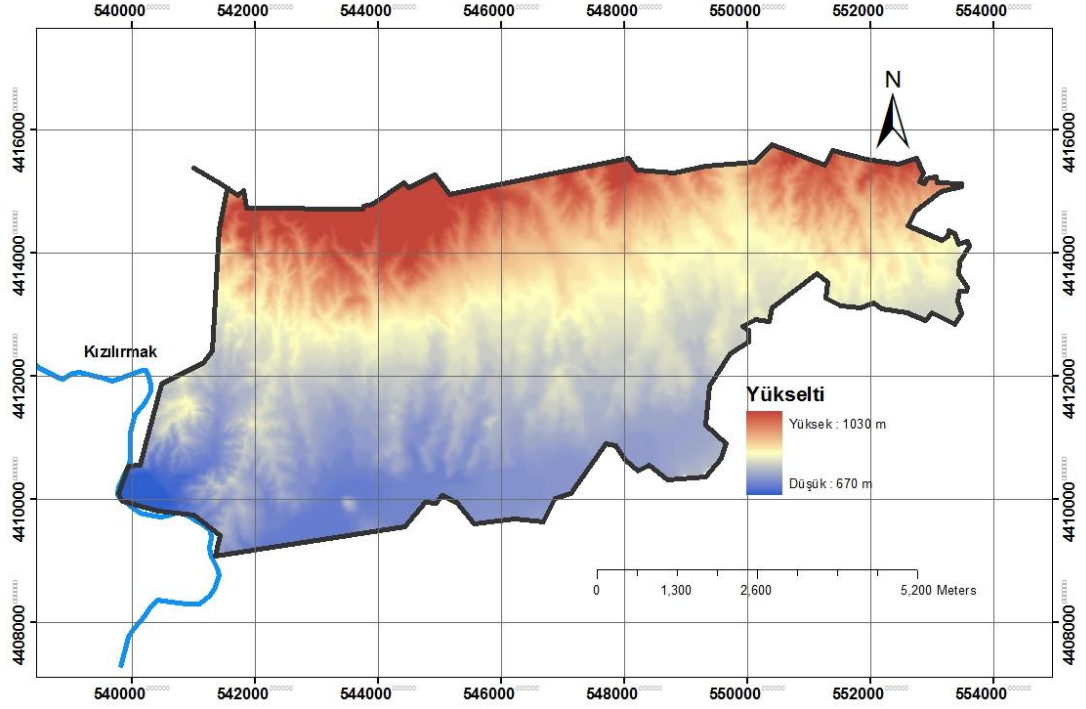
Eskişar vd. [35] İzmir Körfezi'nin kuzey kıyısında Çiğli ve Karşıyaka'yı içine alan bölgede, olasılıksal ve deterministik sismik tehlike analizi sonuçlarına göre belirlenen $M_w=6,5$ büyüklüğünde meydana gelecek senaryo depremin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, uzun ve kısa mesafe deprem etkilerine göre zemin büyütmesi, pik yer ivmesi ve maksimum yüzey spektral ivme haritaları, sıvılaşma potansiyeli ve önerilen tasarım spektrumu sunulmuştur. En yüksek büyütme değerleri, çalışma alanının güneybatı bölümünde görülmüştür. Zemin büyütmesi, yakın mesafe depreme göre uzun mesafe depremlerde daha yüksek değerler vermiştir. Çalışma alanında sıvılaşma potansiyelinin ise küçük lokasyonlar dışında düşük-orta seviyede olduğu görülmüştür.

3. KIRIKKALENİN JEOLJİSİ, TEKTONİĞİ VE SİSMİK AKTİVİTESİ

3.1. Coğrafi Konum ve Morfoloji

Kırıkkale (çalışma alanı), İç Anadolu bölgesinde başkent Ankara'ya 75 km uzaklıkta, batısında Ankara, kuzeyinde Çankırı, güneyinde Kırşehir, doğusunda Çorum ve Yozgat İlleri bulunan Türkiye'nin başkentini Doğu Anadolu, Karadeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgelerine bağlayan yolların kavşağında bulunan, Türkiye'nin stratejik kurumları olan Makine Kimya Endüstrisi'nin Silah, Mühimmat, Top ve Ağır Silah fabrikalarının, TÜPRAŞ'ın Kırıkkale rafinerisinin bulunduğu, ekonomik olarak hızla gelişen bir şehirdir.

İl sınırlarında ovalık alanlar fazla bulunmamaktadır. En önemlisi Kırıkkale Ovası'dır. Kırıkkale Ovası; güneyde Denek Dağı'nın batısı ile kuzeyde Çamlıca ve Karakaya Tepeleri arasında yer almaktadır. Kuzeydeki tepeler meyilli bir şekilde inerek ovayla birleşmektedirler. Kırıkkale yerleşim alanı bu birleşim bölgesi üzerine kurulmuştur. Kırıkkale Ovası, Çoruhözü Deresi'nin Kızılırmak'a doğru yaklaştığı bölge boyunca genişlemektedir. Bu bölgenin yüksekliği 750 m civarındadır. Kırıkkale İl sınırları içerisinde bulunan yaylaların yükseklikleri 1200-1600 m arasında değişmektedir. Küre Dağı'ndaki Hodar, Bedesten, Kamışlı, Sarıkaya, Koçu Dağı'ndaki Koçu, Denek dağındaki Gümüşpınar, Pehlivanlı, Suludere, Yeşilkaya ve Azgın Yaylaları bölgede bilinen en önemli yaylalardır. İl sınırlarının ortalama rakımı 700 m dir. Bölgenin en yüksek dağları Koçu Dağı, Denek Dağı ve Küre Dağı'dır. Koçu Dağı 4 km genişlik ve 7 km uzunluğa sahip olup kuzeybatı-güneydoğu yönünde uzanmaktadır ve en yüksek noktası Yığıltepe'dir (1278 m). Denek Dağı Keskin ile İzzettin Köyü arasında Çoruhözü vadisinin güneyinde, Güney-Güneydoğu yönü boyunca uzanmaktadır ve en yüksek noktaları; Gavur Tepesi (1742 m) ile Bozkaya Tepesi (1577 m)'dir. Denek Dağı sırasının uzunluğu 44 km, genişliği 30 km olup bölgenin en uzun, en geniş ve en yüksek kütesini oluşturmaktadır. Küre Dağı ise kuzeydoğu-güneybatı yönünde uzanmaktadır ve en yüksek yeri Küre Tepesi (1450 m.)'dir [36]. Kırıkkale yerleşim alanının yükselti haritası Şekil 3.1'de, eğim haritası ise Şekil 3.2'de verilmiştir.



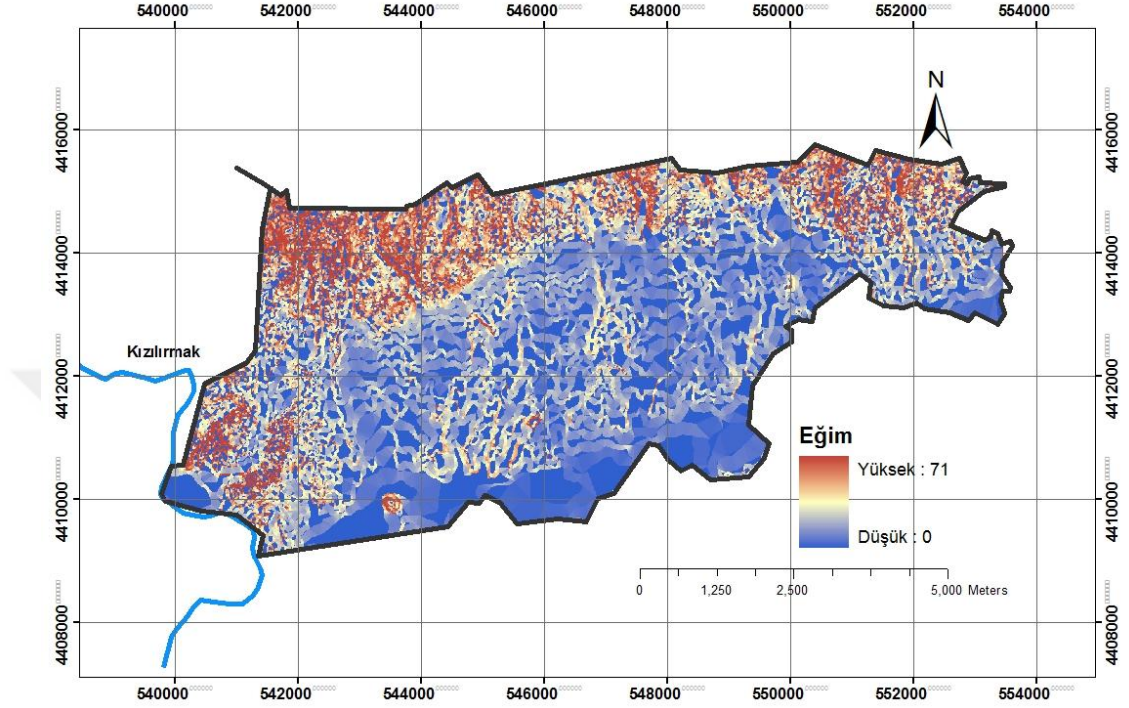
Şekil 3. 1. Kırıkkale yerleşim alanı yükselti haritası

İldeki en önemli akarsular Kızılırmak, Çoruhözü Deresi, Delice Çayı ve Okun Deresi'dir. Kızılırmak il sınırlarına güneyde Çelebi ilçesi'nden girmekte, kuzey yönünde akarak şehir merkezine yakın bölgede kuzeybatıya yönelmekte ve il sınırlarından çıkıp kuzeyde Çankırı-Kırıkkale il sınırını oluşturmaktadır. Kızılırmak'ın en önemli kollarından biri Delice Çayı'dır. Yozgat sınırı boyunca bir müddet aktıktan sonra Kırıkkale'nin Delice ilçesi merkezine yaklaşır ve daha sonra tekrar bu iki ilin sınırı boyunca güneydoğudan il topraklarını terk eder. Çayın il içerisinde kalan kesimi yaklaşık 50 km uzunluğundadır [36].

Çoruhözü Deresi, 48 km uzunluğa sahiptir. İzzettin Köyü'nün üst kısımlarından doğar ve İzzettin-Balışeyh arasında demiryoluna paralel olarak akar ve Kırıkkale şehir merkezinden geçerek Kızılırmak'a karışır [36].

Okun Deresi, Elmadağ'ın güney eteklerinden akan suların meydana getirdiği Balaban ve Sarılıöz Çayları, Kılıçlar Kasabası yakınlarında birleşerek Okun Deresi'ni meydana

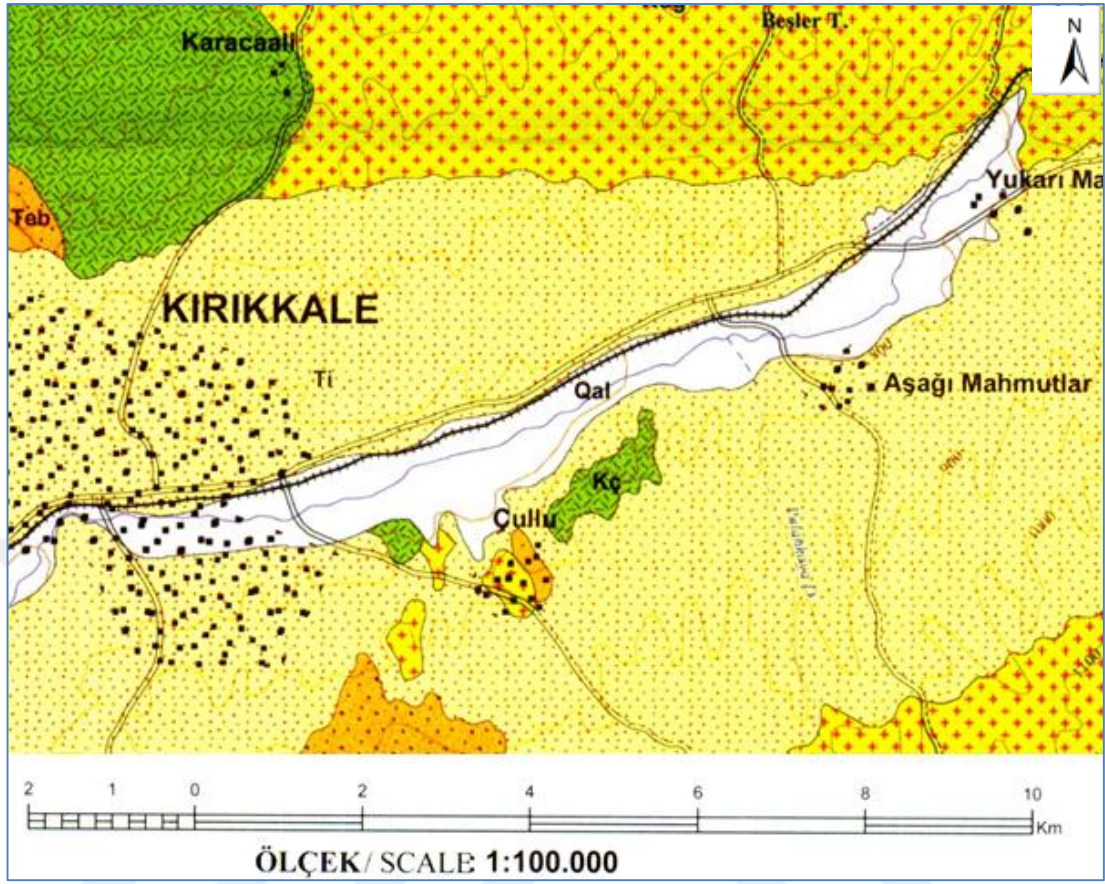
getirmektedirler. Yaklaşık 13 km uzunluğa sahip olan dere, Irmak Kasabası yakınlarında Kızılırmak'a kavuşmaktadır [36].



Şekil 3. 2. Kırıkkale yerleşim alanı eğim haritası

3.2. Genel Jeoloji

Kırıkkale ve yakın çevresi hakkında MTA Genel Müdürlüğü ile DSİ Genel Müdürlüğü elemanlarının yapmış olduğu çalışmalar sonucu oluşturulan jeolojik haritalar mevcuttur. MTA Genel Müdürlüğü mühendislerince hazırlanan 1/25.000 ölçekli harita Şekil 3.3'de verilmiştir. Bölgedeki hakim litolojiler aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.



Şekil 3. 3. Kırıkkale ve yakın civarının jeoloji haritası [37]

3.2.1. Tortul Kayaçlar

İncelenen alanda Senozoik'e ait tortul kayaçlar bulunmaktadır. Bunlar, Eosene ait konglomera, kumtaşı ve kireçtaşı ardalanması, Neojene ait konglomera, kumtaşı ve çimentolanmamış çakıl, kum ve killer ile Kuvaternere ait çakıl, kum ve kil birimleridir. Formasyonlar yaşlıdan gence doğru aşağıda verilmiştir.

3.2.1.1. Eosen Birimleri

Formasyon konglomera, kumtaşı, kiltası ve kireçtaşı birimlerinin ardalanması ile oluşmuştur. Tabaka kalınlıkları 10 ile 60 cm arasında değişmektedir. Kiltası ve kumtaşı katmanları 10-20 cm kalınlıkta, kireçtaşı katmanları daha kalın olup 30-60 cm arasındadır. Kireçtaşı tabakaları kahve renkli, kirli sarı, yer yer az boşluklu, sert kırılğan; diğer birimler ise gri, yeşil, boz renkli, sıkı çimentolu ve çok az boşlukludurlar.

3.2.1.2. Neojen Birimleri

Formasyon, altta konglomera ve kumtaşı, üst seviyelerde çakıl, kum ve kil birimlerinden oluşmaktadır. Tabakalar belirsiz olup, birimler kahve renkli, sert, az boşluklu ve ardalanmalıdır. Çakıllar çoğunlukla granit, az miktarda da ofiyolitten oluşmaktadır. Formasyonun üst seviyesindeki çakıl ve kum elemanları granit, ofiyolit, radyolarit ve kireçtaşından oluşmakta olup, koyu, açık kahve renkli bol boşlukludurlar. Tabaka kalınlıkları 30 ve 50 cm arasında değişmektedir.

3.2.1.3. Kuvaterner Birimleri

Kuvaterner oluşukları çakıl, kum, silt ve kilden oluşmakta olup yaygın olarak Kızılırmak ve Çoruhözü vadisinde bulunmaktadır. Çoruhözü vadisinde ve özellikle Kırıkkale–Aşağı Mahmutlar arasında çakıl oranı biraz fazladır. Kızılırmak vadisi ile Balışeyh civarında killi ve siltli birimler çoğunlukta olup, formasyon boz renkli, gri, bol boşluklu ve 25-30 cm arasında tabaka kalınlıklarına sahiptir.

Kırıkkale ve çevresinde yer alan birimler yaşlı birimden genç birime doğru aşağıda ayrıntılı şekilde verilmiştir.

3.2.2. Bozçaldağ Formasyonu

Beyaz renkli kristalize kireçtaşlarından oluşur. Birimi oluşturan kayaçların mostra yüzeyleri siyahımsı gri renkte, kırılma yüzeyleri beyaz renkli olmakla beraber özellikle Çipideresi civarında muhtemelen demiroksitce zengin suların etkisiyle pembe görünüm kazanmıştır. Mermerler genellikle basınç metamorfizması sonucu kristalen mozaik bir doku kazanmış, eklemli yapılar çok iyi gelişmiştir. Bölgede mermerler diğer birimlerle daima tektonik olarak ilişkilidir. Plütonik ve yüzey kayaçları tarafından kesilmişler ve yer yer bunlar üzerinde anklavlar şeklinde bulunmaktadır.

3.2.3. Kasımağa Formasyonu

Bölgede bazalt, diyabaz, gabro, tuf, şarabi renkli kireçtaşı, çamurtaşı ve radyolarit gibi kayaçlardan oluşan birim, Seymen [38] tarafından, Ankara Melanjı içinde kabul edilmektedir. Formasyonun en altta gabro-mikrogabro, bazalt ve gri ve yeşilimsi bazaltik tüflerle başlar; üste doğru tüfler içinde giderek karbonat oranı artarak çört bantlı kireçtaşı, radyolarit bantları ile ardalanmalar şeklinde devam eder. Üste doğru çört bantlı kireçtaşları birim içinde daha fazla yer almaktadır. Birim içinde daha üste doğru çört bantlı kireçtaşları azalmakta ve kumtaşı ve silt taşları yaygın olarak görülmektedir. Ayrıca, Bozçaldağ formasyonunun Kasımağa formasyonu üzerine gelmesi neticesinde, Bozçaldağ formasyonunun parçaları, Kasımağa formasyonu içinde tektonik olarak gözlenir.

3.2.4. Ceritkale Formasyonu (ed)

Bölgede eosenin sığ denizel kesimini temsil eder. Altta sığ denizel konglomeralarla başlar, üste doğru orta kalın tabakalı kumtaşı ve bu kumtaşları ile arakatlı kireçtaşlarına geçer ve yer yer çapraz tabaka sunar. Ceritkale civarında en iyi şekilde gözlemlendiği için MTA [39] tarafından bu ad verilmiştir.

Formasyon asidik mağmanın çeşitli evrelerine ait çakılları, gabro, bazalt, pelajik kireçtaşları ve tuf gibi Kasımağa formasyonuna ait çakılları ve mermer çakıllarını içinde barındırır. Genelde üzerinde buldukları birimlerden aldıkları çakıllar daha hakimdir. Çakıllar çeşitli boyutlarda, genellikle 3 – 10 cm civarında ve yuvarlaktırlar, çok az karbonat ve çamurla tutturulmuşlardır. Üste doğru kaba kumtaşı, ince taneli çakıltaşı araldanması ve en üst seviyelerde kumtaşı, kıltaşı araldanması şeklinde devam eder. En üst seviyeleri arasında yer yer kumlu kireçtaşı seviyeleride gözlenir. Kumtaşları genellikle karbonat çimentoludur. Alt kesimlerde tabakalanma ve derecelenme az belirgin olup, üste gidildikçe ise belirginleşirler. Kumtaşlarında üste doğru tane boyutu incelik. Kil ve karbonat oranı artar. Tane boyutu küçüldükçe ve karbonat oranı arttıkça formasyon içinde bulunan nummulitler irileşir. Tabakalar değişik yerde değişik kalınlıklar sunarlar.

Bölgede birimin alt dokanağı Kartal formasyonu ile geçişlidir. Ama genelde kendisinden yaşlı birimler üzerine diskordan olarak oturur. Üstte Çayraz formasyonu ile geçişlidir. İncik ve Kızılrırmak formasyonu tarafından diskordan olarak örtülür. Ceritkale civarında formayonun kalınlığı MTA [39] tarafından yaklaşık 110 m civarındadır. Formasyonunu alt kesimleri düşey ve yanal yönde Karasal Kartal 2 formasyonuna geçmektedir.

3.2.5. Kartal formasyonu (eg)

Genelde karasal bir formasyondur. Alt kesimleri kırmızı görünümlü belirsiz tabakalı, çok kötü boylanmalı yamaç molozları, üste doğru kanal fasiyesinde gelişmiş çapraz laminalı çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı araldanmasından oluşur. Bu birime ilk önce Tuz gölü – Haymana havzasında çalışan Rigo de Richi ve Cortesini [40], Kartal formasyonu adını vermiştir. Eski birimlerin üzerine genelde kızıl renkli, çok kötü boylanmalı yamaç molozları ile başlar. Havza ortalarına gidildikçe akarsu ve gölsel fasiyeslere geçer. Çakıllar genelde kırmızıya çalan az miktarda bir çamur içinde bulunur. Bazı yerlerde çamur oranı artar. Moloz akmasının görüldüğü kısımlarda birimde bir düzen görülmez. Çok az tutturulmuştur. Boylanma ve derecelenme yoktur.

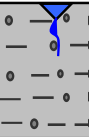
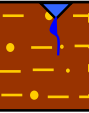

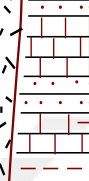



Çalışma alanında kendisinden yaşlı birimler üzerine bilhassa asidik mağma üzerine diskordan olarak oturur. Üst sınırına gelince Ceritkale ve çayraz formasyonu ile geçişlidir. MTA'ya [39] göre formayonun kalınlığı yaklaşık 700 mt. civarındadır.

3.2.6. Kızılırmak Formasyonu (ek)

Tutturulmamış yamaç molozu, kumtaşı, çamurtaşı ve yer yer jips ara seviyesi ve merceklerinden oluşur. Ayrıca bazı yerlerde tuf ve kireçtaşı seviyeleri içerir. Çankırı ve Çorum havzasında Birgili vd. [41] tarafından, Kızılırmak formasyonu adı verilmiştir. Kızılırmak formasyonu çalışma alanında karasal koşullarda oluşmuş en genç formasyonu oluşturur. Bu formasyonda yamaçlarda, akarsu ve gölssel ortamlarda çökelmiştir. Yamaçlarda bolca çamur içinde çakıltaşıdan kum boyutuna kadar bulunan çeşitli boyuttaki malzemeleri içerir. Çamurun renginin kırmızı olması sebebiyle formasyon genelde kırmızı renklidir. Çakıllar yöreye göre üzerinde buldukları eski birimlerden türemişlerdir ve çoğunlukla tutturulmamışlardır. Havza ortasına gidildikçe çapraz tabakalanma, oygu-dolgu izi ve kanal yapıları gösteren kesimlere geçilir. Burdaki birimler çakıl, kum ve çamurtaşlarıdır. MTA'ya [39] göre formayonun kalınlığı yaklaşık 100 m civarındadır. Birim içindeki yamaç molozu, akarsu ve gölssel fasiyesler kendi aralarında yanal geçişlidir.

3.2.7. Kuvaterner (Q)

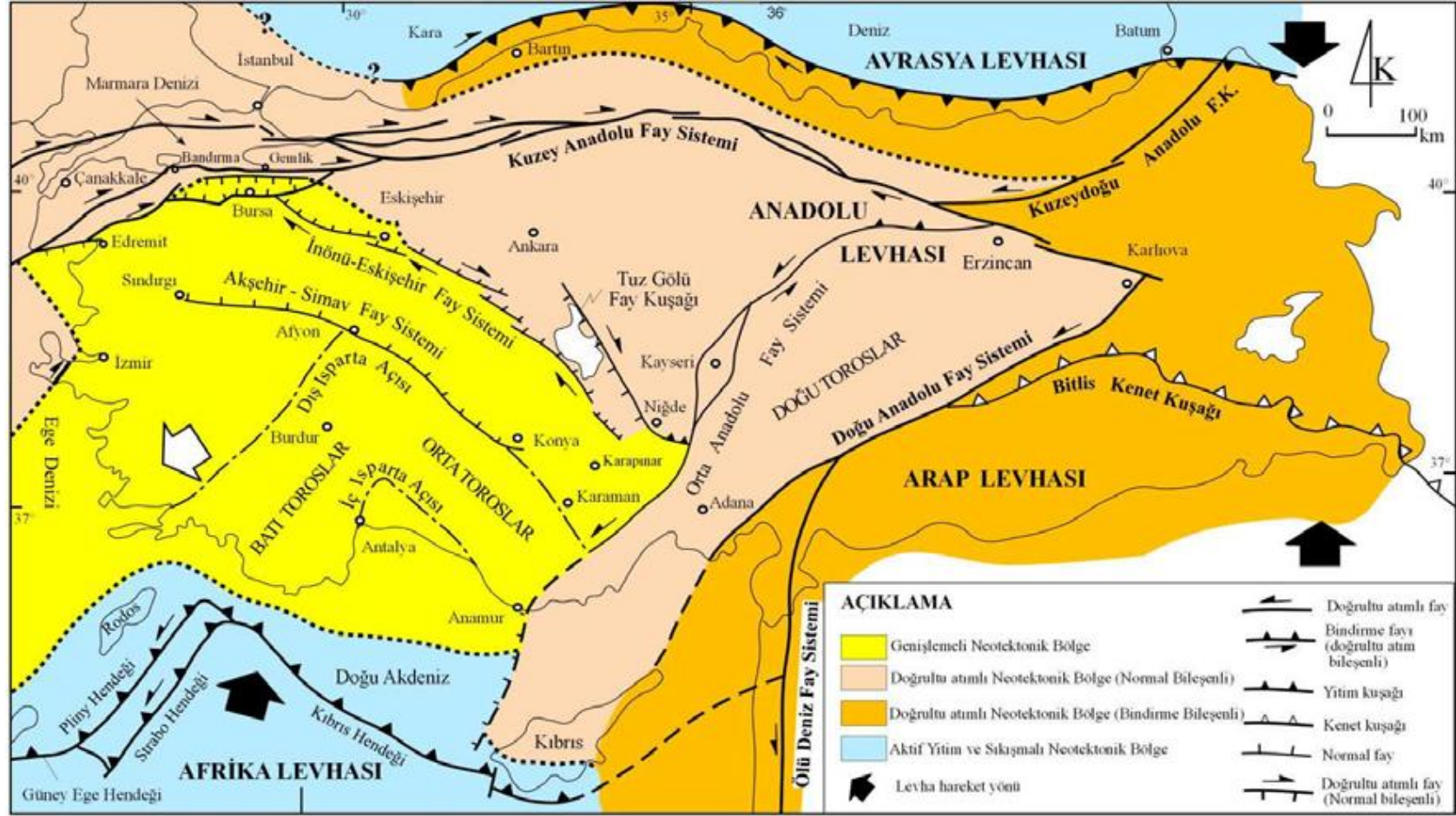
Bölgede Kuvaterner genellikle alüvyon ile temsil edilmiştir. Bilhassa Kızılırmak nehri boyunca olmak üzere diğer nehir ve dereler boyunca yüzeyler. Bozumsu kırmızımsı renkte toprak, kil, silt, kum karışımından meydana gelir. Birimler tutturulmamıştır. Tüm eski birimlerin malzemesini içerir. Bölgenin en verimli tarım toprağını oluşturur. Bölgedeki birimlerin stratigrafik dikme kesiti Şekil 3.4'de verilmiştir.

JEOLOJİK ZAMAN BİRİMLERİ				KALINLIK	Stratigrafi	Litoloji	Fiziksel Özellikleri	Hidrolojik Kimyasal Özellikler
Zaman	Devir	Alt Devir	Devre					
SENOZOİK	KUATERNER	KUVATERNER				Çakıllı kum, kil	Gri boz renkli, bol boşluklu, killi, ÇAKIL ve KUM	Bol yer altı suyu bulunmaktadır
			TERSİYER	NEOJEN	PLİYÖSEN		Çakıl, kum, kil	Kirli sarı - kahve renkli, çimentolanmamış
	MIYÖSEN				Bazalt, konglomera kumtaşı	Sert kırılğan, siyah renkli	Az yer altı suyu içerir	
	PALEOJEN	EOSEN		Konglomera Kumtaşı, Kireçtaşı, kil taşı	Çimentolanmış, ince tabakalı, kahve renkli ve yeşilimsi gri ara bantlı	Yer altı suyu içerir		
MESOZOİK	JURA				Granit	Gri, beyaz, boz renkli, yer yer koyu gri ve siyah, sert ufalanabilir.	Yer altı suyu içerir	
			Serpantin Radyalorit, Kireçtaşı	Koyu yeşil, siyahımsı renk ağırlıklı yer yer kırmızı ve gri boz renkli	Yer altı suyu içerir			
			Mermer					

Şekil 3. 4. Kırıkkale İli zeminlerine ait stratigrafik dikme kesiti [42]

3.3. Tektonik

Ülkemiz, fayların nitelikleri ve ürettikleri depremlerin özelliklerine göre Koçyiğit [43] tarafından 4 farklı neotektonik bölgeye ayrılmıştır. (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6)



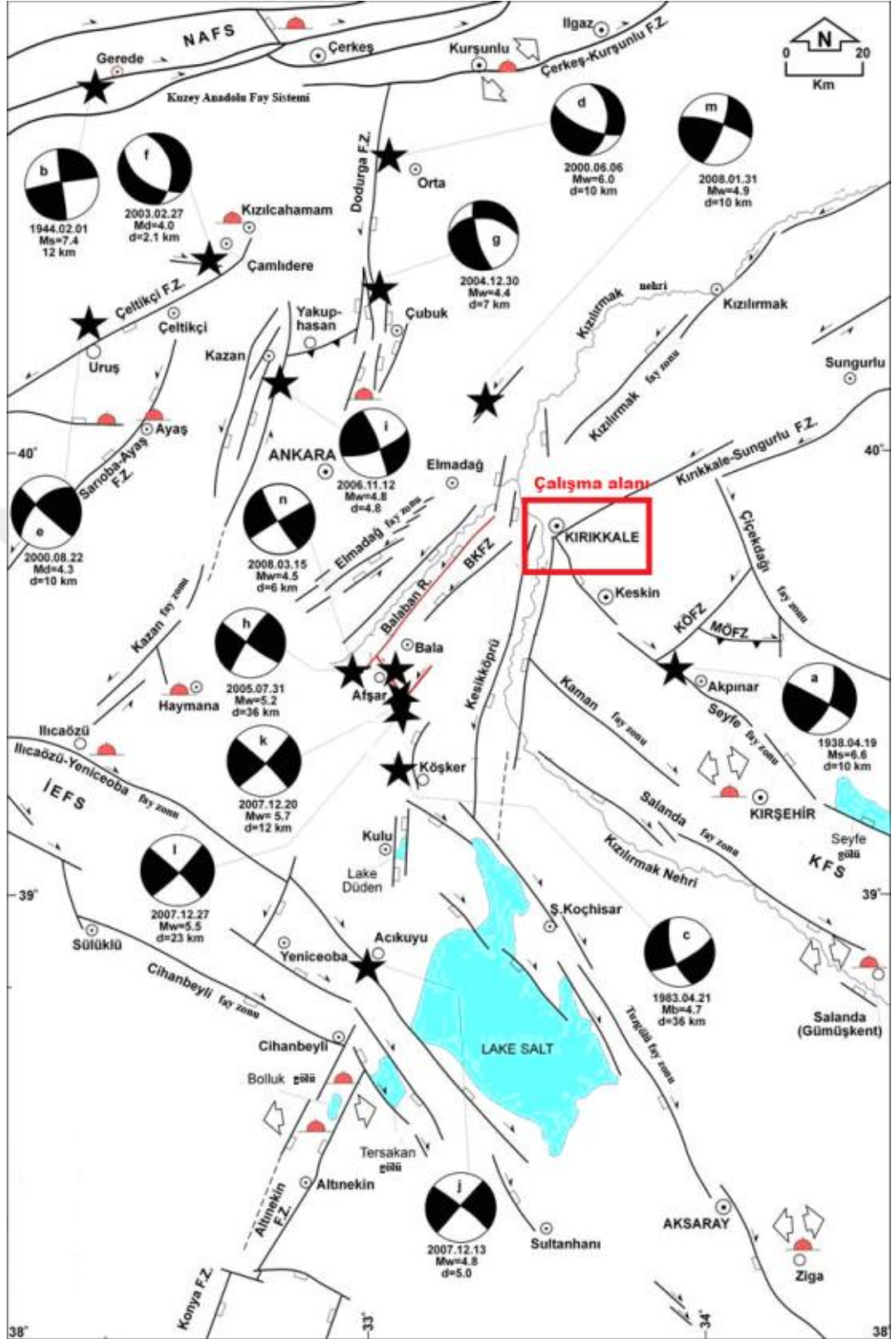
Şekil 3. 5. Türkiye’yi etkileyen aktif tektonik bölgeler [43]

Şekil 3.5’de, Ankara ve civarının bulunduğu bölgenin İnönü-Eskişehir fay sistemi ile ayrılmış olduğu ve bu sistemin kuzey, kuzeydoğu ve doğusunda kalan bölgenin doğrultu atımlı faylarla karakterize edilen, doğrultu atımlı neotektonik bölge (normal bileşenli); batı, güneybatı ve güneyinde kalan bölgenin de verev atımlı normal faylarla karakterize edilen genişlemeli neotektonik bölge şeklinde tanımlandığı görülmektedir.

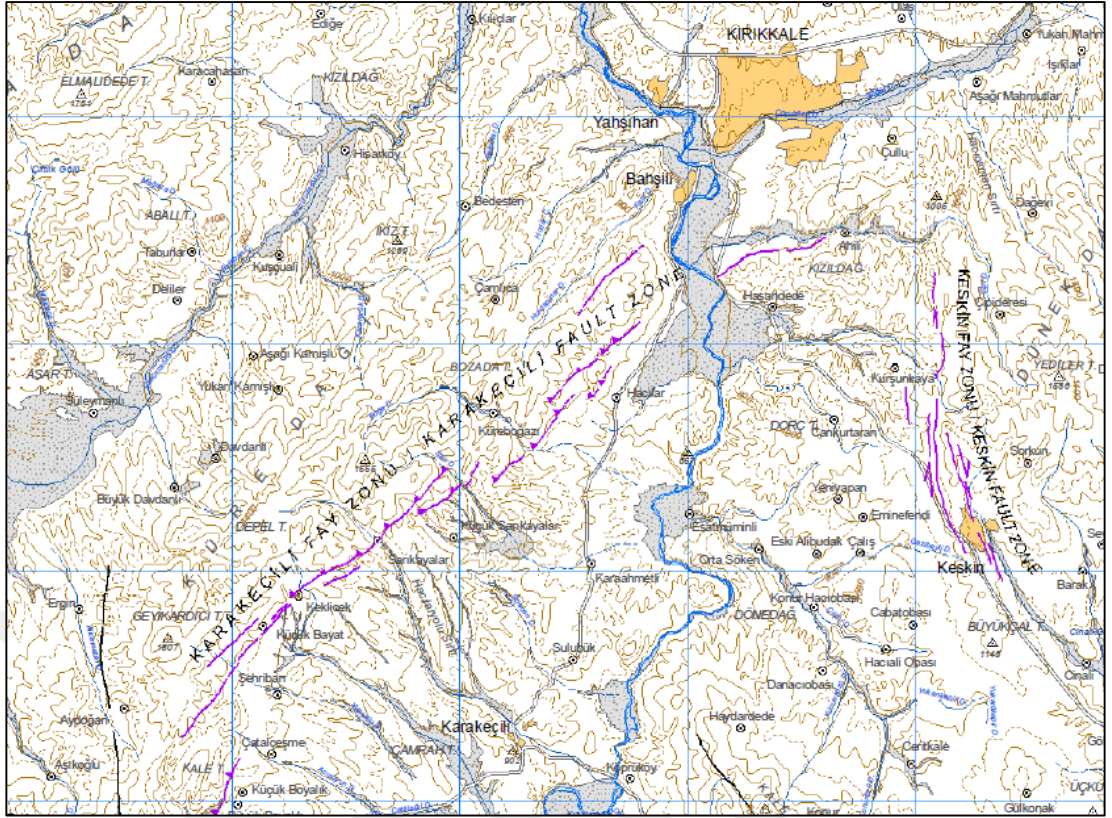
Orta Anadolu’nun neotektonoği üzerine yapılan çalışmalar ve ileri sürülen görüşler aşğıdaki gibidir.

Seyitoğlu vd. [44] tarafından yapılan çalışmada, Ankara’nın Edige, Yakacık ve Yuva köyleri civarında sıkışma tektonizmasının çarpışma sonrası erken Miyosen de sona erdiği, açılma rejiminin ise erken Miyosende başlayıp Miyosen sonunda son bulduğu ve Neojen ve temel kayalar arasındaki bağlantının bir sıkışmalı rejimi temsil etmediği belirtilmiştir.

Seyitoğlu vd [45, 46, 47] tarafından yapılan çalışmalarda ise bölgede etkin olan açılma rejiminin erken Pliyosen’de sona erdiği, daha sonra güneydoğu-kuzeybatı doğrultulu bir sıkışma rejiminin etkin olduğu ve daha sonra da Kuzey Anadolu Fayı’nın hareketlerine bağlı olarak gelişen sıkışmalı rejimin etkin olduğu belirtilmiştir.



Şekil 3. 6. Kırıkkale'nin etrafındaki önemli depremlerin merkez üstlerinin dağılımı [48]



Şekil 3. 7. Kırıkkale'nin etrafındaki önemli faylar [37]

Karaca [49] tarafından yapılan çalışmada, Ankara'nın 40 km kuzeybatısında Karalar (Kazan) ve Alibey (Kızılcahamam) köyleri civarında Miyosen sonrası dönemde kuzey-güney yönlü sıkışma, Pliyosen döneminde doğu-batı yönlü açılma ve Kuvaterner döneminde de kuzeybatı-güneydoğu yönlü açılma rejiminin etkin olduğunu belirtilmiştir.

İnceleme sahası yakınında önemli tektonik yapılar, Kuzeybatı-Güneydoğu yönlü doğrultu atımlı Tuzgözü Fay Zonu, Kuzey-Kuzeydoğu doğrultulu Karakeçili Fayı Kuzeybatı-Güneydoğu uzanımlı Seyfe Fay Zonu, Güneybatı-Kuzeydoğu uzanımlı Ezinepazarı fayı ve ülkemizdeki en aktif faylardan birisi olan Doğu-Batı yönünde uzanan Kuzey Anadolu Fayı olarak söylenebilir. Bu fayların özellikleri aşağıda verilmiştir.

3.3.1. Kuzey Anadolu Fay Zonu (K.A.F.Z.)

Kuzey Anadolu Fayı dünyada bilinen doğrultu atımlı fayların önemlilerindedir. Uzunluğu boyunca birçok küçük faya sahiptir. K.A.F.Z. Karadeniz plakası ve Anadolu plakası arasındaki harekete bağlı olarak oluşan sağ yanal doğrultu atımlı, sismolojik olarak aktif ve 1500 km uzunluğa sahip bir fay olarak tanımlanmaktadır [50]. Bu sağ yanal hareketin, doğu Anadolu'daki sıkışma zonundan Anadolu'nun batıya doğru hareketinin sonucu olarak oluştuğu düşünülmektedir [51]. Bu zon doğu Anadolu'dan Yunanistan'a kadar uzanır ve Türkiye'nin tektonik olarak aktif kuzey şehirlerini Anadolu plakasından geniş bir yay şeklinde ayırır. K.A.F.Z., Bingöl ili Karlıova ilçesinde Türkiye'nin bir diğer önemli fay zonu olan Doğu Anadolu Fay Zonu (D.A.F.Z.) ile birleşir [50, 3].

3.3.2. Tuzgölü Fayı

Niğde'nin güneyinden Tuz gölü'nün kuzeyine kadar KB-GD doğrultusunda uzanan 190-200 km uzunlukta, 5-25 km genişlikte, yarı horst graben morfolojisi sunan bu fay zonu birbirine paralel veya yarı paralel faylardan meydana gelmektedir [52]. Tuz gölü fayının güney tarafı sağ yönlü doğrultu atımlı fay karakterindeyken kuzey tarafı batıya doğru eğimli normal fay karakterindedir [53]. Şaroğlu vd. tarafından ise fayın doğrultu atımlı sağ yönlü fay karakterinde olduğu belirtilmiştir [54].

3.3.3. Ezinepazarı Fayı

Bölgenin depremselliğini etkileyen önemli faylardan biriside Reşadiye'nin doğusunda K.A.F.Z. ile kesişen Amasya, Sungurlu yörelerinden geçerek Kırıkkale'nin Delice ilçesinin güneyine kadar uzanan Ezinepazarı fayıdır. Bu fay KD-GB doğrultusunda uzanan, sağ yönlü doğrultu atımlı ve yaklaşık 250 km uzunluğa sahip bir faydır [54]. Şaroğlu vd [55] tarafından, Ezinepazarı civarında gözlemlendiğinden Ezinepazarı Fayı olarak adlandırılmakla birlikte değişik araştırmacılar tarafından da Ezinepazarı-Sungurlu Fay Zonu [56], Sungurlu Fay Zonu [57], Yağmurlu-Ezinepazarı Fay Zonu

[58] ve Kırıkkale-Erbaa Fayı [59] şeklinde farklı isimlerle adlandırılmıştır. Seyitoğlu [60] tarafından GPS verilerine dayanarak yapılan çalışmalar sonucunda bu fay üzerindeki yer değiştirmenin 4 mm/yıl olduğu belirlenmiştir. Medyan ve Gökten [61] tarafından yapılan çalışmalarda genel olarak bu fayın sağ yanal doğrultu atımlı fay olmakla beraber, aynı zamanda Eosen birimleri üzerinde görülen Pliyosen birimleri nedeniyle fayın ters fay karakteri kazanmış olabileceği de belirtilmiştir.

3.3.4. Seyfe Fay Zonu

Seyfe fay zonu, Kuzeybatıda Taşkovan köyü ile Güneydoğuda Hasanlar beldesine kadar uzanan yaklaşık 120 km uzunluğunda, birbirine paralel birkaç yüz metre ile sürekli olmayan 20 km uzunluğa sahip KB-GD uzanımlı sağ yanal doğrultu atımlı normal faylardan oluşan ve Seyfe gölü çöküntü alanını da kontrol eden bir zondur [62]. Dirik [63] tarafından yapılan çalışmada, Mucur, Kırşehir, Keskin ve daha Güneyde Nevşehir civarında yoğunlaşan KB-GD doğrultulu faylar Kırşehir fay seti olarak tanımlanmış ve bu faylar içerisinde Keskin ile Seyfe gölü arasındaki Akpınar fayı ile Kızılırmak'a paralel uzanan Nevşehir'in Kuzeyindeki Salanda fayı bu setin iki önemli fayı olarak belirlenmiştir. Bölgede 19.04.1938 tarihinde meydana gelen Akpınar depremi Seyfe Fay Zonu'nun kuzeybatısında Akpınar segmentinde meydana gelmiştir.

3.3.5. Karakeçili Fayı

Seyitoğlu vd. [64] tarafından yapılan çalışmada, Karakeçili fayının KD GB doğrultulu verev normal fay olduğu, birbirine paralel ve yarı paralel faylardan oluştuğu, aynı zamanda Bala'nın da içerisinde yer aldığı topoğrafik olarak yüksek kesimlerden havza içine doğru alçalan bölümleri kontrol ettiği belirtilmektedir. Ayrıca 30 Temmuz 2005 Bala depreminden sonra, sahada yapılan jeolojik incelemeler ve odak mekanizması çözümlerinde Karakeçili fayı üzerindeki deprem etkinliğinin arttığını belirtmişlerdir.

3.3.6. Kırıkkale ve Çevresinin Depremselliği

Kırıkkale civarında tarihsel dönemde kaydedilen depremler ile ilgili literatürde fazla bilgi bulunmamasıyla birlikte Soysal vd [65] tarafından yayınlanan kataloglardan faydalanılarak Kırıkkale'nin yakın çevresinde olan bazı depremler aşağıda verilmiştir.

110 yılında, 33.50 boylam ve 39.50 enlem koordinatlarında meydana gelen depremin Tuzgözü fayı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu deprem sırasında evleri yıkıldığı bildirilmiştir [66, 67].

12 Ağustos 1668'de Beypazarı'nda ağır hasara neden olan bir deprem meydana gelmiş, bu deprem İstanbul ve İzmir'de de hissedilmiş evlerin bacaları yıkılmış, kasaba ana camisinin minaresi devrilmiş, çarşısı yıkılmış ve 7 kişinin ölümüne neden olmuştur [68, 69].

15 Ağustos 1668'de Ankara'da evlerin ahırların ve kentte bulunan kalenin yıkılmasına ve halkta büyük korku ve endişeye sebebiyet veren bir deprem meydana gelmiştir [68].

28 Eylül 1881 tarihinde merkez üssü 33.60 boylam ve 40.60 enlem olan Io:VIII şiddetinde Çankırı civarında etkili olan, 6,1 büyüklüğünde olduğu bildirilen bir deprem meydana gelmiş ve 12 kişinin ölümüne neden olmuştur [70].

19 Aralık 1881 tarihinde merkez üssü 33.60 boylam ve 40.60 enlem olan Io:VIII şiddetinde Çankırı civarında etkili olan bir deprem meydana gelmiştir [70].

1875 veya 1876 yılında merkez üssü 32,90 boylam ve 39,95 enlem olan Io:VI şiddetinde Ankara civarında etkili olan bir başka deprem meydana gelmiştir [71].

Son yıllarda Kırıkkale yerleşim alanının da yer aldığı Anadolu plakası konusunda yapılan çalışmalar, plaka içinde iki ayrı neotektonik rejimin olduğunu ve bu rejimleri temsil eden ve yıkıcı deprem üretme potansiyeline sahip aktif fayların varlığını ortaya koymuştur [48].

Bu nedenle Kırıkkale bölgesi, sadece plaka sınırlarını oluşturan fayların değil, aynı zamanda plaka içi faylardan kaynaklanacak depremlerin de tehdidi altındadır. Plaka içi fayların ürettiği depremlerin en belirgin örneklerinden olan ve 19 Nisan 1938 tarihinde Ms 6,8 büyüklüğünde meydana gelen Akpınar Depremi, Seyfe Fay Zonu'nun kuzeybatısında yer alan Akpınar'dan Taşkovan'a kadar uzanan yaklaşık 14 km uzunluğundaki Akpınar Fay segmentinde meydana gelmiştir [72]. Bu deprem çok geniş alanlarda hissedilmiş ancak en çok hasar Akpınar ve Taşkovan'da oluşmuş olup; 3860 evde hasar, 211 yaralı ve 146 can kaybı oluşmuştur [73]. Depremden sonra yaklaşık 35 km uzunluğunda bir kırığın oluştuğu bildirilmiştir [74]. Ayrıca Salomon-Calvi ve Kleinsorge [75] tarafından kırık bloklarının birbirine göre düşey doğrultuda 60 cm, yatay doğrultuda 65 cm hareket ettiği, Pınar ve Lahn [76] tarafından ise İç Anadolu bölgesinde meydana gelen bu depremin Ankara Niğde ve Yozgat'ta bazı duvarlarda çatlamalara sebebiyet verdiği bildirilmiştir.

1 Şubat 1944'de çalışma alanından 150 km uzaklıkta K.A.F.Z.'da meydana gelen Ms 7,3 [77] büyüklüğündeki Gerede-Çerkeş (Bolu) depreminin merkez üssü 40.80 K, 32,20 D ve şiddeti (Io) X'dur. [78] dur. Bu deprem sonucunda 3958 kişi ölmüş, 20865 ev yıkılmış ve bir o kadar da ev hasar görmüştür. Ketin [79] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, depremin Çankırı Bayramören'den başlayarak batıya doğru Soğanlı çayı vadisi, Gerede ilçesi ve Bolu güneyinden geçerek Abant gölüne kadar uzanan yaklaşık 180 km uzunluğunda yüzey kırığı oluşturduğu, Gerede ilçesinde bahçe duvarlarının 2-3 m hareket ettiği, Bolu'nun 5 km güneyindeki kaplıca yolunun 3,5 m yatay olarak kaydığı, 40 – 100 cm kadar düşey atıma neden olduğu ve sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay olduğu belirtilmiştir.

13 Ağustos 1951'de çalışma alanına 125 km uzaklıkta K.A.F.Z.'nda meydana gelen Ms 6,9 büyüklüğündeki Kurşunlu (Çankırı) depreminin merkez üssü 40.88 K, 32.87 D ve şiddeti Io: IX dur [78]. Pınar [80] tarafından yapılan çalışmada bu deprem sonucunda Kurşunlu ve Ilgaz ilçe merkez ve köylerinin önemli derecede etkilendiği, 50 kişinin yaşamını kaybettiği, 208 kişinin yaralandığı, yaklaşık 8000 civarında binanın hasar gördüğü ve yıkıldığı ve 2038 hayvanın öldüğü belirtilmiştir. Ambraseys [77] tarafından yapılan çalışmalarda ise bu deprem sonucunda 60 km uzunluğunda sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay meydana geldiği belirtilmiştir.

85 km uzaklıkta K.A.F.Z.'nda 6 Haziran 2000'de meydana gelen M_s 6,0 büyüklüğündeki Orta (Çankırı) depremi, merkez üssü 40,70 K 32,98 D ve şiddeti I_0 : VII'dir. Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yapılan hasar tespit çalışmaları sonucunda 3 kişinin yaşamını kaybettiği, 80 kişinin yaralandığı, 314 konutun hafif hasarlı, 13 konutun orta hasarlı ve 521 konutun da ağır hasarlı olduğu tespit edilmiştir. Koçyiğit vd. [81] tarafından yapılan çalışmada depremin sol yanal doğrultu atımlı, kuzey-güney uzanımlı, 4-7 km genişliğinde, 65 km uzunluğunda Dodurga Fay Zonunun Dodurga-Buğuören kesiminin harekete geçmesi sonucu meydana geldiği belirtilmiştir.

20 Aralık 2007'de 55 km uzaklıkta Bala (Ankara) depremi, Bala Fayı'nda meydana gelen depremin merkez üssü 39.42K 33.05D, büyüklüğü (M_w) 5.7, derinliği 2,8 km'dir (AFAD) [82]. Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yapılan hasar tespit çalışmalarında 834 konut, 63 ahır ve 3 işyerinin ağır hasarlı olduğu, 5 konutun ise orta hasarlı olduğu tespit edilmiştir [83]. Zünbül vd. [84] tarafından yapılan artçı deprem dağılımları ve odak mekanizması çözümleri sonucunda depremin KB-GD uzanımlı, 5-10 km uzunluğundaki aktif faylardan meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Ayrıca bölgede meydana gelen $M_s=5$ civarında oluşan çok sayıdaki deprem bölgedeki sismik aktiviteyi göstermektedir.

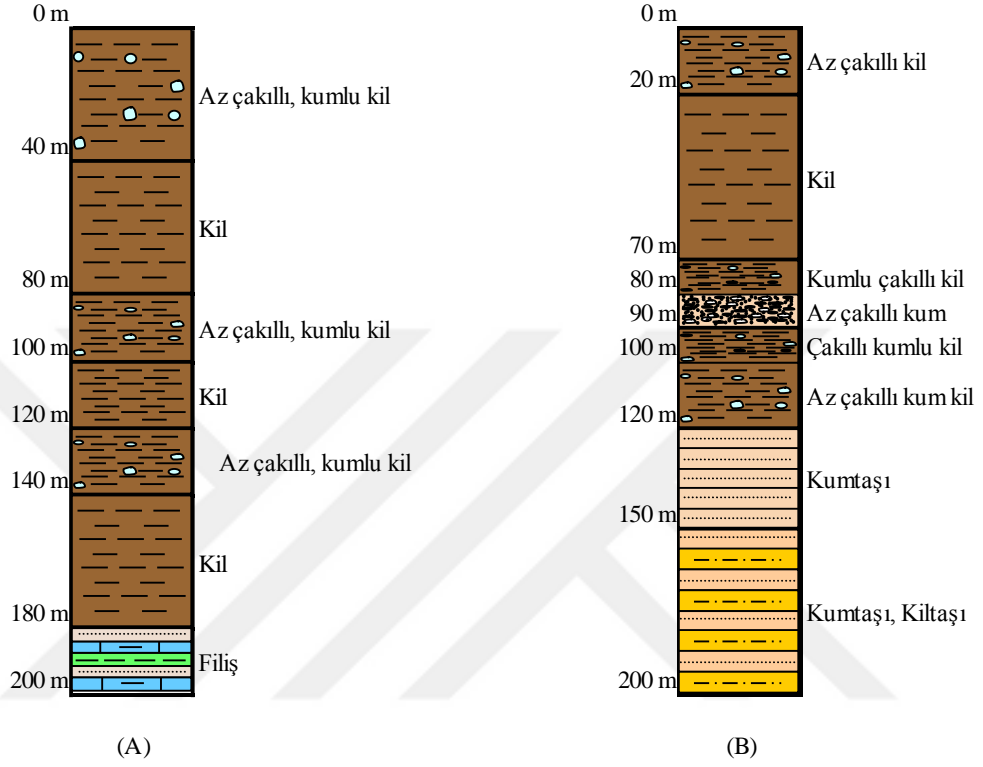
4. SAHA VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde saha ve laboratuvar testleri ve sonuçları hakkında bilgi verilecektir. Çalışma alanında çoğunlukla sondaj ve jeofizik çalışmaları yapılmıştır. Laboratuvar testleri, Kırıkkale’de jeolojik birimlerin geoteknik özelliklerini karakterize eden sondajlardan sağlanan örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. 1999 yılından bu yana Kırıkkale’de farklı firmalarca yapılan zemin etüdlerinden elde edilen laboratuvar jeofizik ve geoteknik çalışmaları ile bu tez çalışması kapsamında yapılan sismik çalışmalarının detayları aşağıda özetlenmiştir.

4.1. Saha Çalışmaları

Çalışma alanında geçmişte yapılmış deprem tehlike analizi ve zemin davranış analizi bulunmamasıyla birlikte, zemin etüd çalışmalarının parsel bazında yapılmasının zorunlu hale geldiği 1999 yılından bu yana Aksun Jeoteknik Ltd. Şti., Altundağ Mühendislik Ltd. Şti. ve Aks Yapı Geoteknik bürosu tarafından yapılan sondaj verileri bu çalışmada kullanılmıştır. Bölgede yapılan 750 adet sondajdan seçilen 108 adet sondajın derinlikleri ortalama 15-20 m arasında, yeraltı su seviyesi derinliği ise 2 ile 10 m arasında değişmektedir. Sondajlarda Standart Penetrasyon Testlerinin (SPT), ASTM D 1586-92’e göre her 1,5 m’de bir yapılması gerekmektedir. Kırıkkale’de yapılmış sondajlarda mümkün olduğu kadar bu aralık değerlerine dikkat edilmekle beraber, bazı lokasyonlarda yapılmış SPT testlerinde bu aralık değerleri aşılmaktadır. SPT testlerinden elde edilen N_{30} değerleri, literatürde yer alan bağıntılarla kayma dalgası hızının (V_s) derinlikle değişimini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Çalışma alanında yapılmış sondajların toplam derinliği 1632 m, Standart Penetrasyon Testlerinin (SPT) sayısı yaklaşık 700 adettir, Bölgede, Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yapılmış ve Şekil 4.1’de kesiti verilen, 200 m derinliğindeki su sondajlarında zemin tabaklarının çoğunlukla az çakıllı kumlu kil ve killi birimlerden oluştuğu, A sondajında 180 m’den sonra Filişe, B sondajında ise 120 m’den sonra Kumtaşı ve Kiltası gibi sert birimlere girildiği görülmüştür. Çizelge 4.1’de sondaj

koordinatları, derinlikleri ve yeraltı su seviyesi (YAS) derinliği, Şekil 4.2’de ise sondaj noktalarının genel dağılımı görülmektedir.



Şekil 4. 1. Kırıkkale’de DSİ tarafından yapılan derin su sondajı zemin profilleri [85]

Çizelge 4. 1. Çalışma alanının sondaj koordinatları, derinlikleri ve yeraltı su seviyesi derinliği

Sondaj No	x	y	Derinlik (m)	YAS derinliği (m)
SK-1	4411542	544159	15 m	2
SK-2	4411375	545258	15 m	3
SK-3	4411471	544359	15 m	3,5
SK-4	4411669	544086	15 m	3
SK-5	4414109	546881	15 m	---
SK-6	4411325	546960	15 m	---
SK-7	4410303	546677	15 m	3
SK-8	4412196	544433	15 m	3
SK-9	4412371	544148	15 m	---
SK-10	4413191	544140	15 m	9
SK-11	4413286	544420	15 m	---
SK-12	4410067	539834	15 m	6,5
SK-13	4414447	551191	15 m	---
SK-14	4412197	544642	15 m	4
SK-15	4414336	550780	15 m	---
SK-16	4412266	542676	15 m	---
SK-17	4412498	542221	15 m	---
SK-18	4412236	542037	15 m	---
SK-19	4413719	541851	15 m	---
SK-20	4410233	544635	15 m	---
SK-21	4412362	542563	15 m	---
SK-22	4410406	541270	15 m	3,5
SK-23	4410780	546034	15 m	---
SK-24	4410369	542853	15 m	---
SK-25	4410368	543377	15 m	---
SK-26	4412503	544464	15 m	3,5

Çizelge 4.1. (devam)

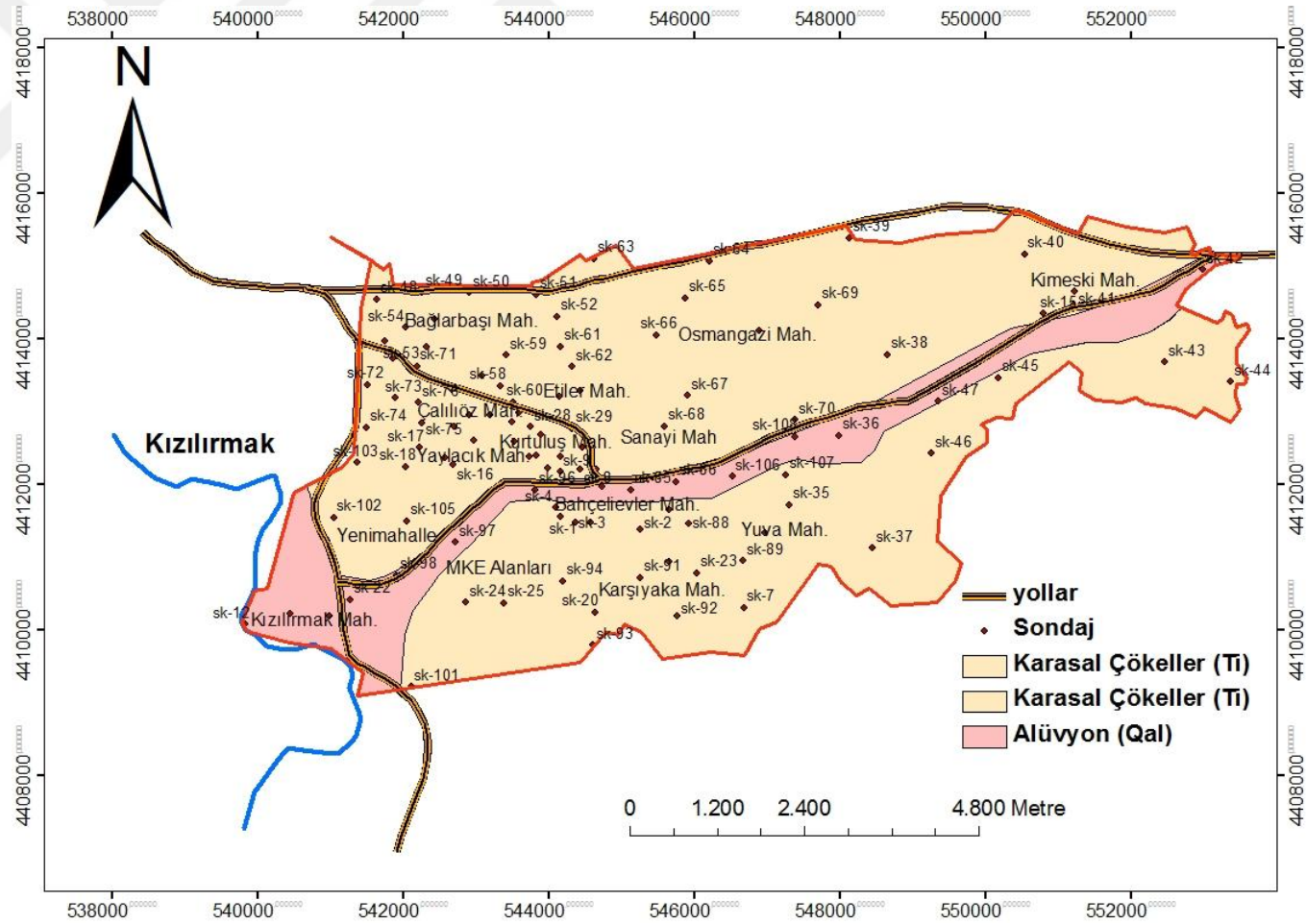
SK-27	4412668	543891	15 m	8
SK-28	4412782	543744	15 m	8,5
SK-29	4412756	544313	15 m	---
SK-30	4412217	543974	15 m	8
SK-31	4413301	542658	15 m	---
SK-32	4412597	542967	15 m	9
SK-33	4412939	542904	15 m	---
SK-34	4412942	543195	15 m	5
SK-35	4411714	547300	15 m	3
SK-36	4412658	547973	15 m	3,5
SK-37	4411118	548443	15 m	8
SK-38	4413774	548644	15 m	---
SK-39	4415377	548120	15 m	---
SK-40	4415148	550523	15 m	---
SK-41	4414642	551210	15 m	---
SK-42	4414938	552978	15 m	3,5
SK-43	4413667	552452	15 m	---
SK-44	4413399	553355	15 m	---
SK-45	4413459	550159	15 m	3,5
SK-46	4412418	549248	15 m	---
SK-47	4413128	549340	15 m	3,5
SK-48	4414536	541637	15 m	---
SK-49	4414629	542252	15 m	---
SK-50	4414623	542897	15 m	5
SK-51	4414602	543824	15 m	---
SK-52	4414299	544112	15 m	---
SK-53	4413955	541751	15 m	7,5
SK-54	4414144	542028	15 m	---

Çizelge 4.1. (devam)

SK-55	4413887	542316	15 m	---
SK-56	4414256	542421	15 m	---
SK-57	4413483	543079	15 m	7
SK-58	4413349	543324	15 m	8
SK-59	4413766	543414	15 m	---
SK-60	4413118	543510	15 m	8
SK-61	4413886	544150	15 m	---
SK-62	4413606	544322	15 m	---
SK-63	4415084	544617	15 m	---
SK-64	4415052	546196	15 m	---
SK-65	4414549	545867	15 m	---
SK-66	4414044	545468	15 m	---
SK-67	4413207	545907	15 m	---
SK-68	4412784	545582	15 m	---
SK-69	4414452	547697	15 m	---
SK-70	4412876	547381	15 m	8,5
SK-71	4413619	542182	15 m	---
SK-72	4413356	541500	16,5 m	10,5
SK-73	4413179	541884	15 m	---
SK-74	4412777	541486	15 m	9
SK-75	4412837	542250	15 m	---
SK-76	4413116	542211	15 m	---
SK-77	4412979	543583	15 m	---
SK-78	4412844	543488	15 m	---
SK-79	4412579	543529	15 m	3,5
SK-80	4412396	543829	15 m	8
SK-81	4412382	543722	15 m	---

Çizelge 4.1. (devam)

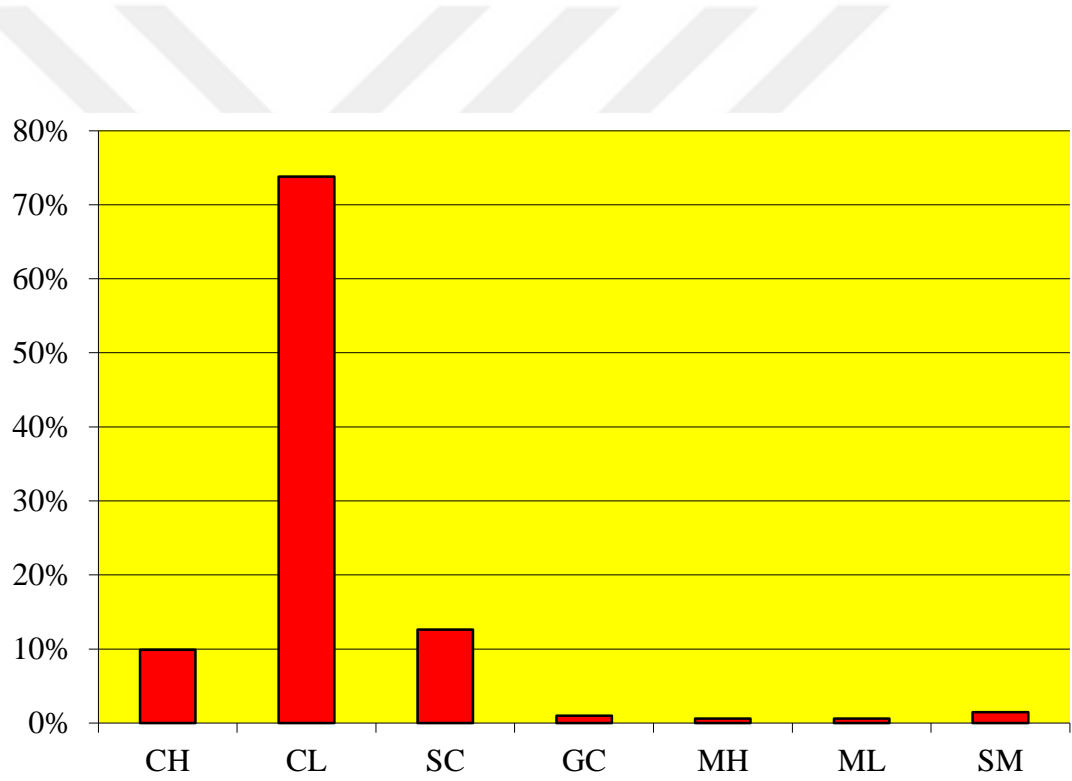
SK-82	4412172	544150	15 m	6,5
SK-83	4412014	544266	15 m	8
SK-84	4411964	544732	16,5 m	3
SK-85	4411920	545119	15 m	3
SK-86	4412031	545738	15 m	3
SK-87	4411651	545652	15 m	3
SK-88	4411449	545913	16,5 m	4,5
SK-89	4410942	546657	15 m	---
SK-90	4410925	545640	15 m	---
SK-91	4410716	545252	15 m	---
SK-92	4410181	545760	15 m	---
SK-93	4409783	544597	15 m	---
SK-94	4410669	544185	15 m	---
SK-95	4411467	544571	15 m	3
SK-96	4411912	543806	16,5 m	---
SK-97	4411198	542707	16,5 m	4
SK-98	4410747	541901	15 m	5
SK-99	4410185	540986	15 m	5
SK-100	4410215	540442	16,5 m	4
SK-101	4409215	542105	16,5 m	---
SK-102	4411533	541042	15 m	5
SK-103	4412289	541372	15 m	---
SK-104	4412779	542697	15 m	---
SK-105	4411491	542045	15 m	---
SK-106	4412101	546515	16,5 m	3
SK-107	4412124	547250	15 m	3
SK-108	4412647	547373	15 m	4



Şekil 4. 2. Sondaj noktalarının genel dağılımı

4.2. Laboratuvar Deneyleri

Çalışma alanında, 512 zemin örneği üzerinde laboratuvar testleri yapılmıştır. Yapılan test sonuçlarına göre, Şekil 4.3’de görüldüğü gibi, çalışma alanında zeminlerin çoğunluğu düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir. Bölgede aynı zamanda killi kum (SC) ve yüksek plastisiteli kil (CH) zeminler de yaygın olarak görülmektedir. Bu örneklerin su içeriği % 4 ile % 32 arasında, doğal birim ağırlıkları ise 17,93-19,61 kN/m³ arasında değişmektedir. Kırıkkale’de yapılan çalışmalardan elde edilen laboratuvar test sonuçları özet halinde Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4. 3. Çalışma alanında laboratuvar test sonuçlarına göre zemin sınıfları

Çizelge 4. 2. Laboratuvar test sonuçları

		$w_n(\%)$	$\gamma_n(\text{kN/m}^3)$	200 No'dan geçen (%)	LL	PL	PI
CL	Data	556	372	388	561	561	561
	Maksimum	36,2	22,6	99,9	62,6	46	44
	Minumum	5,6	14,3	50	1,1	12	2
	Ortalama	20,7	19,1	73	42,9	22	21
	Standart sapma	4,4	0,8	11,3	5,2	3	3,5
		$w_n(\%)$	$\gamma_n(\text{kN/m}^3)$	200 No'dan geçen (%)	LL	PL	PI
CH	Data	81	64	46	80	80	80
	Maksimum	35	21,5	92,4	70	30	44
	Minumum	6,9	1,9	42,1	40	18	18
	Ortalama	21,2	18,6	74,3	55,8	25	31
	Standart sapma	5,3	3,1	12,1	5,5	2,7	4,5
		$w_n(\%)$	$\gamma_n(\text{kN/m}^3)$	200 No'dan geçen (%)	LL	PL	PI
GC	Data	4	-	3	4	4	4
	Maksimum	18	-	30,2	35,4	19	18
	Minumum	9,8	-	12,8	27	17	9
	Ortalama	11,9	-	23,8	31,8	18	14
	Standart sapma	4,1	-	9,6	4,1	0,8	4,1
		$w_n(\%)$	$\gamma_n(\text{kN/m}^3)$	200 No'dan geçen (%)	LL	PL	PI
MH	Data	4	4	1	4	4	4
	Maksimum	32,2	19,1	66,5	61,4	32	28
	Minumum	22,7	18,9	66,5	51,4	29	20
	Ortalama	27,3	19	66,5	54,8	30	24
	Standart sapma	4,8	0,1		4,5	1,3	3,3

Çizelge 4. 2. (devam)

		$w_n(\%)$	$\gamma_n(\text{kN/m}^3)$	200 No'dan geçen (%)	LL	PL	PI
ML	Data	5	3	3	5	5	5
	Maksimum	22,6	19	88,1	43,9	31	14
	Minumum	16,8	18,5	72,3	36,7	25	11
	Ortalama	18,7	18,8	79,3	40,3	28	12
	Standart sapma	2,3	0,3	8	2,8	2,6	1,3
		$w_n(\%)$	$\gamma_n(\text{kN/m}^3)$	200 No'dan geçen (%)	LL	PL	PI
SC	Data	95	37	69	96	96	96
	Maksimum	28,9	22,8	86,4	59	24	37
	Minumum	4,3	18,3	13,4	22	12	7
	Ortalama	16,8	19,8	41,7	37,1	19	18
	Standart sapma	6,5	1,2	10,2	6	2,7	4,8
		$w_n(\%)$	$\gamma_n(\text{kN/m}^3)$	200 No'dan geçen (%)	LL	PL	PI
SM	Data	10	6	2	2	2	2
	Maksimum	22,9	19,6	43,3	39,8	28	13
	Minumum	5,6	16	23,5	38,2	27	9,8
	Ortalama	11,2	18,5	33,4	39	28	12
	Standart sapma	5,7	1,3	14	1,1	1,2	2,3

4.3. Jeofizik Çalışmaları

Jeofizik yöntemler yer altındaki jeolojik tabakaların durumlarını saptamada elastik dalgaların, yer içerisinde yayılması ile ilgili fizik prensiplerine dayanır. Uygulamalı Jeofizikte, dalgaları üreten bir enerji kaynağı, yeryüzüne bir düzen içinde yerleştirilmiş bir seri alıcıya (jeofon) ve bu alıcılara gelen dalgaları kaydeden ölçüm aletine gerek vardır. Jeofizik yöntemler, kaynaktan yayılan sismik dalgaların takip ettiği ışın

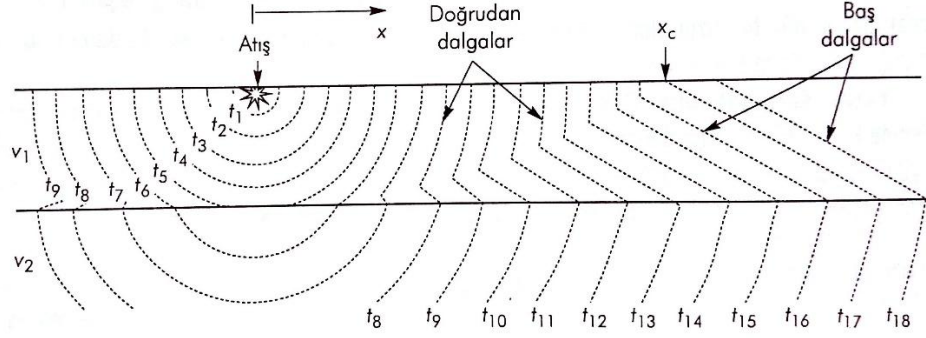
yollarına göre sismik yansıma (reflection) ve sismik kırılma (refraction) olmak üzere iki genel bölüme ayrılır.

Jeofizik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan sismik kırılma testi, farklı mesafelerde yer yüzeyi boyunca doğrusal olarak yerleştirilen noktalara bir düzeneden uygulanan darbenin yarattığı P ve S dalgalarının geliş sürelerinin ölçülmesini içermektedir [86]. Bu teknik ilk olarak derin petrol aramalarında ve nispeten sığ derinliklerdeki geoteknik araştırmalarında kullanılmıştır [87, 88, 89]. Sert tabakalarda kırılan sismik dalgalar daha hızlı hareket etmektedir. Hız derinlikle beraber arttığı için tabaka sınırları boyunca hareket eden dalgalar kırılarak yüzeye ulaşmaktadır. Bu yöntemin kısıtlaması, sismik dalgaları yüksek hızla ileten kalın katmanların altında bulunan düşük hızla ileten ince katmanları belirlemedeki başarısızlıktır [90, 91].

Şekil 4.4'de iki katmanlı yarı sonsuz ortamda kaynaktan uygulanan darbe ile tüm yönlere yayılan gerilme dalgaları oluşmaktadır. Enerjinin bir kısmı doğrudan dalga şeklinde kaynaktan jeofona ulaşmakta; n . jeofona geliş zamanı (Eşitlik 4.1):

$$t_{dn} = x_n / V_1 \quad (4.1)$$

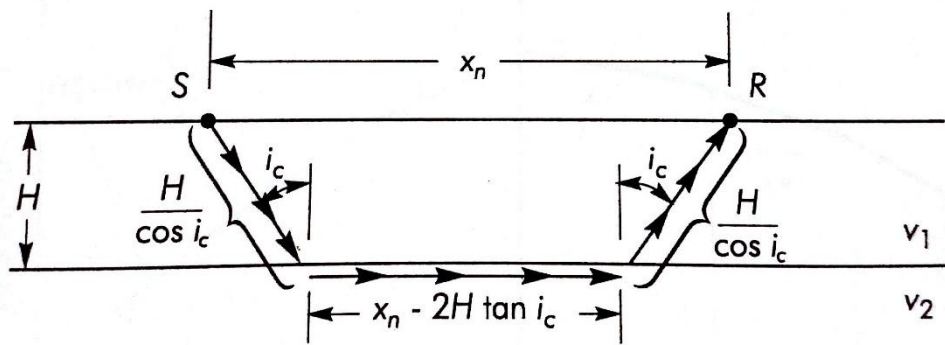
Burada, V_1 :1 no'lu ortamın dalga yayılma hızıdır. Diğer ışınlar aşağıya 1 ve 2 no'lu ortamın sınırına doğru ilerlemektedir. Sınırdaki bu ışınlar yansımakta ve Snell yasasıyla belirlenen yönlerde kırılmaktadırlar. Kırılan ışın, kritik geliş açısı i_c 'de sınıra paralel ilerlemektedir. Huygens ilkesine ve Snell yasasına göre, bu kritik olarak kırılmış dalga, 1 no'lu ortam içinde V_1 hızında ve sınırla $90^\circ - i_c$ açısı yapan yönde baş dalgalar üretmektedir. Sonuçta oluşan dalga cephesinin bir kısmı doğrudan dalga ile bir kısmı da Şekil 4.6'da görüldüğü gibi baş dalga tarafından kontrol edilmektedir. Kısa kaynak-jeofon mesafelerinde jeofona gelen ilk dalgalar doğrudan dalgalar olmakta ve kritik mesafe x_c 'den büyük uzaklıklarda ise baş dalgalar doğrudan dalgadan önce jeofona ulaşmaktadır [90].



Şekil 4. 4. Sismik kırılmada ilk gelen dalgaların dalga cepheleri [90]

x_c 'den büyük mesafelerde, 1 no'lu ortamda V_1 hızıyla aşağı doğru ilerleyen ışın 2 no'lu ortamda V_2 hızında kritik olarak kırılmakta ve tekrar kritik olarak 1 no'lu ortam içine kırılarak V_1 hızıyla ilerlemek suretiyle; jeofona kaynaktan doğrudan gelen ve V_1 hızıyla ilerleyen doğrudan dalgadan daha çabuk ulaşmaktadır. Baş dalganın n. jeofona (Şekil 4.5) ulaşması için gerekli zaman (Eşitlik 4.2):

$$t_{hn} = \frac{H}{i_c \cos i_c} + \frac{x_c - 2H \tan i_c}{V_2} + \frac{H}{V_1 \cos i_c} \quad (4.2)$$



Şekil 4. 5. $x_n > x_c$ olduğu zamanki ilerleme izi [90]

şeklinde yazılabilmektedir. Snell yasasından kritik geliş için $\sin i_c = V_1/V_2$ 'yi yerine koyup, $\cos^2 i_c = 1 - \sin^2 i_c$ trigonometrik ilişkisinden yararlanmak suretiyle terimlerin yeniden düzenlenmesiyle,

$$t_{hn} = \frac{x_n}{v_2} + 2H \sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2}} \quad (4.3)$$

elde edilmektedir. Jeofonun tam olarak kritik mesafeye (x_c) yerleştirilmiş olması halinde, doğrudan dalga ve baş dalga jeofona aynı anda ulaşmaktadır (yani; $t_{dn} = t_{hn}$). Buna göre, 4.1 ve 4.3 eşitliklerinden

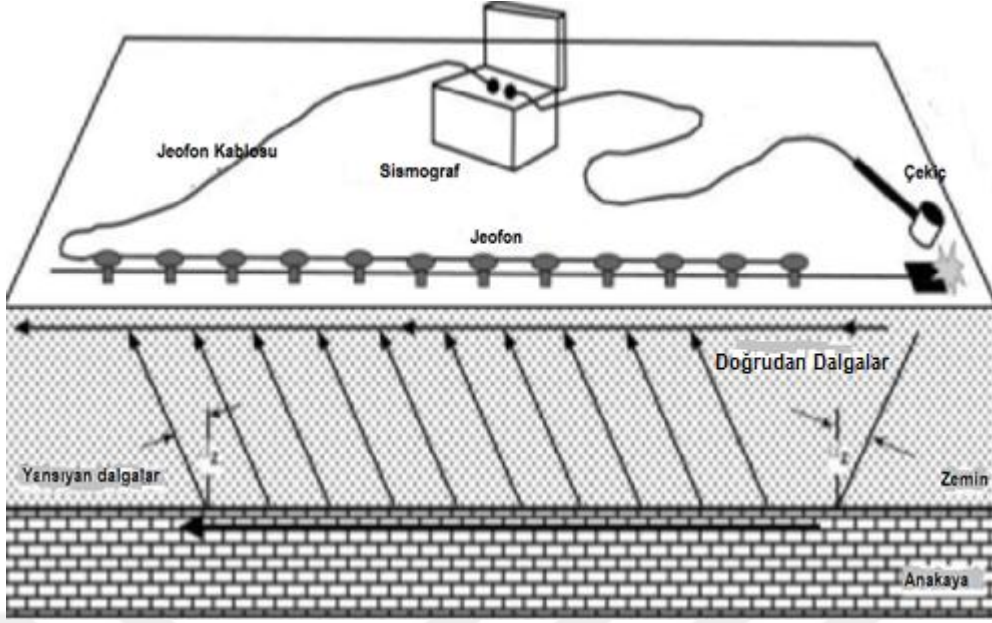
$$\frac{x_c}{v_1} = \frac{x_c}{v_2} + 2H \sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2}} \quad (4.4)$$

ve bu denklemin (Eşitlik 4.4) düzenlenmesiyle buradan da,

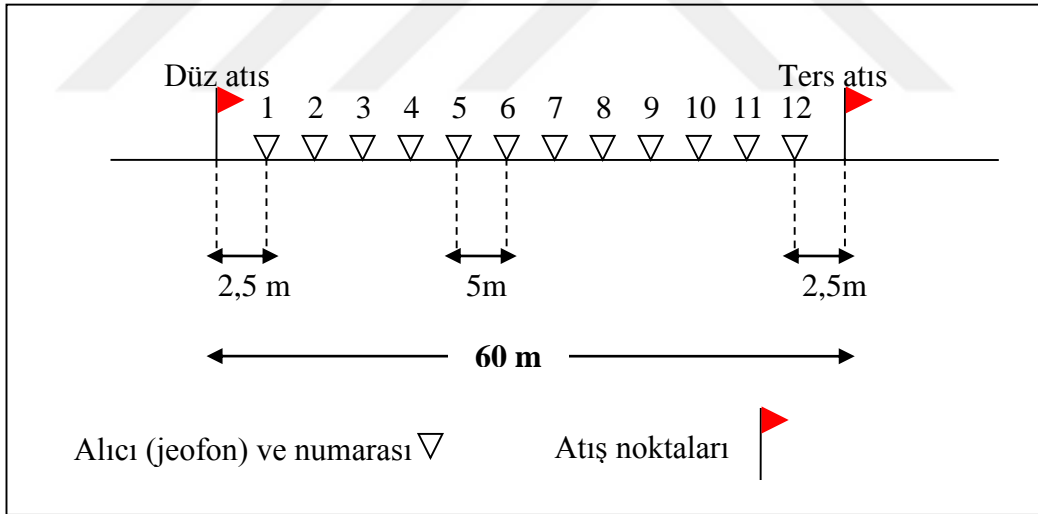
$$H = \frac{x_c}{v_1} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}} \quad (4.5)$$

bulunmaktadır (Eşitlik 4.5). Böylelikle zaman-mesafe diyagramından V_1 , V_2 ve H olmak üzere yeraltı şartlarına ait üç önemli özellik elde edilmiş olmaktadır [90].

Sismik kırılma testi için gerekli ekipmanlar, Şekil 4.6'da görüldüğü gibi enerji kaynağı için çekiç, jeofon ve sismometre ölçüm cihazıdır. Kırıkkale'de zemin koşullarını belirlemek amacıyla Proson Mühendislik Ltd. Şti. tarafından 16 noktada sismik kırılma testi yapılmıştır. Sismik kırılma testlerinde, Seistronik marka 12 kanallı, yüksek çözünürlüklü, sinyal güçlendirmeli ve 24 bit çeviricili sismograf kullanılmıştır. Sonuçlar ise RAS-24 yazılımı ile değerlendirilmiştir. Sismik kırılma testlerinde dalga kaynağı olarak 9 kg ağırlığında balyoz kullanılmıştır. Tüm serimlerde alıcı (jeofon) aralıkları; çalışılacak alanın genişliği ve hedeflenen derinlik göz önüne alınarak 5 m seçilmiştir. Tüm serimlerde eğimli tabakanın gözden kaçırılmaması ve verinin daha doğru yapıyı temsil etmesi amacıyla iki atış (düz ve ters) yapılmıştır. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi atış noktaları; düz atış için ilk jefondan 2,5 m geride, ters atış için son jefondan 2,5 m ilerde seçilmiştir.

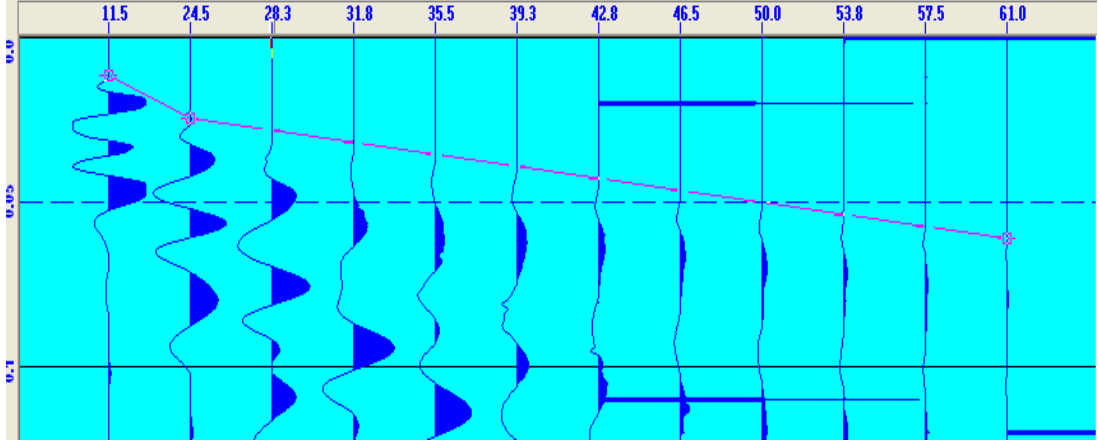


Şekil 4. 6. Sismik kırılma testi (ASTM D 5777-00'den değiştirilerek)

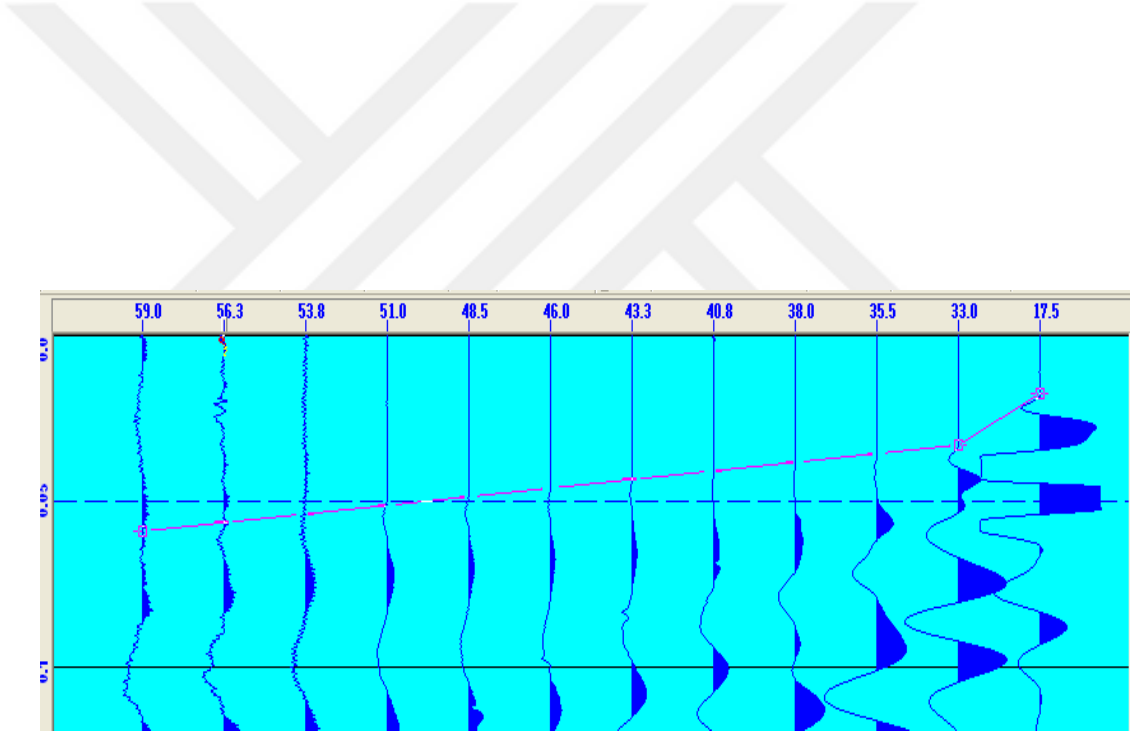


Şekil 4. 7. Sismik kırılma testi için atış noktaları

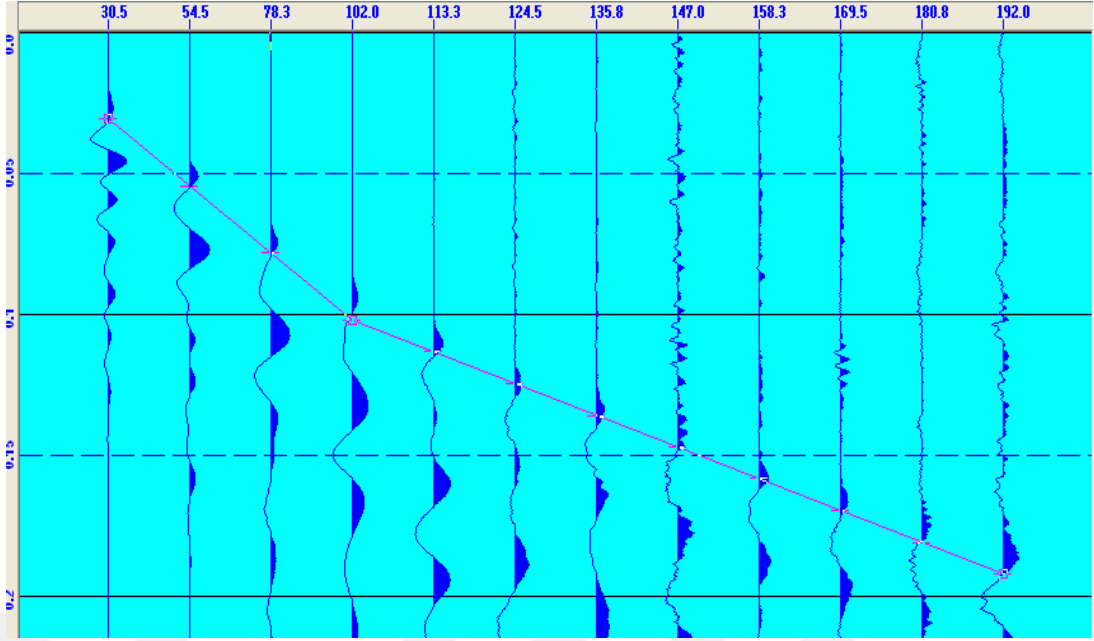
Örnek olarak I. Sismik kırılma testine ait ilk kırılma zamanlarını gösteren grafikler şekil 4.8, 4.9, ve 4.10'da, uzaklık zaman grafikleri ise şekil 4.11 ve 4.12'de verilmiştir.



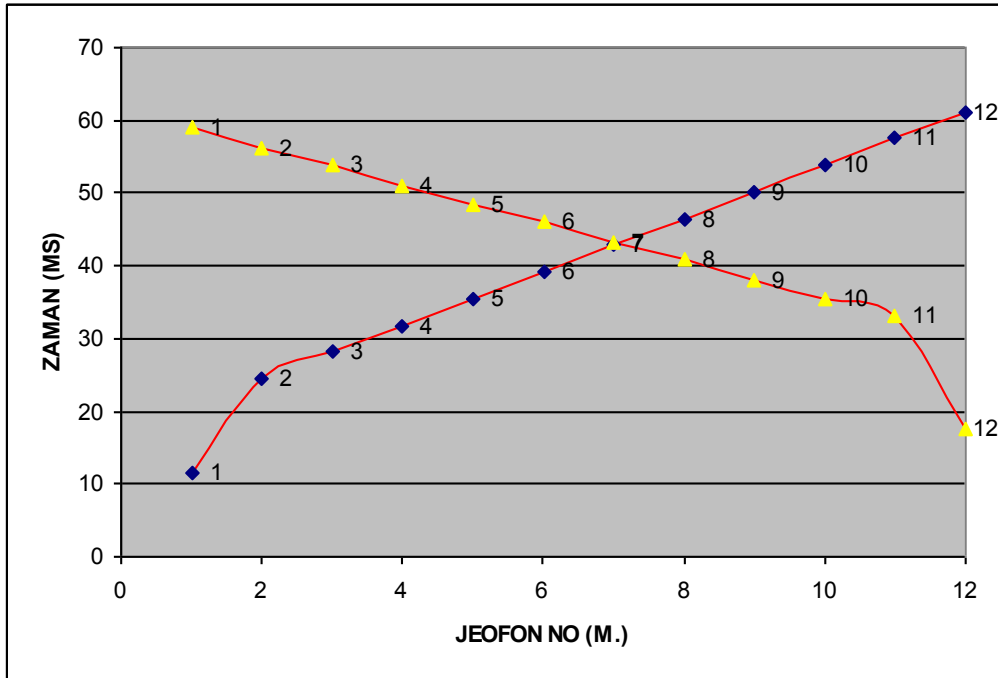
Şekil 4. 8. P düz atış



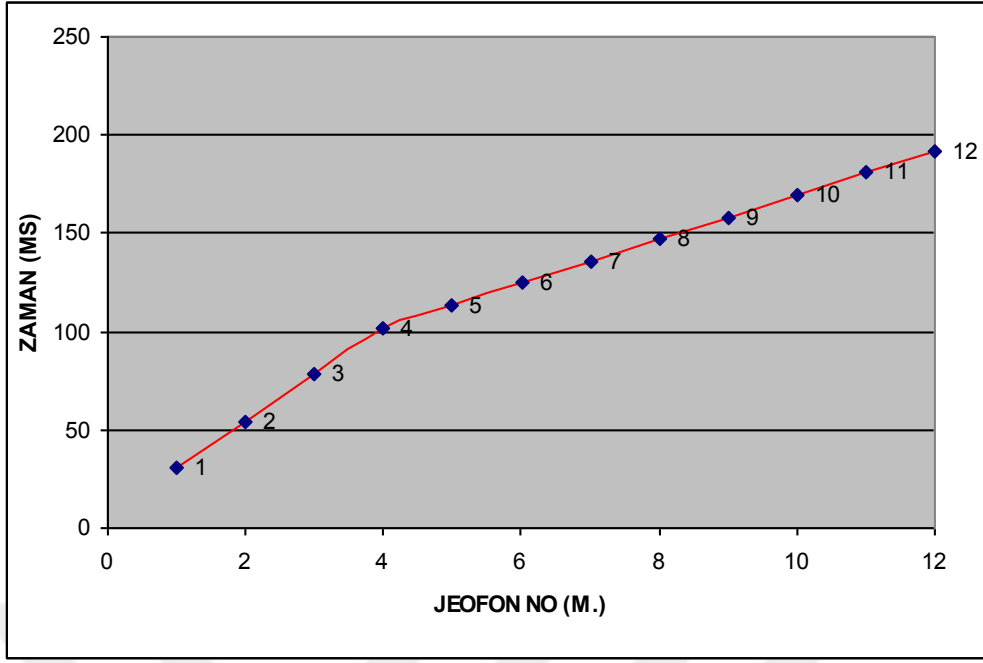
Şekil 4. 9. P ters atış



Şekil 4. 10. S düz atış

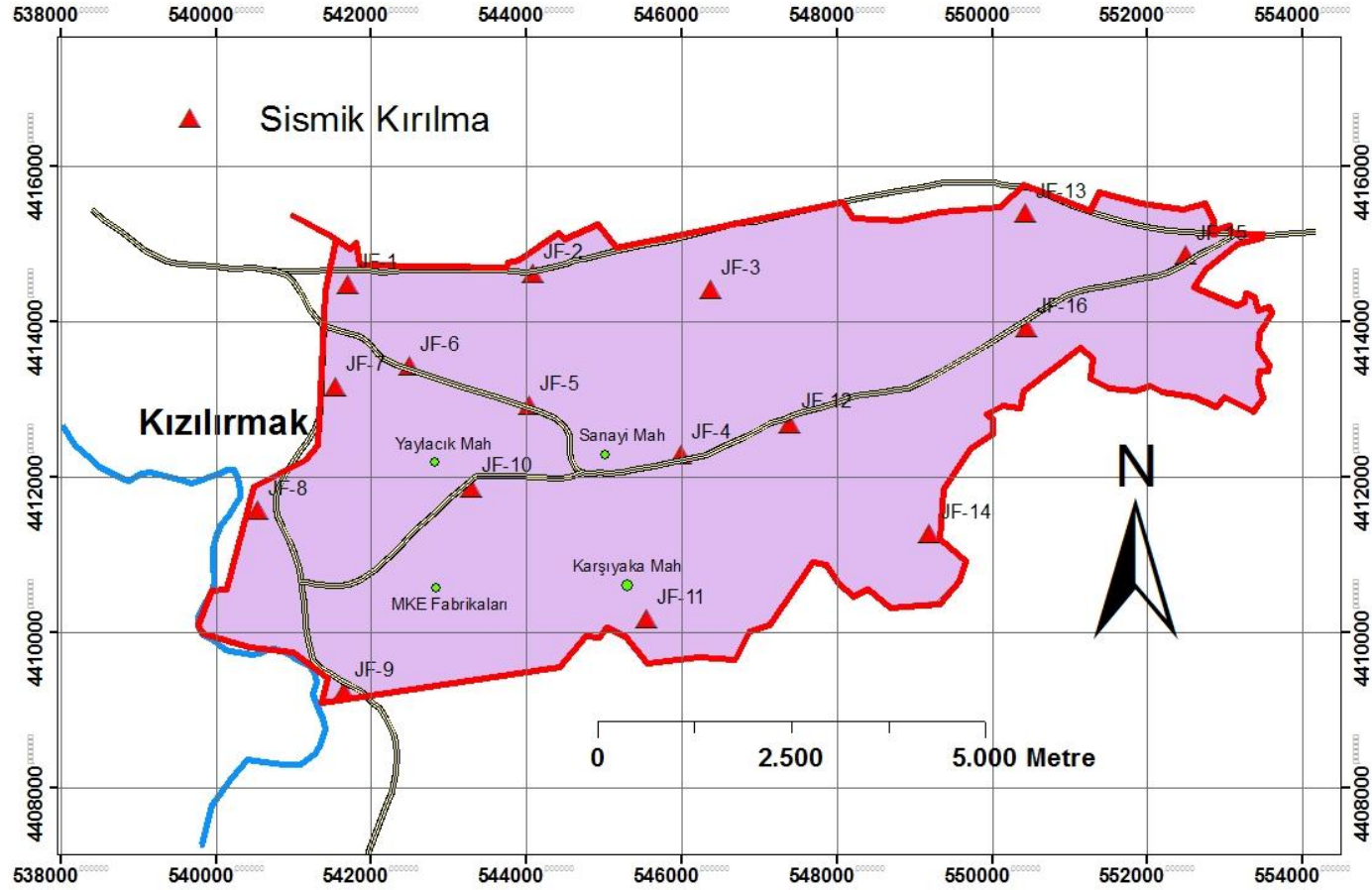


Şekil 4. 11. P dalgası uzaklık zaman grafiği



Şekil 4. 12. S dalgası uzaklık zaman grafiği

Sismik kırılma testleri sonucunda, Kırıkkale’de zemin koşulları açısından iki farklı birim belirlenmiştir. Bunlar alüvyon ve neojen yaşlı birimlerdir. Çalışma alanında yer alan birimlerin V_p hızları 318-2351 m/s, V_s hızları da 122-655 m/s arasında değişmektedir. Şekil 4.13.’de çalışma alanında yapılan sismik kırılma testlerinin lokasyon dağılımları verilmiştir. Çizelge 4.3’de ise tüm lokasyonlara ait V_p , V_s ve en üst zemin tabakası kalınlığı (h_1) değerleri verilmiştir.



Şekil 4. 13. Çalışma alanında yapılan sismik kırılma testlerinin lokasyonları

Çizelge 4. 3. Çalışma alanındaki zeminlerin V_p , V_s ve h_1 değerleri

Serim adı	V_p hızı (m/s)	V_s hızı (m/s)	h-tabaka kalınlığı (m)
JF1	354	210	3.50
	1599	444	-
JF2	432	275	7.30
	1750	582	-
JF3	565	238	4.30
	1668	488	-
JF4	651	289	10.30
	1695	600	-
JF5	448	204	6.00
	1972	612	-
JF6	673	172	7.50
	2351	533	-
JF7	318	201	5.80
	1630	655	-
JF8	364	192	3.80
	1536	615	-
JF9	333	122	5.30
	1702	337	-
JF10	323	201	2.80
	1662	642	-
JF11	324	184	5.10
	1680	400	-
JF12	590	337	4.30
	2105	541	-
JF13	463	233	11.70
	1395	535	-
JF14	1383	370	5.80
	2036	635	-
JF15	524	222	9.70
	1974	385	-
JF16	569	397	5.40
	1649	639	-

4.4. BAP Projesi Kapsamında Yapılan Çalışmalar

Çalışma alanında, Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi (BAP) tarafından desteklenen proje kapsamında, Aktif Kaynaklı Yüzey Dalgası Yöntemi

(MASW) ve Kırılma-Mikrotremor Yöntemi (ReMi) testleri yapılmıştır. Bu testlerde yüzeyden yaklaşık 120 metre derinliğe kadar kayma dalgası hızı (V_s) dağılımının belirlenmesi ve elde edilen V_s değerlerine göre yer dinamik parametrelerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma alanındaki 6 noktada MASW ve ReMi sismik yöntemleri uygulanmış, elde edilen arazi kayıtları ayrı ayrı değerlendirilmiş ayrıca birleşik ters çözüm yapılarak, sonuçların güvenilirliği ve çözünürlüğü arttırılmıştır. Çizelge 4.5’de MASW ve ReMi noktalarının yer adları ve koordinatları, Şekil 4.14’de ise çalışma alanındaki dağılımları verilmiştir.

Çizelge 4. 4. MASW ve ReMi ölçüm yeri ve koordinat bilgisi

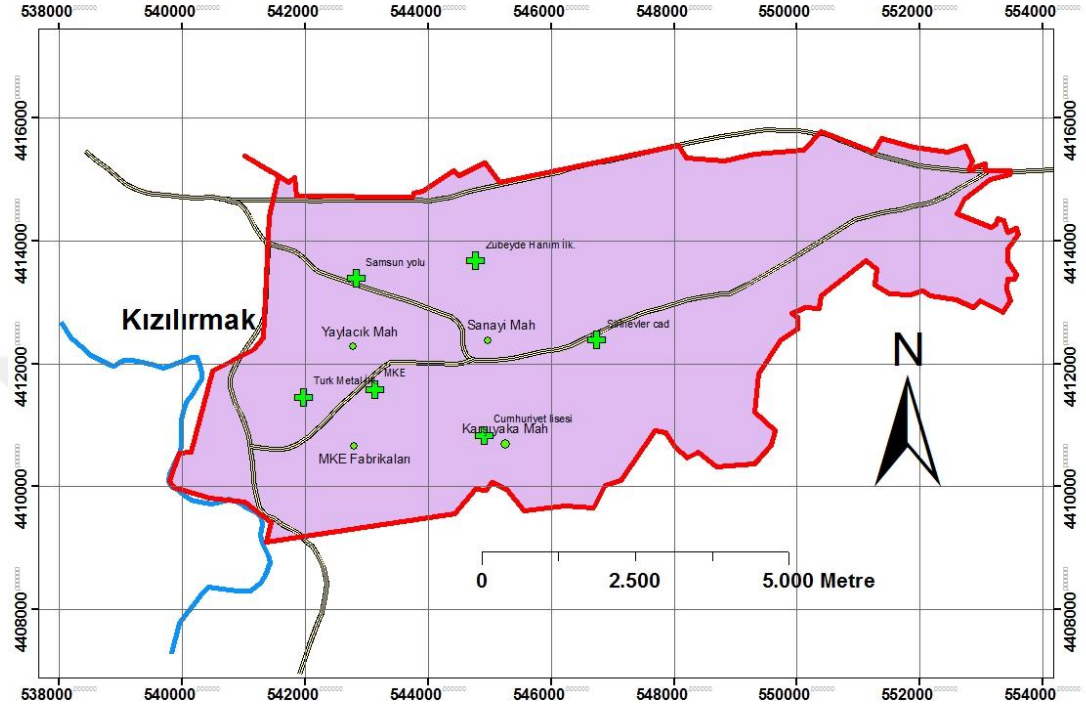
Ölçüm No	Mevki/Yer Adı	Enlem (°)*	Boylam (°)*	MASW	ReMi
1	Şirinevler Cad.	39.843525	33.546224	√	√
2	Cumhuriyet Lisesi	39.828760	33.524699	√	√
3	MKE İmla Yolu	39.834278	33.503388	√	√
4	Türk Metal Sendikası İÖO	39.834747	33.490265	√	√
5	Zübeyde Hanım İÖO	39.854023	33.523283	√	√
6	Samsun Bulvarı	39.851672	33.498920	√	√

* WGS84 (World Geodetic System -1984) koordinat sistemi kullanılmıştır.

4.5. Aktif Kaynaklı Yüzey Dalgası Yöntemi (MASW)

İlk defa Park vd. [92] tarafından tanıtılan Aktif Kaynaklı Yüzey Dalgası Yöntemi (MASW) bir sismik araştırma yöntemidir. MASW yönteminin esası bir noktasal kaynaktan geçici olarak oluşturulan dalgaların belirli sayıda jeofon tarafından kayıt edilmesi ve kayıt içerisinden yüzey dalgalarının ayırt edilerek dispersiyon özelliklerinin belirlenmesine dayanmaktadır. Yöntemin uygulanmasında genel olarak düşük frekanslı düşey bileşen jeofonlar (1-10 Hz) kullanılır [93].

Bu çalışmada MASW yönteminde iki farklı ofsette atış yapılmış ve hesaplanan dispersiyon görüntüleri karşılaştırılarak temel mod seçimine gidilmiştir



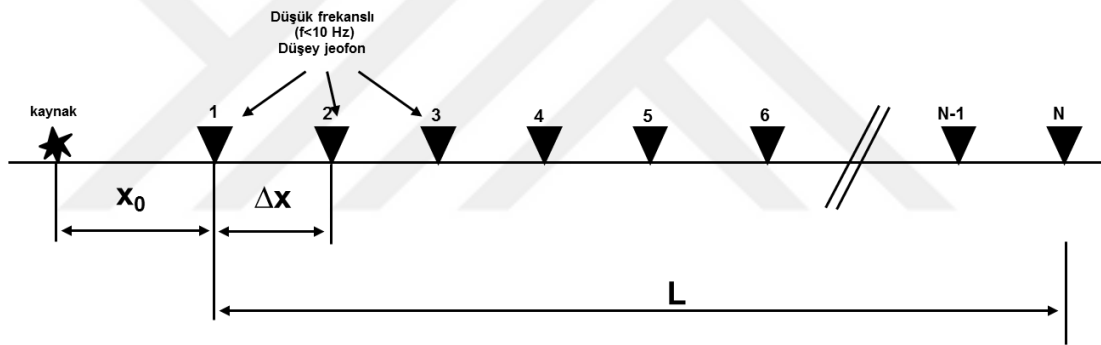
Şekil 4. 14. MASW ve ReMi testlerinin lokasyonları

4.6. Kırılma-Mikrotremor Yöntemi (ReMi)

ReMi (Kırılma-Mikrotremor) yönteminin amacı, çevresel gürültü kayıtları ile yer içi kayma dalgası hız kesitinin elde edilmesidir. Veri toplamak amacıyla, sismik kırılma yönteminde kullanılan standart kayıtçılar ve düşük frekanslı düşey jeofonlar kullanılır. Yöntem, Rayleigh dalgasının dispersiyonu nedeni ile nüfuz derinliğinin dalga boyuna bağımlı olmasından yararlanır [94]. Bu çalışmadaki ReMi verileri, MASW yöntemi ile aynı serim düzeni kullanılarak kayıt edilmiştir. Genel olarak, MASW verisinden sığ derinliklere (0-30 m) ait bilgiler iyi bir ayrımla elde edilmekte iken ReMi ile 100 m derinliğe kadar hız değişimini saptamak olanaklıdır.

Bu çalışmada, veri işleme aşamasında MASW ve ReMi ölçümlerinden elde edilen dispersiyon eğrileri birleştirilerek birleşik ters çözüm yapılmış; böylece hem sığ hem de derinlere ait kayma dalgası hızı dağılımı elde edilmiştir.

Çalışmada Geometrics GEODE 24 kanallı sismik kayıtcı kullanılmıştır. Şekil 4.15’ de hem MASW hem de ReMi kayıtlarının alınmasında kullanılan serim geometrisi gösterilmiştir. MASW ölçümlerinde her profil için konumları farklı iki kaynak kullanılarak, 9 yığmalı kayıt alınmıştır. Elde edilen kayıtlardan ilk varış (seyahat zamanları) zamanları kayıtlardan okunarak, P-dalgası hızlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. ReMi kayıtlarının alınmasında ise serim düzeni korunarak her bir profilde toplam 10 dakikalık kültürel gürültü kayıtları alınmıştır. MASW ve ReMi kayıtlarının alınmasında kullanılan arazi parametreleri Çizelge 4.6’ da verilmiştir.



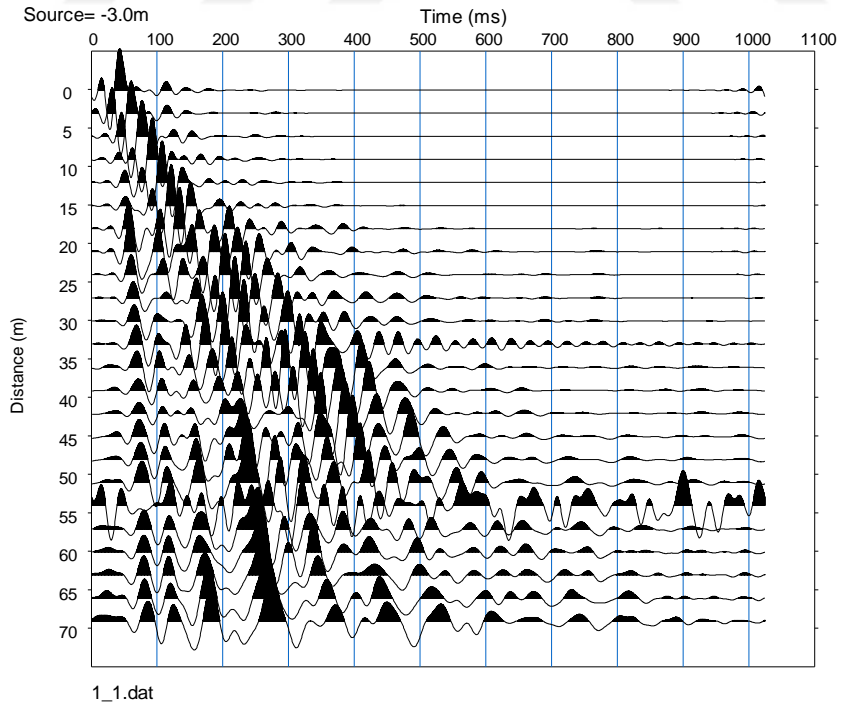
Şekil 4. 15. MASW ve ReMi yöntemlerinde uygulanan serim geometrisi

Örnek olarak 1 no’lu ölçüm noktasına ait MASW ve ReMi kayıtları ile ara işlem adımlarından elde edilen dispersiyon görüntüsü, dispersiyon eğrisi ve ters çözüm sonuçları Şekil 4.16 -4.25’de, elde edilen zemin parametreleri ise Çizelge 4.7 ve 4.8’de verilmiştir.

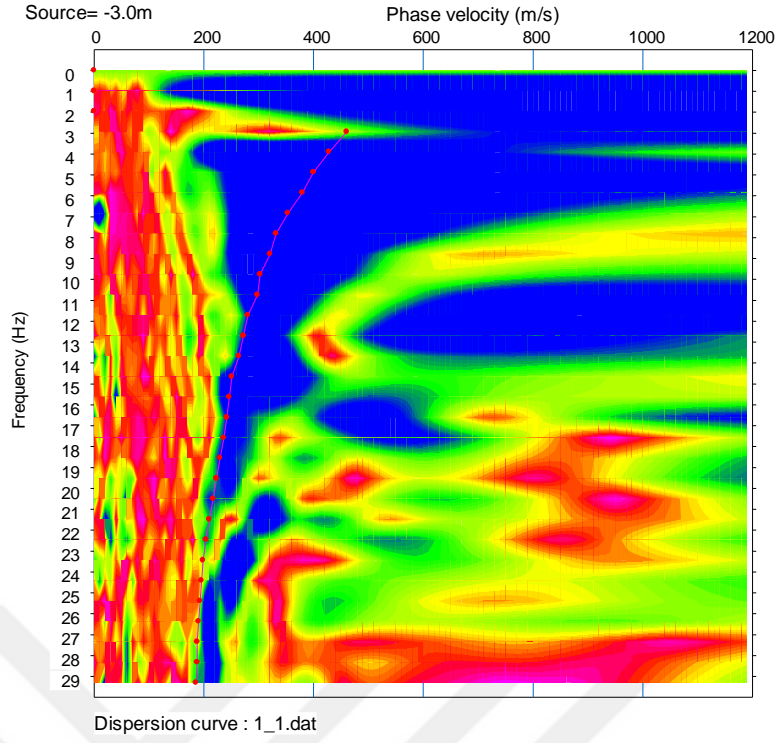
Çizelge 4. 5. MASW ve ReMi ölçümlerinde kullanılan arazi parametreleri

Parametre	MASW	ReMi
Jeofon frekansı (Hz)	4.5 (Düşey Bileşen)	4.5 (Düşey Bileşen)
Jeofon aralığı	3 m	3 m
Zaman örnekleme aralığı	0.5 ms	2 ms
Kayıt uzunluğu	2 saniye	128 saniye
Serim boyu	69 m	69 m
Ofset uzaklığı	3m ve 24 m	-
Kanal sayısı	24	24
Kayıt sayısı	2 (9 yığmalı)	5-7

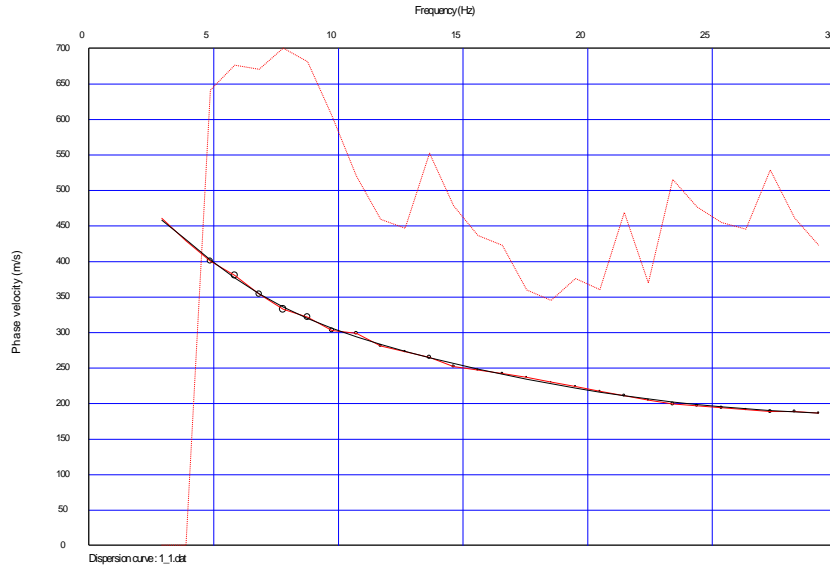
4.7. Şirinevler Caddesi MASW Sonuç Görüntüleri



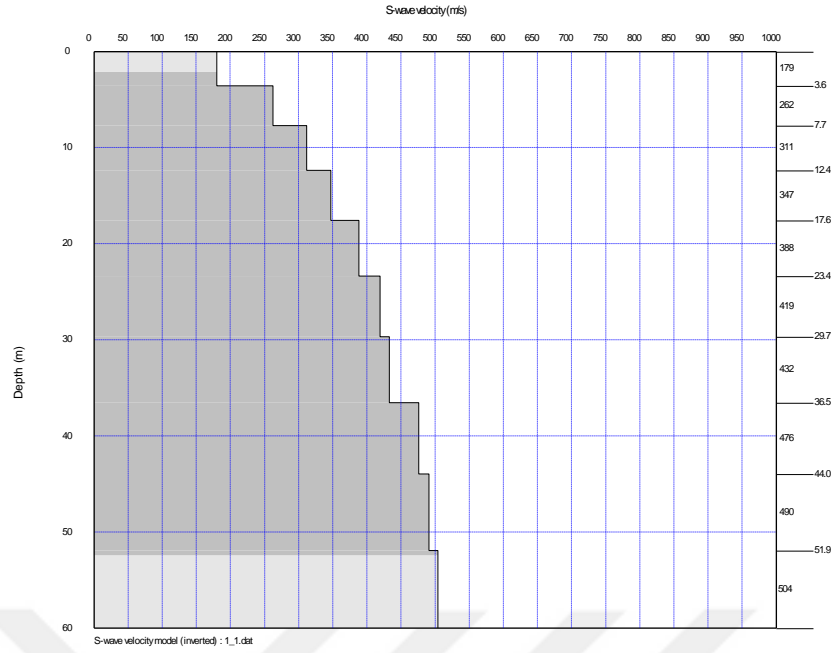
Şekil 4. 16. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) MASW kaydı (ofset = -3 m)



Şekil 4. 17. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) MASW kaydı dispersiyon görüntüsü ve dispersiyon eğrisi

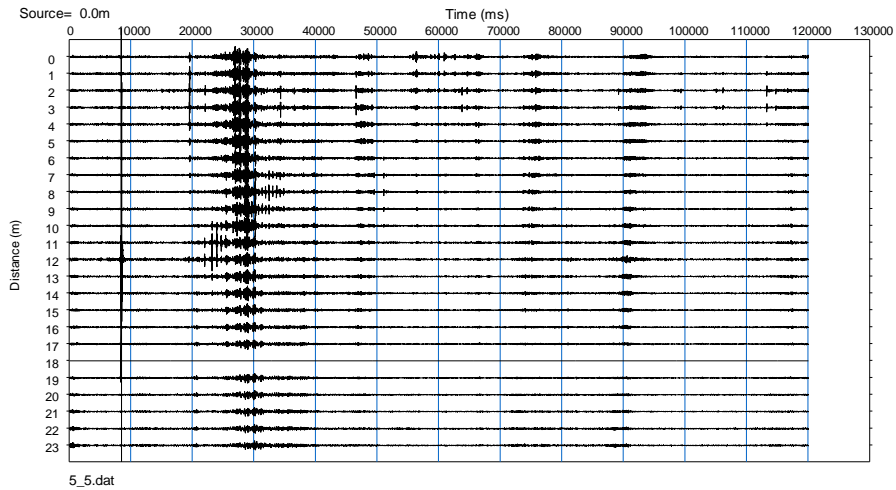


Şekil 4. 18. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) MASW kaydı dispersiyon eğrisi

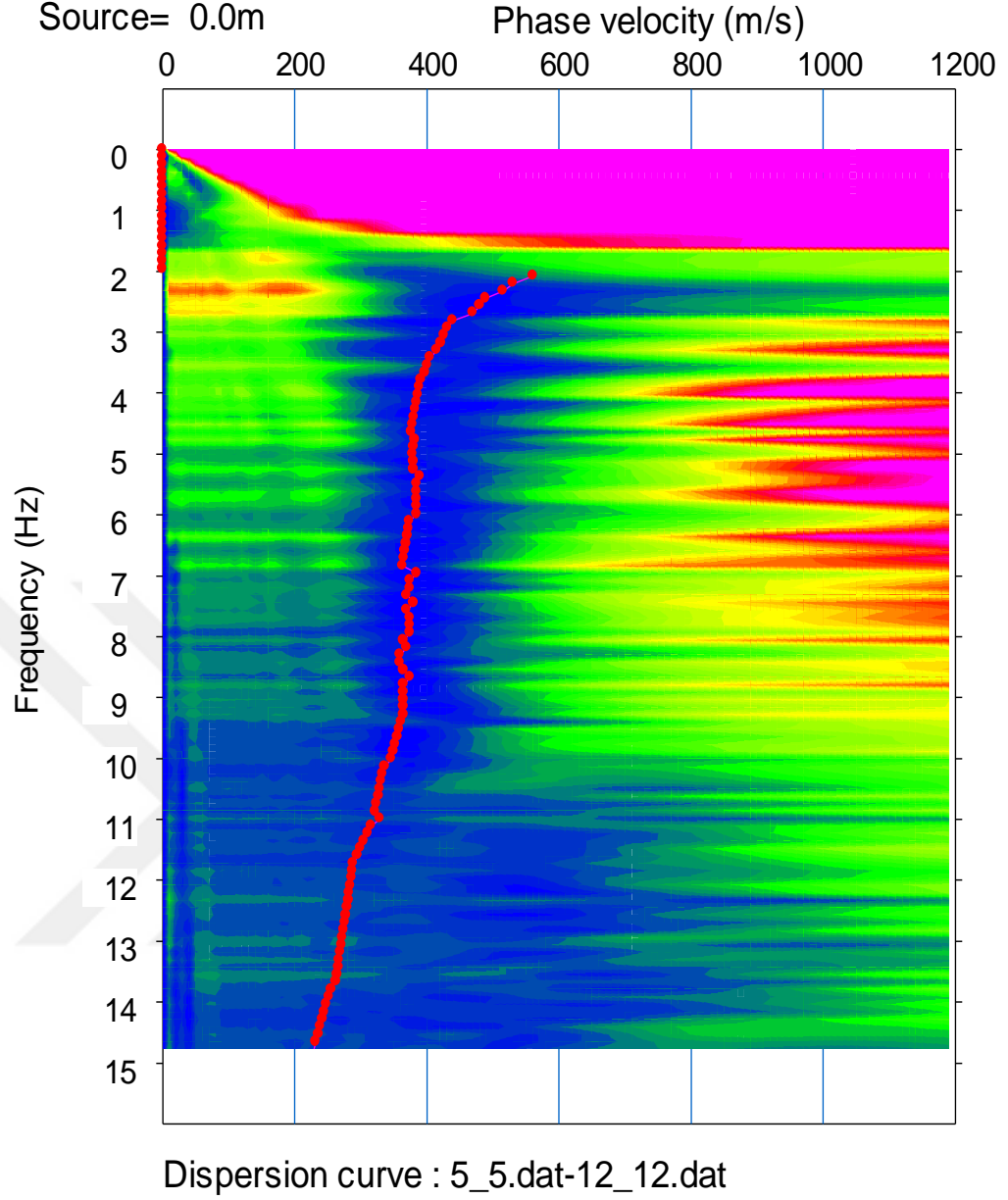


Şekil 4. 19. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) MASW kaydından ters çözüm sonucu elde edilen V_s -derinlik kesiti

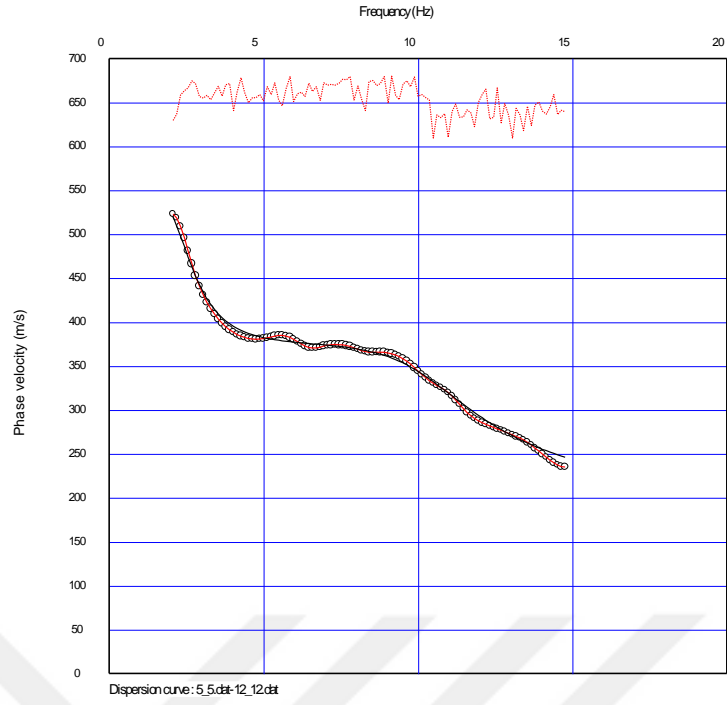
4.8. 1 no'lu Ölçüm Noktası (Şirinevler Caddesi) ReMi Sonuç Görüntüleri



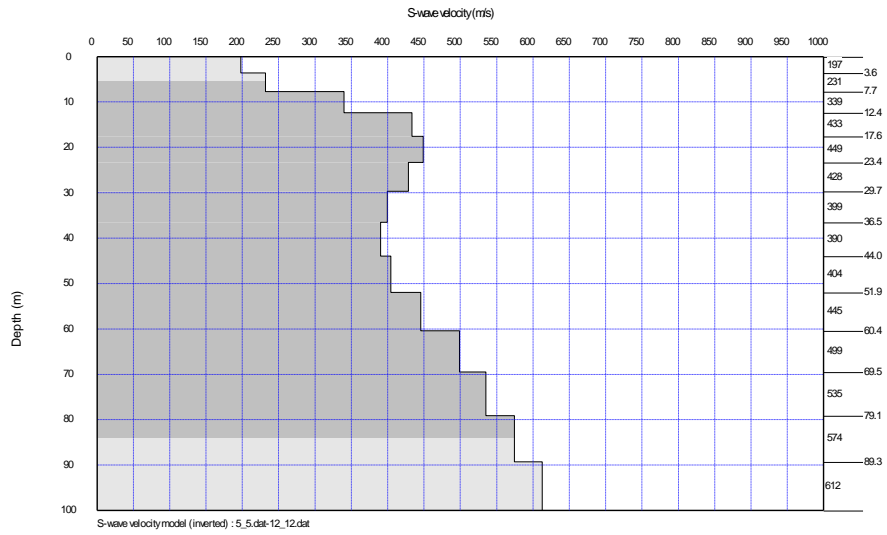
Şekil 4. 20. 1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi) ReMi kaydı



Şekil 4. 21. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait 1-7 nolu ReMi kayıtlarından hesaplanan dispersiyon görüntüsü ve seçilen dispersiyon eğrisi

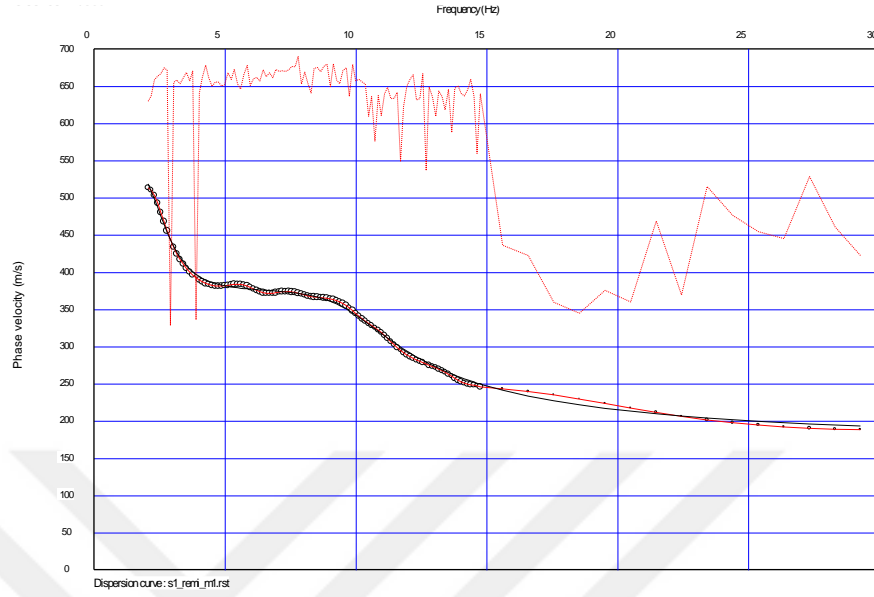


Şekil 4. 22. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait ReMi kaydı dispersiyon eğrisi

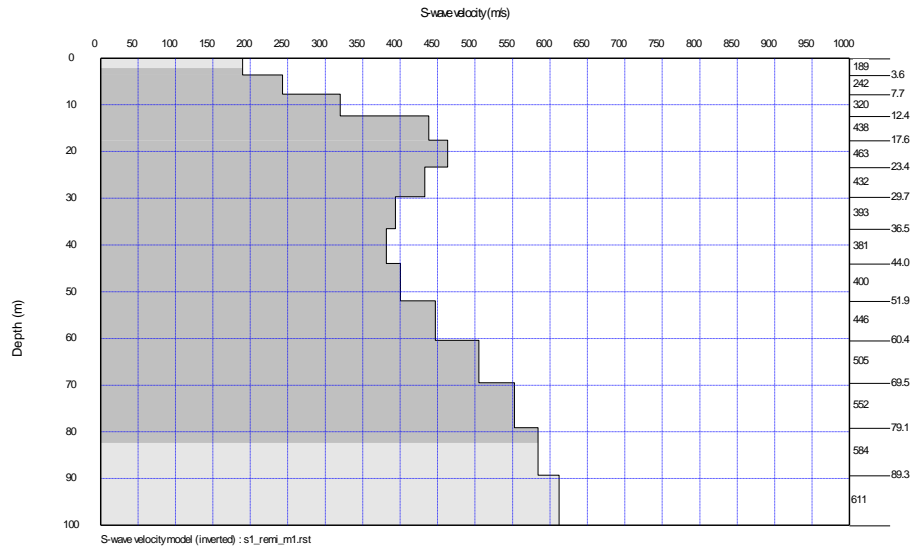


Şekil 4. 23. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait ReMi kaydından ters çözüm sonucu elde edilen kayma dalgası hızı derinlik kesiti

4.9. Şirinevler Caddesi Masw-Remi Birleşik Ters Çözüm Sonuç Görüntüleri



Şekil 4. 24. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait MASW-Remi dispersiyon eğrilerinin birleştirilmiş hali



Şekil 4.25. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait MASW-Remi dispersiyon eğrilerinin birleştirilmesinden ters çözüm sonucu elde edilen kayma dalgası hızı derinlik kesiti

Çizelge 4. 6. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait kayma dalgası hızı derinlik değişimi

Tabaka No.	Derinlik (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)
1	3.6	189	360
2	7.7	242	572
3	29.6	432	1040
4	51.9	400	1089
5	60.4	446	1690
6	69.5	505	2450
7	89.3	584	2644
8	120.0	622	2827

Çizelge 4. 7. 1 no'lu ölçüm noktasına (Şirinevler Caddesi) ait yer dinamik parametreleri

Tabaka No	γ kN/m³	ρ g/cm³	G_{max} MPa	ν	E_{max} MPa	K MN/m³	q_a kN/m²	T s	Vs30 m/s	A
1	13.93	1.42	51	0.31	133	116	66	0.98	332	2.4
2	15.65	1.60	94	0.39	261	397	95			
3	18.17	1.85	347	0.39	968	1543	196			
4	18.38	1.87	300	0.42	853	1823	184			
5	20.51	2.09	417	0.46	1221	5421	229			
6	22.51	2.29	585	0.47	1731	13000	284			
7	22.94	2.34	798	0.47	2353	15294	335			
8	23.93	2.44	945	0.48	2796	22593	372			

1 no'lu ölçüm noktası (Şirinevler Caddesi), 2 no'lu ölçüm noktası (Cumhuriyet Lisesi) ve 6 no'lu ölçüm noktası (Samsun Bulvarı)'ndan elde edilen V_S derinlik kesitlerinde S-dalgası hızlarında bir miktar düşüş görülmesine karşın, ölçüm yapılan altı noktada da sismik hızlar hemen hemen benzer değerleri almakta, ortamların benzer çökelim özelliği gösterdiği düşünülmektedir.



5. SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ VE YER HAREKETİNİN TAHMİNİ

Sismik tehlike analizi, yerel veya bölgesel ölçekte yer sarsıntısının sayısal olarak tahmin edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Sismik tehlike, özel deprem senaryolarını dikkate alan deterministik yöntemle veya depremin meydana gelme olasılığı, büyüklüğü, etkisi ve yeri ilgili belirsizlikleri dikkate alan olasılıksal yöntemle analiz edilebilmektedir [90, 95, 96]. Sismik tehlike analizlerinin en yaygın amacı çalışma alanı için pik yer ivmesi (PGA) ve/veya spektral ivmenin (S_a) belirlenmesidir. Spektral ivme genellikle inşaat mühendisliği yapılarının tasarımında tercih edilmektedir. Deprem mühendisliği pratiğinde kaya, sert ve yumuşak zeminler gibi farklı zemin tipleri için tasarım spektrumu oluşturmak gelenekseldir. Çoğu durumda yalnız tepki spektrumunun tahmini, yapıların ve tesislerin değerlendirilmesi ve tasarımı için yeterlidir. Oluşturulan spektrum, gerçek deprem kayıtlarının ölçeklenmesi ve belirlenmesinde hedef olarak kullanılabilir. Davranış analizlerinde, sonuçlar giriş hareketlerine çok duyarlı olduğundan, giriş hareketi olarak kullanılacak yer hareketlerinin çok iyi tanımlanmış olması gerekmektedir [90, 96]. Ayrıca sismik tehlike analizi, sismik tehlike ve riskin belirlenmesi için yapılan sismik mikrobölgeleme uygulamalarının önemli bir bileşenidir [97, 98]. Deprem etkisinin tahmininde, yer hareket parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Deprem esnasında kaynak özellikleri, deprem dalgalarının yayıldığı ortamın özellikleri, yerel zemin koşulları tüm yer hareket parametrelerini etkileyebilmektedir. Kaynak özellikleri, kaynak büyüklüğü, derinliği, kırık alanının boyutu ve fay tipinden oluşmaktadır. Deprem dalgaların yayıldıkları ortamın ana özellikleri kabuk hız yapısı ve anakayanın sönüm parametreleridir. Yerel zemin koşulları ise yerel zemin özellikleri ve topoğrafyadan oluşmaktadır [90].

Bu çalışmada Kırıkkale için sismik tehlike analizi yapılmış ve davranış analizleri için gerekli deprem kayıtları belirlenmiştir. Bu analizlerin sonuçlarının ileriki çalışmalarda kullanılması amaçlanmıştır.

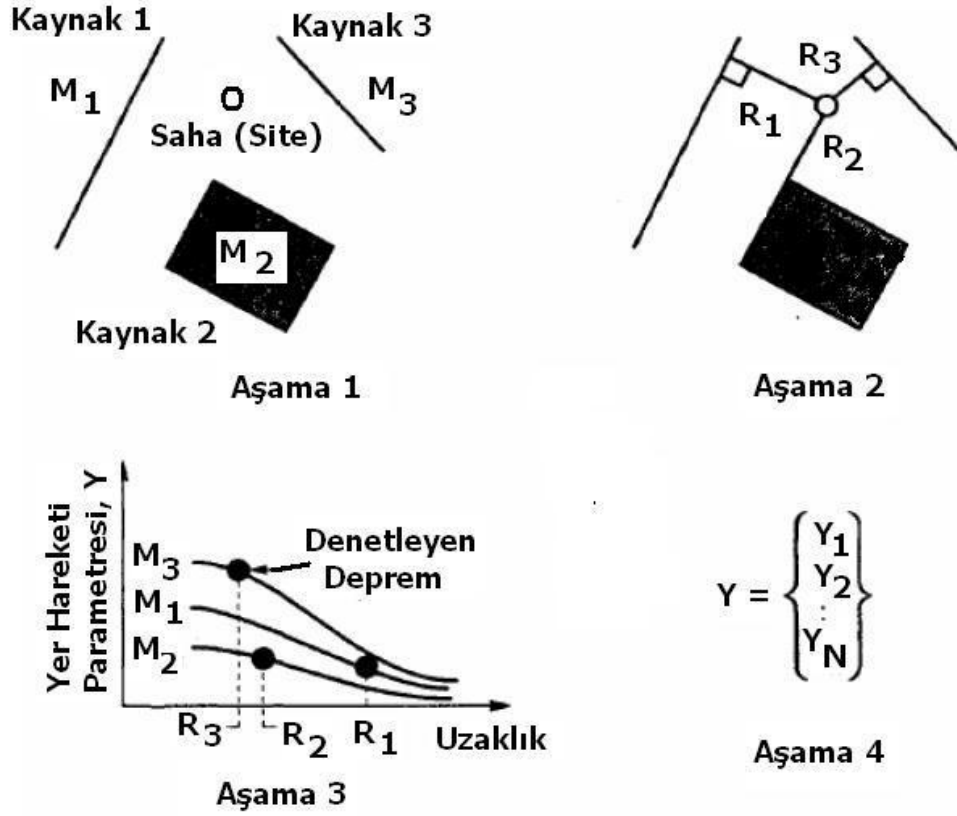
5.1. Sismik Tehlike Analizi

Sismik tehlike analizi, belli bir alanda gelecekte olması muhtemel depremin etkisini tahmin etmektedir. Sismik tehlike analizlerindeki zorluk bölgede olması muhtemel depremin belirlenmesiyle ilgilidir. Tasarım yer hareketi belirlenirken geçmişte bölgede tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelmiş deprem bilgileri derlenmekte, bölge jeolojik ve morfolojik açıdan araştırılmakta, depremi meydana getiren kaynak noktaları belirlenip kaynak karakteristikleri ortaya konularak gelecekte olması muhtemel deprem sayısal olarak ifade edilmektedir. Gelecekte olması muhtemel depremin konumu, büyüklüğü, oluş zamanı ve diğer özellikleri belirsizlik arzettiği için sismik tehlikenin belirlenmesinde olasılık hesaplarından faydalanılmaktadır. Deprem tehlikesinin belirlenmesi amacıyla iki yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar;

- a) Deterministik Deprem Tehlike Analizi (D.D.T.A.)
- b) Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi (O.D.T.A..)

5.1.1. Deterministik Deprem Tehlike Analizi

Sismik tehlikenin belirlenmesinde D.D.T.A. deprem mühendisliğinin ilk zamanlarından beri kullanılmaktadır. Bu analiz yönteminde belirli bir senaryo deprem geliştirilmekte ve deprem tehlikesinin değerlendirilmesi buna göre yapılmaktadır. Senaryo deprem, çoğunlukla olması muhtemel depremlerden en riskli olanlarının seçilmesi şeklinde olmaktadır. Deterministik tehlike analizinde mümkün olan en büyük depremin en kısa mesafede meydana geldiği kabul edilmektedir [90]. Deterministik tehlike analizi genellikle dört aşamada yapılmaktadır. Şekil 5.1.'de deterministik tehlike analizinin adımları verilmiştir.



Şekil 5. 1. Deterministik deprem tehlike analizinin aşamaları [90]

1. Bölgede önemli ölçüde yer hareketi oluşturabilecek tüm deprem kaynakları tespit edilmekte ve bunların kaynak özellikleri ortaya konularak her kaynak zonunun ürettiği en büyük deprem belirlenmektedir.
2. Belirlenen sismik kaynakların inceleme alanına olan uzaklıkları tespit edilmekte ve her kaynak zonunun kaynak ve inceleme alanı arasındaki en kısa mesafesi belirlenmektedir.
3. Her kaynak zonu için en kısa mesafede meydana gelen en büyük magnitudlü depremlerin oluşturduğu yer hareket parametreleri uygun azalım ilişkileri kullanılarak tespit edilmekte ve karşılaştırılarak en büyük yer hareket parametrelerini üreten deprem belirleyici deprem olarak seçilmektedir.
4. Belirleyici deprem kullanılarak inceleme alanındaki pik ivme, pik hız ve tepki spektrumları şeklinde sismik tehlike belirlenmektedir.

5.1.2. Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi

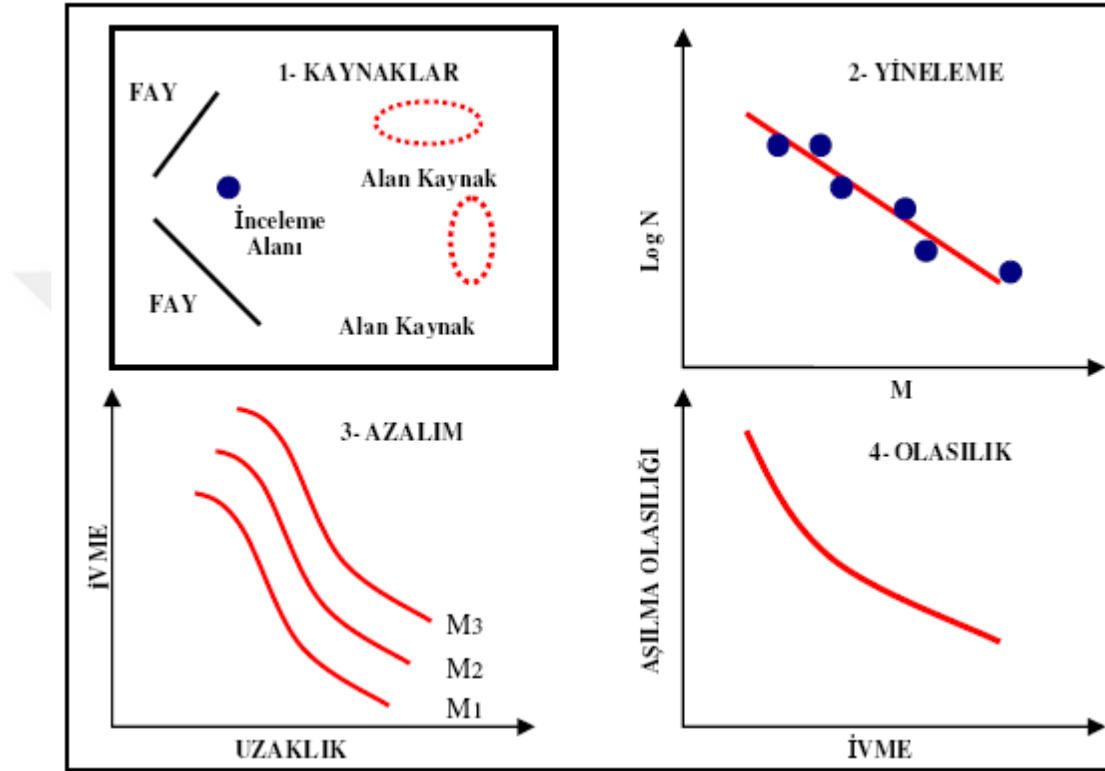
Olasılıksal deprem tehlike analizinde (O.D.T.A.), çalışma alanını etkileyebilecek tüm sismik kaynaklar göz önüne alınmakta ve bir senaryo depremi için yıllık aşılma olasılıkları dikkate alınarak istenilen aşılma olasılıklarına göre analizler yapılmaktadır. Konutlar için ortalama bir yapının ömrü 50 yıl olarak alındığında ve %10 aşılma olasılığına göre analizler yapıldığında yeterli güvenlik sağlanmış olmaktadır. Ancak daha kritik öneme sahip hastane, okul gibi yapılar için daha düşük olasılık seviyelerinin seçilmesi gerekli olmaktadır. O.D.T.A. önemli mühendislik projelerin de sismik tehlikenin değerlendirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır [99, 100, 101, 102, 103].

Olasılıksal sismik tehlike haritaları, birçok çalışmada tehlike potansiyelini göstermek amacıyla hazırlanmaktadır. Bu haritalar, belirli alanları etkileyen yer hareketi sonuçları, lokasyonları ve büyüklüklerindeki belirsizlikleri dikkate alarak hazırlanmaktadır. Bu haritaların hesaplamaları çoğunlukla 50 yılda % 10 aşılma (475 yıllık dönüş periyodu) olasılığına göre yapılmaktadır. Bu olasılık seviyesi, genellikle yüksek sismik potansiyele sahip alanlardaki yapıların tasarımında tercih edilmektedir [104]. Olasılıksal deprem tehlike analizini, deterministik analizde olduğu gibi dört adımlı bir işlem olarak tanımlamak mümkündür. Bunlar;

1. Bölgeyi etkileyebilecek tüm deprem kaynakları tespit edilmektedir.
2. Her kaynak zonunda farklı magnitütteki depremlerin tekrarlama süresi tanımlanmaktadır.
3. Belirlenen kaynak alanlarında meydana gelecek herhangi bir büyüklükteki depremin çalışma alanında meydana getireceği yer hareketleri uygun azalım ilişkileri ile elde edilmektedir.
4. Depremin lokasyonu, büyüklüğü ve oluşum parametrelerindeki belirsizlikler dikkate alınarak belli bir zaman aralığında yer hareketi parametrelerinin aşılma olasılığı deprem oluşum modelleri ile belirlenmektedir.

Sismik kaynaklardaki depremlerin oluşumlarının Poisson dağılımı ile doğru bir şekilde karakterize edildiği varsayılmaktadır [105].

Bu olasılık dağılımı, senaryo depremin tüm olası büyüklük ve merkez üssü mesafelerini göz önünde bulundurarak, yer hareketini belli bir zaman periyodu içinde aşılma oranı olarak tanımlamaktadır [104]. Şekil 5.2’de olasılıksal deprem tehlike analizinin adımları verilmiştir.



Şekil 5. 2. Probalistik deprem tehlike analizi aşamaları [106]

5.2. Poisson Olasılık Modeli

Poisson olasılık dağılımı depremlerin meydana gelme olasılığını hesaplamak amacıyla geliştirilmiş yöntemlerin en basit olanlarından [105]. Bu dağılım yönteminde, depremlerin mekansal ve zamansal olarak birbirinden bağımsız oldukları varsayılmaktadır. Poisson modelinde, belirli bir sismik kaynak için bir depremin meydana gelme olasılığı Eşitlik 5.1 ile ifade edilmektedir.

$$P_A \left(\frac{n}{m}, t \right) = [\exp(-\lambda_A(m) t)^n] / n! \quad (5.1)$$

Burada $P_A \left(\frac{n}{m}, t \right)$ t zaman aralığında, m büyüklüğüne eşit veya daha büyük, n sayıda depremlerin oluşma ihtimalidir. Oluşma hızının ortalaması ise $-\lambda_A(m)$ ile ifade edilmektedir. t zaman aralığında oluşması beklenen m büyüklüğüne eşit veya daha büyük depremlerin sayısı Eşitlik 5.2'de verilmektedir.

$$E_A \left(\frac{n}{m}, t \right) = \lambda_A(m) \quad (5.2)$$

T zaman aralığında m büyüklüğüne eşit veya daha büyük en az bir depremin oluşma olasılığı ise Eşitlik 5.3'de verilmektedir.

$$P(n > 0 | m, t) = 1 - \exp[-\lambda_A(m)t] \quad (5.3)$$

Bir depremin ortalama yinleme aralığı, $RI_A(m)$, oluşma hızının tersi ile Eşitlik 5.4'deki gibi ifade edilmektedir.

$$RI_A(m) = 1/\lambda_A(m) \quad (5.4)$$

Poisson dağılımında, t yıl içerisinde, z seviyesi üstünde en az bir depremin oluşma olasılığı, Eşitlik 5.5'de ifade edilmektedir.

$$P_E(A > z, t) = 1 - \exp[-v(A > z)t] \text{ veya } P_E(z) = 1 - \exp[-v_z t] \quad (5.5)$$

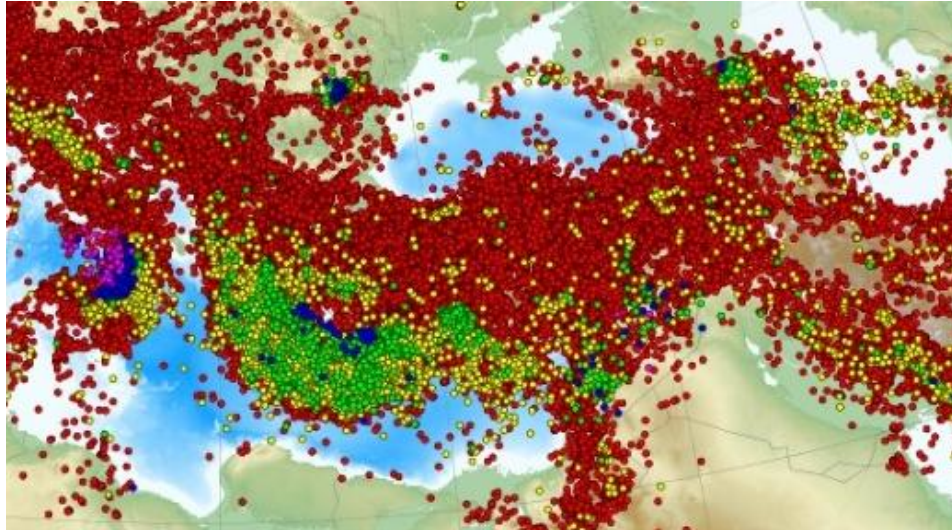
Burada $v_z = v(A > z)$ bir alanda z seviyesi üzerinde meydana gelen depremin yıllık oranıdır. Kuvvetli depremler için ortalama dönüşüm periyodu (RP), v_z 'nin tersi olarak Eşitlik 5.6'daki gibi ifade edilmektedir.

$$RP = 1/v_z \quad (5.6)$$

Çalışmalarda olasılıksal deprem tehlike analizi sonuçları RP , $P_E(z)$ ve v_z parametrelerinden biri veya bir kaç ile ifade edilmektedir.

5.3. Kırıkkale için Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi

Deprem tehlike analizlerinin en temel ve önemli girdilerinden biri geçmiş depremlere ait verilerdir. Deprem tehlike analizleri için gerekli geçmiş deprem verileri, tarihi deprem kayıtlarından elde edilebileceği gibi özellikle son yıllarda gelişen kayıt sistemleri sayesinde ulusal ve uluslararası alanda deprem verilerine ulaşmak çok kolay hale gelmiştir. Tüm dünyada deprem verilerinin toplanması derlenmesi ve yorumlanması konusunda çalışmalar yapan kuruluşların sayısı hızla artmaktadır. Bu kuruluşlara örnek olarak Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM), European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC), United States Geology Survey (USGS), Deprem Dairesi Başkanlığı (DDB) verilebilir. Şekil 5.3'de EMSC'den alınmış 1998-2012 yılları arasında meydana gelmiş depremler gösterilmiştir.



Şekil 5. 3. 1998-2012 yılları arası meydana gelen depremler [107]

Kırıkkale’de sismik tehlikenin belirlenmesi amacıyla, Deprem Dairesi Başkanlığı (DDB), Boğaziçi Üniversitesi Deprem Tsunami İzleme Merkezi (BDTİM), United States Geology Survey (USGS) katalogları incelenmiş, tarihi depremler araştırılmıştır. Olasılıksal sismik tehlikenin belirlenmesinde, her kaynak zonu için ayrı analiz yapılması literatürde yaygın olarak görülmektedir. Ancak bu çalışmada kaynak bölgeleri olan Karakeçili Fay Zonu, Seyfe Fay Zonu, Keskin Fayı ve Kırıkkale-Sungurlu Fay Zonu’nda $M_w > 4,5$ olan deprem sayısındaki eksiklik sebebiyle analiz için yeterli veri elde edilemediğinden, Kırıkkale’nin etrafında 100 km yarıçaplı dairesel bir alan içerisinde meydana gelen $M_w > 4,5$ olan depremler dikkate alınarak olasılıksal analiz gerçekleştirilmiştir. Değişik kataloglardan elde edilen ham deprem verileri, tekrarların önlenmesi amacıyla karşılaştırılmış ve aynı verilere sahip depremlerden bir tanesi veri tabanında bırakılarak diğerleri veri tabanından çıkarılmıştır. Farklı ölçeklerde (M_b : Cisim dalgası büyüklüğü, M_L : Yerel büyüklük, M_d : Süreye bağlı büyüklük, M_s : Yüzey dalgası büyüklüğü) verilen büyüklük değerleri, Deniz ve Yücemen [108] tarafından ülke içerisinde son yüzyılda meydana gelen tüm depremlerden oluşan bir veri tabanı kullanılarak elde edilmiş olan ve Eşitlik 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10’da verilen ilişkiler kullanılarak moment büyüklük (M_w) ölçeğine dönüştürülmüştür.

$$M_w = 2,25 \times M_b - 6,14 \quad (5.7)$$

$$M_w = 1,57 \times M_L - 2,66 \quad (5.8)$$

$$M_w = 1,27 \times M_d - 1,12 \quad (5.9)$$

$$M_w = 0,54 \times M_s - 2,81 \quad (5.10)$$

Olasılıksal deprem tehlike analizlerinde sıklıkla kullanılan Poisson modelinde yer hareketlerinin gerek mekân, gerekse zaman açısından birbirlerinden bağımsız olarak meydana geldikleri varsayılmaktadır. Poisson modelinde uygulanan, bağımsızlık şartını sağlamak amacıyla deprem öbekleşmelerinin tespit edilerek öncü ve artçı depremlerin deprem veri tabanından çıkarılması gerekmektedir [109]. Öncü ve artçı depremlerin tespit edilmesine yönelik değişik araştırmacılar tarafından farklı çalışmalar yapılmıştır [110, 111, 112].

Öncü ve artçı depremler mekânsal ve zamansal olarak ana depremin etrafında birbirine benzer dağılımlar göstermektedirler. Bu sebeple, ikincil depremlerin belirlenmesi öncü ve artçı depremler için herhangi bir farklılık göstermemektedir. Burada herhangi bir deprem büyüklüğü düzeyi için, bu düzeyde bulunan bir ana depreme belirli bir uzaklık ve zaman penceresi içinde bulunan tüm depremlerin ilgili ana depremin artçı depremleri olduğu kabul edilmiştir. Bir depremin öncü deprem olabilmesi için ise, kendi büyüklük düzeyi için belirlenmiş olan uzaklık ve zaman pencerelerinin içerisinde, kendisinden daha büyük bir depremin olması gerekmektedir. Bu gibi durumlarda büyüklüğü daha fazla olan ikinci depremin ana deprem olduğu kabul edilmiştir. Bu kabullerin tek istisnası olarak büyüklüğü 6'dan daha fazla olan tüm depremlerin ana deprem olduğu varsayılmıştır.

Öncü ve artçı depremlerin ayırt edilmesinde kullanılan zaman ve uzaklık pencerelerinin boyutları, yukarıda belirtilen varsayımlar çerçevesinde, Deniz [113] tarafından yapılan çalışmaya dayanarak belirlenmiştir. Çizelge 5.1'de Deniz tarafından yapılan çalışmada elde edilen zaman ve uzaklık pencerelerinin boyutları verilmiştir. Tabloda verilmeyen ara değerlerin hesabında, uzaklık için log-doğrusal, zaman için de doğrusal enterpolasyon kullanılması tavsiye edilmektedir.

Çizelge 5. 1. Öncü ve Artçı depremlerin ayırt edilmesinde kullanılacak olan uzaklık ve zaman pencerelerinin boyutları [113]

Magnitüd	Uzaklık (km)	Zaman (gün)
4,5	35,5	42
5,0	44,5	83
5,5	52,5	155
6,0	63,0	290
6,5	79,4	510
7,0	100	790
7,5	125,9	1326
8,0	151,4	2471

Yukarı belirtilenler çerçevesinde Kırıkkale’de olasılıksal deprem tehlike analizinde kullanılacak depremler, Deniz tarafından verilen, öncü ve artçı depremlerin ayırt edilmesinde kullanılan zaman ve uzaklık pencerelerinin boyutlarına göre belirlenmiş ve Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5. 2. Sismik tehlike analizinde kullanılan depremler

No	Depremin Oluş Tarihi	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklik (M_w)
1	06/09/1919	40,68	33,89	10	5,3
2	10/04/1928	40,22	33,67	10	5,8
3	09/04/1930	39,70	34,00	30	5,3
4	28/06/1933	39,30	33,20	30	4,9
5	07/12/1935	40,60	33,60	10	5,3
6	19/04/1938	39,44	33,79	10	6,4
7	27/04/1938	39,89	34,10	10	4,8
8	21/05/1958	40,65	33,36	10	4,8
9	20/01/1965	40,50	34,00	33	4,7
10	19/02/1973	40,28	33,86	22	5,0
11	27/04/1973	38,65	32,92	29	4,9
12	22/09/1975	40,36	33,40	3	4,9
13	04/07/1978	39,45	33,19	23	4,9
14	04/21/1983	40,65	33,36	36	4,8
15	04/06/1985	39,55	32,93	5	4,5
16	08/05/1990	40,23	33,88	17	4,7
17	24/08/1999	39,61	32,62	8	4,8
18	08/12/2001	40,22	33,81	10	4,5
19	30/07/2005	39,42	33,11	1	5,4
20	20/12/2007	39,423	33,067	7	5,5
21	31/01/2008	40,245	33,200	5	5
22	15/03/2008	39,459	33,008	12	5,2

5.3.1. Oluşum Sayısı Büyüklük İlişkisi Parametrelerinin Belirlenmesi

Deprem büyüklüklerinin olasılık dağılımı, büyüklükler ile depremlerin oluş sayıları arasındaki ilişkiyi veren yineleme bağıntılarından elde edilmektedir. Bu amaca yönelik olarak literatürde yaygın bir şekilde Gutenberg-Richter [114, 115, 116, 117] tarafından önerilen (Eşitlik 5.11) doğrusal büyüklük-oluşum sayısı ilişkisi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

$$\log N = a - bM \quad (5.11)$$

Burada;

N: Birim zaman içinde büyüklük değeri M'ye eşit yıllık deprem sayısı

M: Deprem Büyüklüğü

a ve b: Regresyon katsayıları

a ve b katsayıları her kaynak zonunun birbirinden farklı özelliklere sahip olması nedeniyle farklı değerler almaktadır. a katsayısı seçilen bir bölgede verilen zaman aralığında $M > 0$ olan tüm depremlerin sayısı, b katsayısı ise bir bölgedeki sismik aktivitenin şiddetinin bir ölçüsüdür.

$\log N = a - bM$ bağıntısındaki a ve b katsayılarını bulmak için en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde doğru denkleminin parametreleri (a,b) Eşitlik 5.12 ve 5.13 kullanılarak bulunmektedir.

$$b = (\sum XiYi - [(\sum Xi\sum Yi)/m]) / [(\sum Xi^2) - [(\sum Xi)^2/m]] \quad (5.12)$$

$$a = [\sum Yi/m] - b[\sum Xi] \quad (5.13)$$

m: Regresyon için veri sayısı

X_i : Her büyüklük aralığı için ortalama büyüklük (M)

Y_i : Yıllık kümülatif oluşum sayısının logaritması

Poisson olasılık modelinde risk Eşitlik 5.14 verilen bağıntı kullanılarak belirlenmektedir.

$$R = 1 - e^{-((\log N = a - bM).D)} \quad (5.14)$$

Burada;

D: Yıl

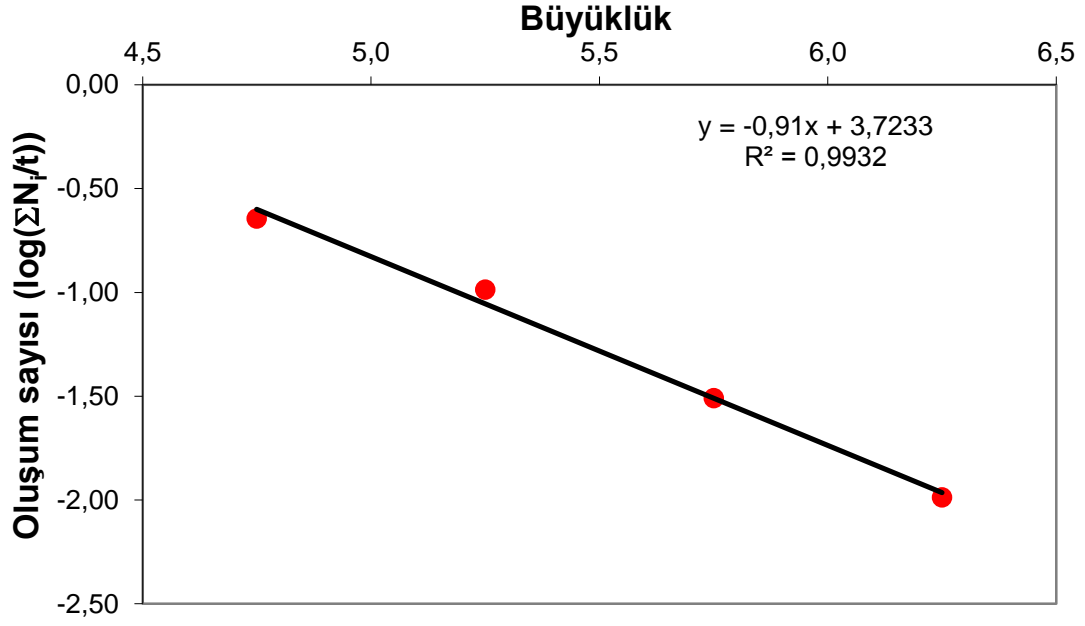
R: D yılda M büyüklüğü için aşılma olasılığı

Yer hareketlerinin yapılara olan etkileri incelenirken ortalama bir yapı ömrü süresince meydana gelebilecek en riskli yer hareketlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Böyle bir tasarım depremi, 50 yıllık yapı ömrü boyunca % 10 aşılma ihtimaline göre veya 475 yıllık bir dönüşüm periyoduna sahip bir deprem olarak dikkate alınmaktadır. Böyle bir deprem çoğu yapının tasarımı için kabul edilebilir bir kriter olarak görülmektedir.

Kırıkkale'nin etrafındaki 100 km yarıçaplı dairesel bir alan içerisinde, deprem kataloglarından elde edilen ve Çizelge 5.2'de gösterilen deprem verileri kullanılarak, depremlerin oluş sayısı ve yığınsal frekans değerleri belirlenmiş ve Çizelge 5.3'de gösterilmiştir. Bu değerlerden faydalanarak elde edilen büyüklük sıklık grafiği ise Şekil 5.4'de verilmiştir. Çizelge 5.4'de farklı yıl ve büyüklük değerlerine karşılık gelen olasılık değerleri görülmektedir. Kırıkkale için 50 yılda % 10 aşılma olasılığına göre tasarım depreminin büyüklüğü M_w 7 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5. 3. Depremlerin oluş sayısı ve yığınsal frekans değerleri

Magnitüd Aralığı	4.5≤M<5.0	5.0≤M<5.5	5.5≤M<6.0	6.0≤M<6.5
Ortalama Büyüklük M (X_i)	4,75	5,25	5,75	6,25
Oluşum Sayısı (N_i)	12	7	2	1
Kümülatif Oluşum Sayısı (ΣN_i)	22	10	3	1
Yıllık Kümülatif Oluşum Sayısı(ΣN_i/t)	0,2268	0,1030	0,0309	0,0103
Log (ΣN_i /t) (Y_i)	-0,6443	-0,9867	-1,5096	-1,9867



Şekil 5. 4. Büyüklük-oluşum sayısı ilişkisi

Çizelge 5. 4. Farklı yıl ve büyüklük değerlerine karşılık gelen olasılıklar

Büyüklük	10 yıl için Olasılık (%)	50 yıl için Olasılık (%)	75 yıl için Olasılık (%)	100 yıl için Olasılık (%)	Ortalama Tekrarlama Periyodu
4,5	98.57	100.00	100.00	100.00	2.4
5,0	77.47	99.94	100.00	100.00	6.7
5,5	40.71	92.67	98.02	99.46	19.1
6,0	16.75	60.02	74.72	84.02	54.5
6,5	6.23	27.50	38.27	47.44	155.5
7	2.23	10.67	15.56	20.19	443.3
D (yıl)		% Aşılma olasılığı		M (Büyüklük)	
50		10		7	

5.4. Yer Hareketinin Tahmini

Deprem bölgelerinde yapılar farklı seviyelerde deprem etkilerine maruz kalırlar. Deprem etkilerini tahmin metotlarıyla, yapıların depreme dayanıklı tasarımı için yer hareket parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir [90].

Genelde, sismik kaynakların inceleme alanlarında oluşturduğu yer hareket parametrelerini belirlemek amacıyla iki yöntem kullanılmaktadır.

- a) Azalım ilişkileri ve deterministik deprem tehlike analizlerinden elde edilen belirleyici deprem senaryosunu kullanarak
- b) Azalım ilişkileri ve yüzey kırığı uzunluğundan belirlenen kabul edilebilir maksimum büyüklüğü kullanarak

Yer hareket parametreleri azalım ilişkileriyle belirlenebilmektedir. Bu ilişkiler sahanın jeolojik şartlarını, deprem kaynak mekanizmasını ve kaynak mesafesini dikkate almaktadır. Elde edilen ilişkiler, azalım ilişkileri ve yer hareket modeli olarak bilinmektedir ve kaydedilmiş kuvvetli yer hareket verilerini kullanarak regresyon analizleriyle geliştirilmektedir [118].

Pik yer ivmesi (PGA), hızı (PGV) ve deplasmanı (PGD) zaman tanım alanında yaygın kullanılan kuvvetli yer hareketi parametreleridir. Deprem mühendisliği uygulamalarında önemli yer hareketi özellikleri;

1. Genlik
2. Frekans içeriği
3. Süre

olarak bilinmektedir. Bu özelliklerin her biri deprem esnasında yapıların davranışını etkileyebilmektedir. Pik yer hareketleri, titreşim genliklerini önemli derecede artırmaktadır. Kuvvetli yer hareketinin süresi ise, yapıların maruz kaldığı yüklemeye çevrimlerinin sayısını etkilemektedir. Uzun süreli ve ortalama pik ivmeli yer

hareketleri, kısa süreli ve yüksek pik ivmeli yer hareketlerinden daha fazla yıkıcı olabilmektedir [119].

Yer hareketinin frekans içeriği, Fourier dönüşümü ile zaman tanım alanından frekans tanım alanına dönüştürülerek incelenmektedir. Frekans alanında, kuvvetli yer hareketlerini ayırt etmede ve tanımlamada davranış spektrumları kullanılmaktadır [120]. Davranış spektrumlarının frekans içeriği, % 5 sönüm oranında spektral ivmeyle bağlantılı ortalama periyot veya hakim periyot kullanılarak tanımlanmaktadır. Frekans içeriği, yapıların davranış özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Yapılarda, yapının doğal frekansı ile yer hareketinin hakim frekansı birbirine yakın olduğunda, yapılara etkiyen deprem yükleri artmaktadır.

5.5. Azalım İlişkileri

Ölçülen yer hareketleri, kuvvetli yer hareketi parametreleri için tahmin ilişkilerinin geliştirilmesini kolaylaştırmak amacıyla bir veri tabanında toplanmaktadır. Yer hareketi parametrelerinin tahmini, yaygın olarak azalım ilişkileri ile yapılmaktadır. Azalım ilişkileri, zemin koşulları, kaynak mesafesi ve büyüklüğün yanı sıra, sismik dalgaların enerji kaybını göz önünde bulundurarak yer hareketi değişiminin analitik ifadesidir. Yer hareketi azalım ilişkileri, hem deprem kayıtlarını kullanarak ampirik olarak hem de sismolojik modelleri uygularken sentetik yer hareketleri oluşturmak için teorik olarak türetilmektedir [119]. Kuvvetli yer hareketi azalım ilişkileri tüm dünyada birçok araştırmacı tarafından elde edilmiştir. Joyner ve Boore [121], Campbell [122], Ambraseys ve Bommer [123], Ohno vd. [124], Aydan vd. [125], Aydan [126], Sadigh ve Egan [127], Kalkan ve Gülkan [128], Ulusay vd. [129], Özbey vd. [130], Ambraseys vd. [131], Akkar ve Bommer [132], Güllü ve Erçelebi [133], Kayabalı ve Beyaz [134] bu azalım ilişkilerine örnek olarak verilebilir.

Kuvvetli yer hareketi literatürüne en son ve önemli katkılardan biri “Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)” tarafından “Next Generation Attenuation WEST2 (NGA-WEST2)” olarak adlandırılan proje kapsamında üretilen yeni nesil azalım ilişkileridir. PEER NGA WEST2 projesinde beş farklı çalışma grubu;

Abrahamson, Silva ve Kamai (ASK13) [135], Boore, Stewart, Seyhan ve Atkinson (BSSA13) [136], Campbell ve Bozorgnia (CB13) [137], Chiou ve Youngs (CY13) [138] ve Idriss (I13) [139] yeni nesil yer hareketi tahmin denklemlerinin geliştirilmesinde görev almıştır. PEER NGA-WEST2 projesinin amacı yer hareketi parametrelerini tahmin denklemlerinin geliştirilmesidir.

ASK 13 yer hareketi modeli, PEER NGA WEST2 veri seti kullanılarak, aktif tektonik bölgelerdeki yıkıcı depremlerin pik yer ivmesi (PGA), pik yer hızı (PGV) ve farklı periyotlardaki spektral ivme (S_a) değerleri gibi ortalama yatay bileşenlerini tahmin etmektedir. ASK13 modeli, 1-10 s arasında spektral periyotlara, 3-8,5 deprem büyüklüğüne ve 0-300 km mesafelere uygulanabilmektedir. BSSA 13 modeli, zemin yüzeyinden 30 m derinlik boyunca ortalama kayma dalgası hızının (V_{S30}) 150 m/s'den 1500 m/s'ye değiştiği zemin şartlarında, 400 km mesafelerde ve deprem büyüklüğünün normal faylar için 3-7, ters ve yanal atımlı faylar için 3-8,5 arasında değiştiği durumlarda kullanılabilir. BSSA13 modeli, 0-10 s arasındaki S_a , PGA ve PGV gibi yer hareket parametrelerini tahmin etmektedir. CB13 modeli ise fay tipine bağlı olarak deprem kaynağından 300 km mesafeye kadar büyüklüğü 3,3 ile 8,5 arasında değişen depremlerin yer hareket parametrelerini belirlemede kullanılmaktadır. CY13 modeli, V_{S30} değerinin 180-1500 m/s arasında olduğu, 300 km mesafelere kadar, kırık yüzeyine dik mesafesi en fazla 20 km olan, büyüklüğü normal ve ters faylar için 3,5-8, yanal atımlı faylar için 3,5-8,5 olan aktif tektonik bölgelerdeki yer hareketi parametrelerini tahmin edebilmektedir. I13 modeli ise, V_{S30} değerinin 450-2000 m/sn arasında olduğu zeminlerin ve büyüklüğü 5-8 olan depremlerin yer hareket parametrelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Ancak bu modelin kullanımı $V_{S30} \geq 450$ m/s, mesafenin 150 km'den daha az ve deprem büyüklüğünün (M) ≥ 5 olduğu durumlarla sınırlıdır. Bu çalışmada hedef spektrumunu belirlemek için Abrahamson, Silva ve Kamai (ASK13), Boore, Stewart, Seyhan ve Atkinson (BSSA13) ve Campbell ve Bozorgnia (CB13) yer hareketi azalım modelleri kullanılmıştır.

5.5.1. Abrahamson, Silva ve Kamai (2013) Azalım İlişkisi Modeli

Abrahamson, Silva ve Kamai (ASK13) yer hareketi tahmin denklemi, kaynak özelliklerinin, zemin koşullarının, mesafe parametrelerinin ve yer hareketi seviyesinin fonksiyonu olarak geliştirilmiştir. Denklem pik yer ivmesi (PGA), pik yer hızı (PGV) ve 0-10 s arasındaki spektral ivmeleri (S_a) tahmin edebilmektedir. Bu denklem deprem büyüklüğünün 3-8,5 arasında ve mesafenin 0-300 km olduğu durumlar için kullanılabilir. Bu modelde ortalama yer hareketi, aşağıdaki Eşitlik 5.15 kullanılarak elde edilmektedir.

$$\ln S_a (g) = f_1(M, R_{rup}) + F_{RV}f_7(M) + F_Nf_8(M) + F_{AS}f_{11}(CR_{jb}) + f_5(Sa_{1100}, V_{s30}) + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{s30}) + Regional(V_{s30}, R_{rup}) \quad (5.15)$$

Eşitlik 5.15’de verilen denklemde kullanılan parametrelerin tanımı Çizelge 5.5.’de verilmiştir.

Çizelge 5. 5. ASK13 modelinde kullanılan parametreler

Parametre	Tanım
M	Deprem Büyüklüğü (km)
R_{rup}	Kırık yüzeyine en yakın mesafe (km)
F_{RV}	Ters fay için indeks
F_N	Normal fay için indeks
F_{AS}	Artçı sarsıntı indeksi
CR_{jb}	Merkezi Joyner-Boore mesafesi (km)
Sa_{1100}	$V_s=1100$ m/sn olduğu derinlikteki ortalama S_a
V_{s30}	Üst 30 m’deki ortalama kayma dalgası hızı (m/s)
F_{HW}	Tavan bloğu etkisi
R_x	Fay doğrultusuna dik kırığın üst kenarından ölçülen yatay mesafe (km)
R_{y0}	Kırık sonunda doğrultuya paralel ölçülen yatay mesafe
W	Kırık genişliği (km)
dip	Fayın eğim açısı
Z_{TOR}	Kırık yüzeyine dik mesafe (km)
$Z_{1.0}$	$V_s=1.0$ km/sn olduğu derinlik (km)

5.5.2. Boore, Stewart, Seyhan ve Atkinson (2013) Azalım ilişkisi

Boore, Stewart, Seyhan ve Atkinson (BSSA13) yer hareketi azalım ilişkisi modeli, 400 km mesafe içerisinde, deprem büyüklüğü ters ve doğrultu atımlı faylarda 3-8,5, normal faylarda 3-7 olan ve zemin koşullarının $V_{s30}=150-1500$ m/s arasında değiştiği durumlarda, PGA, PGV ve 0-10 s arasındaki periyotlarda S_a değerlerini tahmin edebilmektedir. Denklemin fonksiyonel biçimi Eşitlik 5.16’de verilmiştir.

$$\ln Y = F_E(M, mech) + F_{P,B}(R_{JB}, M) + F_{S,B}(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon_n \sigma(M, R_{JB}, V_{S30}) \quad (5.16)$$

Eşitlik 5.16’da verilen denklemde kullanılan parametrelerin tanımı Çizelge 5.6.’da verilmiştir.

Çizelge 5. 6. BSSA13 modelinde kullanılan parametreler

Parametre	Tanım
Y	Pik yer ivmesi (PGA), pik yer hızı (PGV) veya spektral ivme (S_a) cinsinden medyan yer hareketini temsil etmektedir
F_E	Kaynak bağımlı fonksiyon
$F_{P,B}$	Mesafe fonksiyonu
$F_{S,B}$	Zemin büyütmesi fonksiyonu
M	Moment büyüklüğü
mech	Fay tipi
R_{JB}	Joyner-Boore mesafesi (fayın yüzey izdüşümüne en yakın mesafe olarak tanımlanır)
V_{s30}	Üst 30 m’de ortalama kayma dalgası hızı
ε_n	$\ln Y$ ’nin tahmin edilen tek değerinin standart sapmasının kesirli sayısı
σ	Modelin toplam standart sapması

5.5.3. Campell ve Bozorgnia (2013) Azalım İlişkisi

Campell ve Bozorgnia (CB13) yer hareketi azalım ilişkisi modeli, 0,01-10 s periyotlardaki % 5 sönüm oranına sahip spektral ivmeleri (S_a), pik yer ivmesini (PGA) ve pik yer hızını (PGV) tahmin edebilmektedir. Denklem, dünyanın aktif tektonik bölgelerinde kaynaktan 300 km uzaklıktaki mesafelere kadar, fay tipine bağlı olarak 3,3-8,5 büyüklüğündeki depremlerin yer hareket parametrelerini tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır. Tahmin denklemi Eşitlik 5.17’de verilmiştir.

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn} \quad (5.17)$$

Eşitlik 5.17’de verilen denklemde kullanılan parametrelerin tanımı Çizelge 5.7.’de verilmiştir.

Çizelge 5. 7. CB13 modelinde kullanılan parametreler

Parametre	Tanım
f_{mag}	Büyüklik parametresi
f_{dis}	Mesafe parametresi
f_{flt}	Fay tipi parametresi
f_{hng}	Tavan bloğu etkisi
f_{site}	Zemin etkisi parametresi
f_{sed}	Havza etkisi parametresi
f_{hyp}	Odak derinliği parametresi
f_{dip}	Kırık eğim parametresi
f_{atn}	Elastik olmayan azalım parametresi

5.6. Kırıkkale İçin Yer Hareketi Parametrelerinin Tahmini

Deprem davranış spektrumlarının genlikleri ve biçiminde mesafenin etkisi birçok çalışmada değerlendirilmiştir [140]. Mohraz [141] tarafından yer hareketi kayıtları üç bölüme ayrılmıştır;

- a) Yakın mesafe (20 km'den daha az)
- b) Orta mesafe (20-50 km arası)
- c) Uzak mesafe (50 km'de daha büyük)

Azalım ilişkileri, deprem senaryolarında tanımlanan başlangıç verilerini dikkate alarak yer hareketi parametrelerinin tahminini sağlamaktadır. Yer hareket parametrelerinin büyük bir çoğunluğu, her deprem senaryosu için belirlenen büyüklük, kaynak mesafesi ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak belirlenmektedir [142].

Daha önce de belirtildiği gibi, Kırıkkale'de yer hareket parametrelerinin tahmininde NGA WEST2 projesi kapsamında son zamanlarda geliştirilen Abrahamson, Silva ve Kamai (ASK13) Boore, Stewart, Seyhan ve Atkinson (BSSA13) ve Campbell ve Bozorgnia (CB13) azalım ilişkileri kullanılmıştır. Çalışma alanı, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de görüldüğü gibi Karakeçili Fay Zonuna yaklaşık 5 km mesafede, Kırıkkale-Sungurlu Fay Zonu ve Keskin Fay Zonlarına ise 10 km mesafede yer almaktadır. Hedef spektrum ve anakaya pik yer ivmesi (PGA) değerleri hesaplanırken bu mesafeler dikkate alınmıştır. Anakaya PGA değerleri ve hedef spektrum, farklı mesafelerde üç farklı azalım ilişkisi (ASK13, BSSA13, CB13) ile belirlenmiştir. Belirlenen PGA değerleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da hedef spektrum ise Şekil 5.7, 5.8, ve 5.9'da verilmiştir. Hedef spektrum belirlenirken, sismik tehlike analizinden belirlenen 50 yılda % 10 aşılma ihtimaline göre büyüklük değeri 7 dikkate alınmıştır. Mühendislik anakayası kayma dalgası hızının Ansal ve Tönük [143] tarafından 700-750 m/s olarak alınabileceği belirtilmiştir. Ayrıca NEHRP'de anakaya kayma dalgasının sınır değeri B ve C sınıfı zeminler için 760 m/s olarak gösterilmiştir. Aynı sınır değeri (760 m/s) bu çalışmada da anakaya kayma dalgası hızı olarak dikkate alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan parametreler Çizelge 5.8'de verilmiştir. Ayrıca

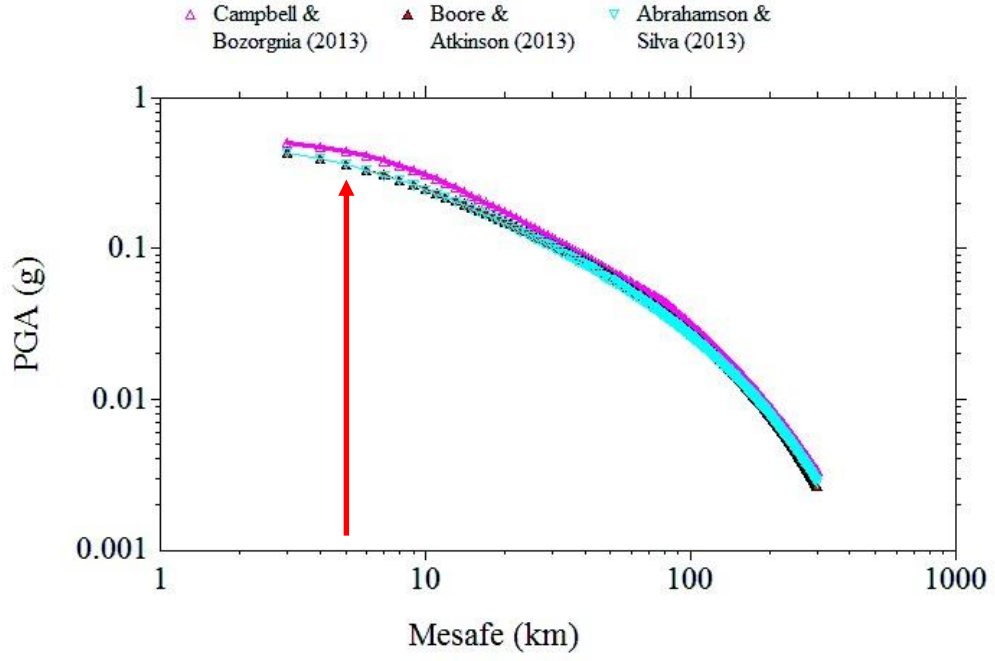
farklı mesafeler için ASK13, BSSA13 ve CB13 azalım ilişkilerinden belirlenen ana kaya pik yer ivmesi (PGA) değerleri de Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5. 8. PGA değerleri belirlenirken kullanılan parametreler

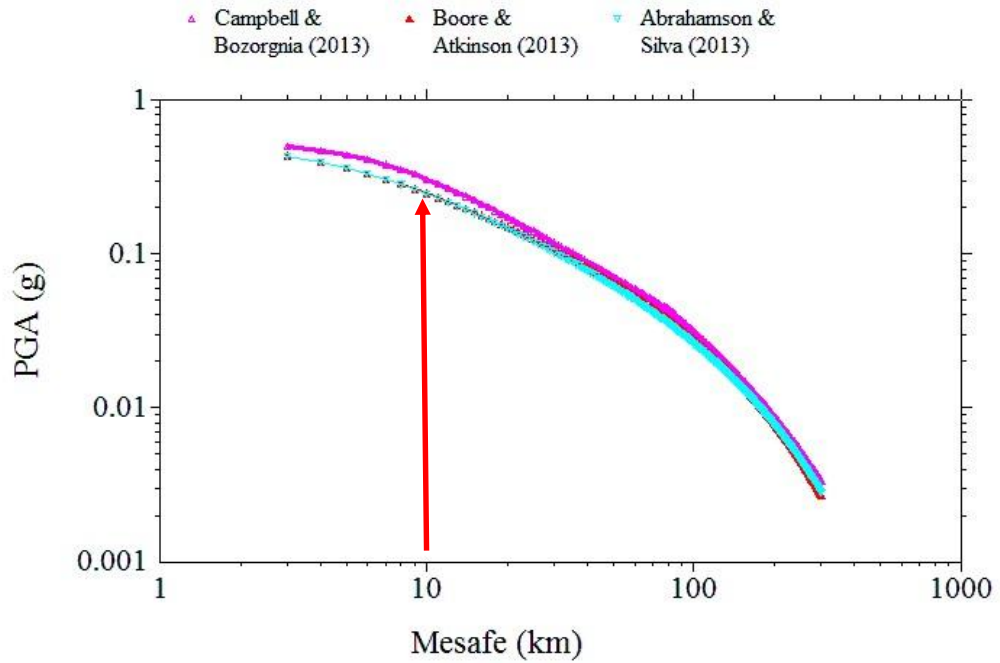
Büyükük (M)	7
Mesafe (km)	5, 10
V_{s30} (m/s)	760

Çizelge 5. 9. Farklı mesafeler için PGA (g) değerleri

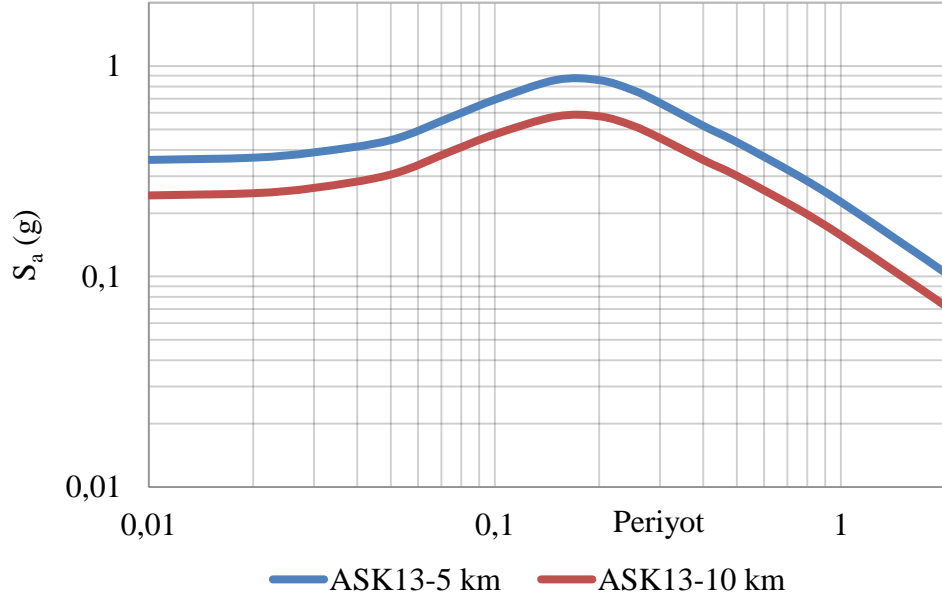
Azalım İlişkisi	Faya Mesafe	
	5 km	10 km
PGA (ASK 2013)	0,360	0,244
PGA (BSSA 2013)	0,362	0,247
PGA (CB 2013)	0,442	0,306



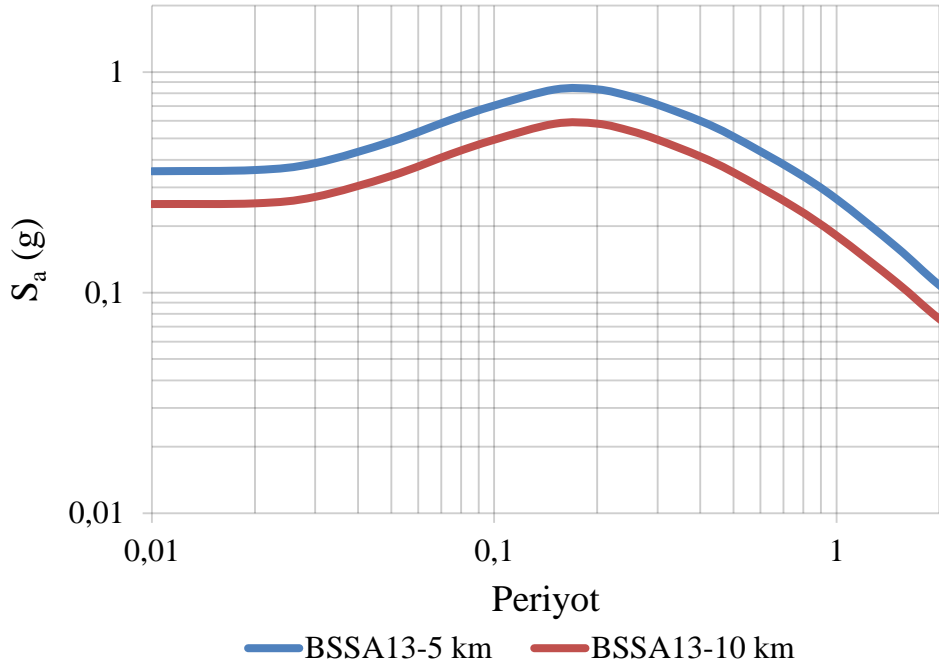
Şekil 5. 5 km mesafe için PGA değerlerinin mesafe ile değişimi



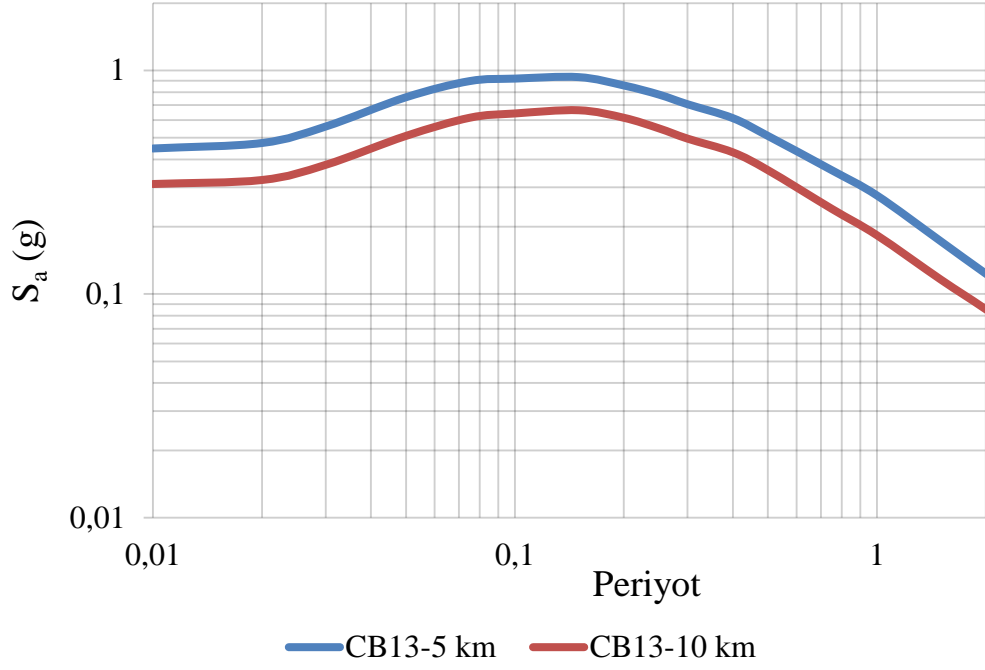
Şekil 5. 6. 10 km mesafe için PGA değerlerinin mesafe ile değişimi



Şekil 5. 7. ASK13 Azalım ilişkisinde belirlenen 5-10 km mesafe için ivme spektrumları

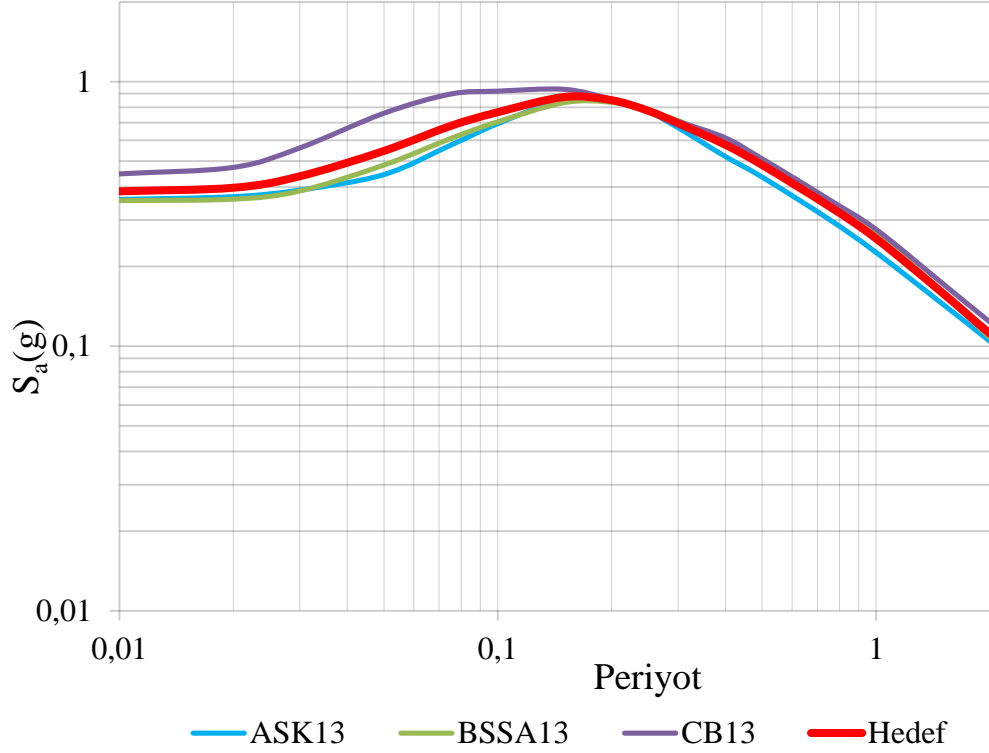


Şekil 5. 8. BSSA13 Azalım ilişkisinde belirlenen 5-10 km mesafe için ivme spektrumları



Şekil 5. 9. CB13 Azalım ilişkisinden belirlenen 5-10 km mesafe için ivme spektrumları

Deprem kayıtlarının elde edilmesinde ve ölçeklenmesinde kullanılacak nihai hedef spektrum belirlenirken, en kötü durum deprem senaryosuna göre mesafe 5 km olarak dikkate alınmış ve üç farklı azalım ilişkisi kullanılmıştır. ASK13, BSSA13 ve CB13 azalım ilişkilerinden elde edilen spektrumların geometrik ortalaması alınarak hedef spektrum belirlenmiş ve Şekil 5.10'da gösterilmiştir. ASK13 ve BSSA13 ile kıyaslandığında CB13 modelinde düşük periyotlarda daha yüksek ivme değerleri gözlenmektedir.



Şekil 5.10. 5 km mesafe için ASK13, BSSA13 ve CB13 azalım ilişkileri ile belirlenen % 5 sönüm oranı için hedef spektrum grafikleri

5.7. Kırıkkale için Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi

Davranış analizlerinde kullanılacak kuvvetli yer hareketlerinin seçimi için, sismik tasarım senaryoları ile benzer yer hareket parametreleri sağlayan seçim kriterleri kullanılmalıdır. Tasarım depremi, genellikle birkaç parametreye dayalı olarak belirlenmektedir. Bu nedenle, deprem kaynağında, sismik dalgaların izlediği yol boyunca ve zemin yüzeyinde tasarım depreminin özellikleri ile benzer olan kayıtları seçmek zor olmaktadır [119]. Seçim yöntemi, aynı zamanda kuvvetli yer hareketlerinin elde edilmesi hedefiyle de ilgilidir. Literatürde deprem kayıtlarının seçilmesiyle ilgili farklı yaklaşımlar mevcuttur [119, 144].

Depremler sırasında yer hareketleri, kayıt cihazlarının geliştirilmesiyle birlikte 1970'lerden beri ölçülebilmekte ve kaydedilebilmektedir. Ancak Kırıkkale tarihinde meydana gelmiş kayıtlı yıkıcı deprem kaydı bulunmamaktadır. Bu yüzden, sismik tehlike analizi sonucunda elde edilen Kırıkkale deprem senaryosuna benzer deprem

kayıtları, PEER veri tabanından (Pacific Ground Motion Database) [145] elde edilmiş ve çalışma alanındaki yer hareketlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. PEER veri tabanı, dünyanın aktif tektonik bölgelerindeki 173 depremin 3551 kaydını içermektedir. Web tabanlı çalışan PEER veritabanı deprem kayıtlarını arama, seçme ve indirme imkanı da sunmaktadır. Her kayıt, ivme, hız ve deplasman parametrelerinin veri dosyalarını içermektedir. İvme, hız, deplasman ve ivme spektrumu parametreleri, veri tabanında ayrı dosyalar olarak elde edilebilmektedir.

PEER veri tabanından deprem kayıtlarının seçilmesinden önce, seçim kriterleri, çalışma alanında meydana gelecek olası deprem büyüklüğü, fay uzaklığı, tipi ve yerel zemin koşulları ilgili olarak Çizelge 5.10'daki parametreler dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 5. 10. Deprem kayıtlarının seçilmesinde kullanılan parametreler

Parametre	Kriter
Fay Tipi	Doğrultu Atımlı
Büyükük	6,5-7,5
Mesafe (km)	0-40
$V_{s30 \text{ min,max}}$ (m/s)	360-760

5.8. Yer Hareketlerinin Ölçeklenmesi

Doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde kullanılan deprem kayıtları tasarım spektrumları kullanılarak belirlenmektedir. Bu kayıtlar doğal deprem kayıtlarından veya yapay kayıtlardan sağlanabilmektedir. Doğal deprem kayıtlarının kullanımının birçok avantajı olmasına rağmen, senaryo depremle tutarlı jeolojik ve sismolojik şartları yerine getirmede yetersiz olabilmektedir. Yapay kayıtlar, hedef spektrumla uygun eşleşmeyi sağlayan tasarım spektrumu vasıtasıyla zaman veya frekans tanım alanında üretilmektedir. Eşleştirme teknikleri zaman tanım alanında, seçilen kaydın

hedef spektruma ölçeklenmesi veya gerçek deprem kayıtlarından sonlu süreli dalgacık (wavelet) eklenmesi veya çıkarılması ile yapılmaktadır [146].

Tasarım spektrumu ile eşleştirmek için deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi ve seçilmesi sürecinde var olan bütün yaklaşımlar birbirine benzemektedir. Genelde ilk olarak bir veya birden çok deprem kaydı seçilir ve daha sonra spektrum eşleşmesi için uygun bir ölçeklendirme yöntemi kullanılır.

Spektral ölçeklendirme yöntemleri Fahjan ve Özdemir [146] tarafından, üç ana başlıkta toplanmıştır.

- a) Zaman tanım alanında yer hareketinin ölçeklenmesi
- b) Frekans tanım alanında spektral eşleştirme
- c) Zaman tanım alanında spektral eşleştirme

Bu çalışmada, zaman tanım alanında yer hareketinin ölçeklenmesi yöntemi kullanılmıştır. Bu işlem kaydın frekans içeriğini değiştirmemekte; sadece kaydın genliklerinde bir değişime sebep olmaktadır. Bir kaydın spektrumunun hedef spektruma ne derece uyum sağladığını değerlendirmek için kullanılan sayısal ölçü “Ortalama Karesel Hata” (MSE), hedef spektrum ve kaydedilmiş hareketin davranış spektrumundaki spektral ivmelerin doğal logaritmasındaki fark olarak Eşitlik 5.15 kullanılarak hesaplanmaktadır [147].

$$MSE = \frac{\sum_i w(T_i) \{ \ln[S A^{hedef}(T_i)] - \ln[f \times S A^{kayit}(T_i)] \}^2}{\sum_i w(T_i)} \quad (5.15)$$

Burada;

MSE : Ortalama karesel hata

$S A^{hedef}$: Hedef ivme davranış spektrumu

$S A^{kayit}$: Kullanılacak kaydın ivme spektrumu

w : Ağırlık fonksiyonu (Basit durumda w (T_i) =1)

f : Ölçek faktörü

MSE'yi en aza indiren ölçek faktörü (f), kullanıcı tarafından belirlenen periyot aralığında hedef spektrumun şekline en uygun eşleşmeyi sağlayan ölçekli kayıtların üretilmesini sağlamaktadır [147]. Ölçek faktörü (f) Eşitlik 5.16 kullanılarak hesaplanmaktadır.

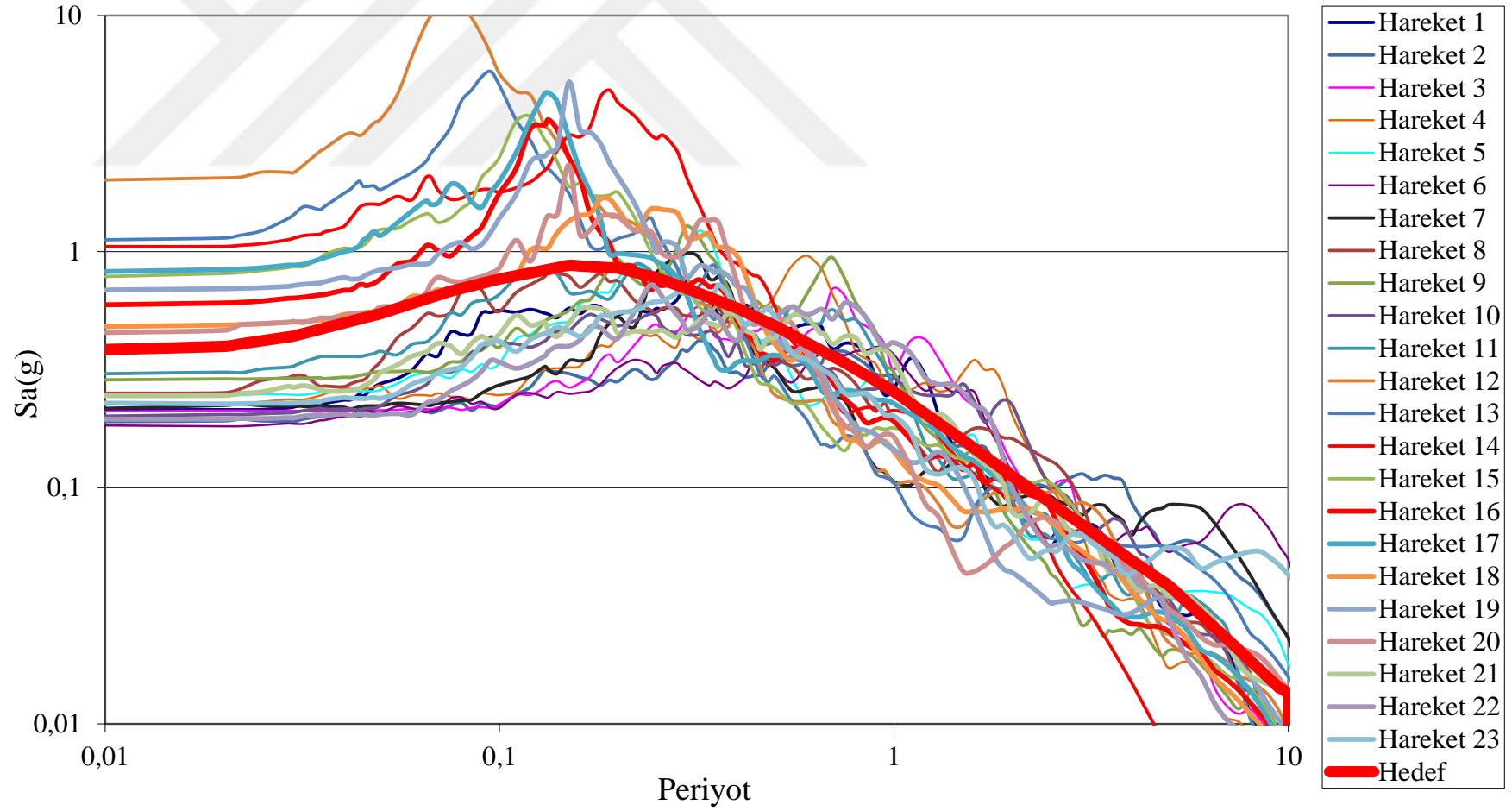
$$\ln f = \frac{\sum_i w(T_i) \ln \left(\frac{SA^{hedef}(T_i)}{SA^{kayıt}(T_i)} \right)}{\sum_i w(T_i)} \quad (5.16)$$

Bu çalışmada seçilen kayıtların davranış spektrumlarının, hedef spektruma ölçeklenmesi işlemi, PEER web sitesindeki simülasyon platformunda bulunan ölçekleme aracı kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 5.8'deki kriterlere ve deprem kaynağına 5 km mesafeye göre ASK13, BSSA13 ve CB13 azalım ilişkilerinden elde edilen spektrumların geometrik ortalamasından belirlenen hedef spektruma göre, PEER veri tabanı (PEER Ground Motion Database) kullanılarak toplam 23 adet deprem kaydı seçilmiştir. Seçilen depremler Çizelge 5.11'de, depremlerin ölçeklenmiş ivme spektrumu grafiği de Şekil 5.11'de verilmiştir.

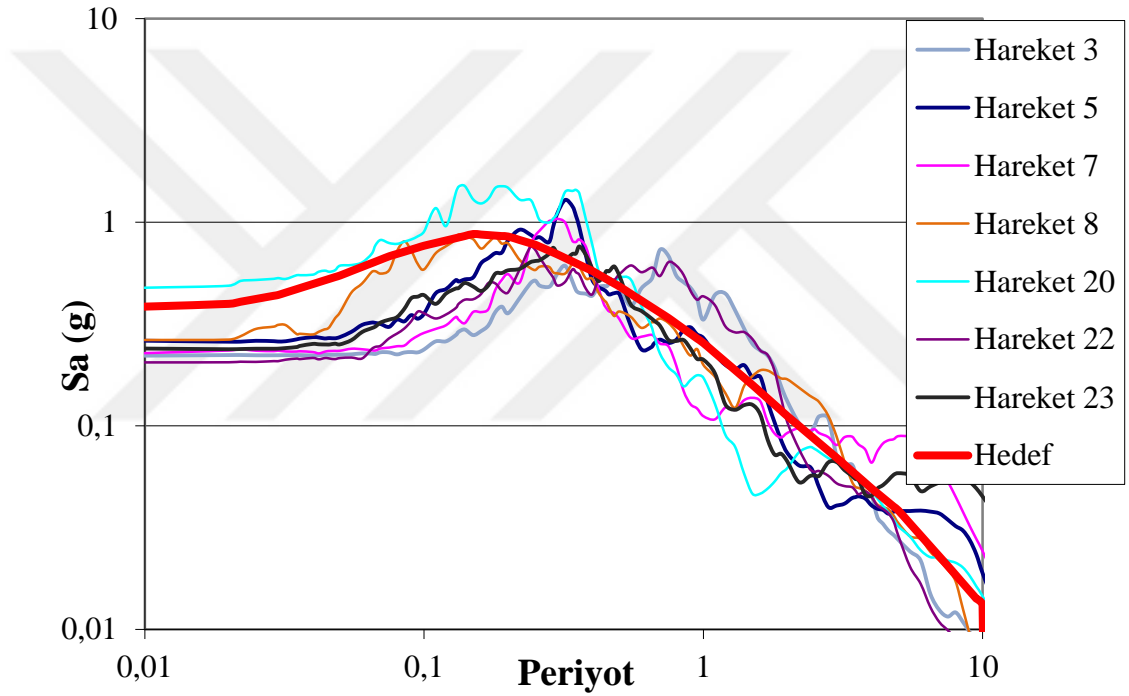
Çizelge 5. 11. PEER veri tabanından seçilen deprem kayıtları

Hareket No	Kayıt No	Deprem Adı	Yıl	İstasyon adı	Büyükük	Fay tipi	R _{jb} (km)	R _{rup} (km)	V _{s30} (m/sn)
1	164	Imperial Valley-06	1979	Cerro Prieto	6.5	Doğrultu Atımlı	15.19	15.19	471
2	838	Landers, USA	1992	Barstow	7.2	Doğrultu Atımlı	34.86	34.86	370
3	864	Landers, USA	1992	Joshua Tree	7.2	Doğrultu Atımlı	11.03	11.03	379
4	881	Landers, USA	1992	Morongo Valley F.S.	7.2	Doğrultu Atımlı	17.36	17.36	396
5	1614	Duzce, Turkey	1999	Lamont 1061	7.1	Doğrultu Atımlı	11.46	11.46	481
6	1616	Duzce, Turkey	1999	Lamont 362	7.1	Doğrultu Atımlı	23.41	23.41	517
7	1619	Duzce, Turkey	1999	Mudurnu	7.1	Doğrultu Atımlı	34.3	34.3	535
8	1633	Manjil, Iran,	1990	Abbar	7.3	Doğrultu Atımlı	12.55	12.55	723
9	3753	Landers, USA	1992	Fun Valley	7.2	Doğrultu Atımlı	25.02	25.02	388
10	3757	Landers, USA	1992	North Palm Springs F. S.	7.2	Doğrultu Atımlı	26.95	26.95	367
11	3759	Landers, USA	1992	Whitewater Trout Farm	7.2	Doğrultu Atımlı	27.05	27.05	425
12	3871	Tottori, Japan	2000	HRS002	6.6	Doğrultu Atımlı	30.71	30.71	458
13	3884	Tottori, Japan	2000	HRS021	6.6	Doğrultu Atımlı	36.32	36.32	409
14	3907	Tottori, Japan	2000	OKY004	6.6	Doğrultu Atımlı	19.72	19.72	475
15	3926	Tottori, Japan	2000	OKYH08	6.6	Doğrultu Atımlı	24.84	24.84	694
16	3927	Tottori, Japan	2000	OKYH09	6.6	Doğrultu Atımlı	21.22	21.22	518
17	3932	Tottori, Japan	2000	OKYH14	6.6	Doğrultu Atımlı	26.51	26.51	709
18	3947	Tottori, Japan	2000	SMNH01	6.6	Doğrultu Atımlı	5.83	5.83	446
19	3948	Tottori, Japan	2000	SMNH02	6.6	Doğrultu Atımlı	23.64	23.64	502
20	6915	Darfield, New Zealand	2010	Heathcote Valley P.S.	7.0	Doğrultu Atımlı	24.36	24.36	422
21	6948	Darfield, New Zealand	2010	OXZ	7.0	Doğrultu Atımlı	30.63	30.63	481
22	6971	Darfield, New Zealand	2010	SPFS	7.0	Doğrultu Atımlı	29.86	29.86	389
23	8597	El Mayor-Cucapah, Mexico	2010	Sam W. Stewart	7.2	Doğrultu Atımlı	31.79	31.79	503



Şekil 5. 11. Hedef spektrum ve seçilen kayıtların spektrumu

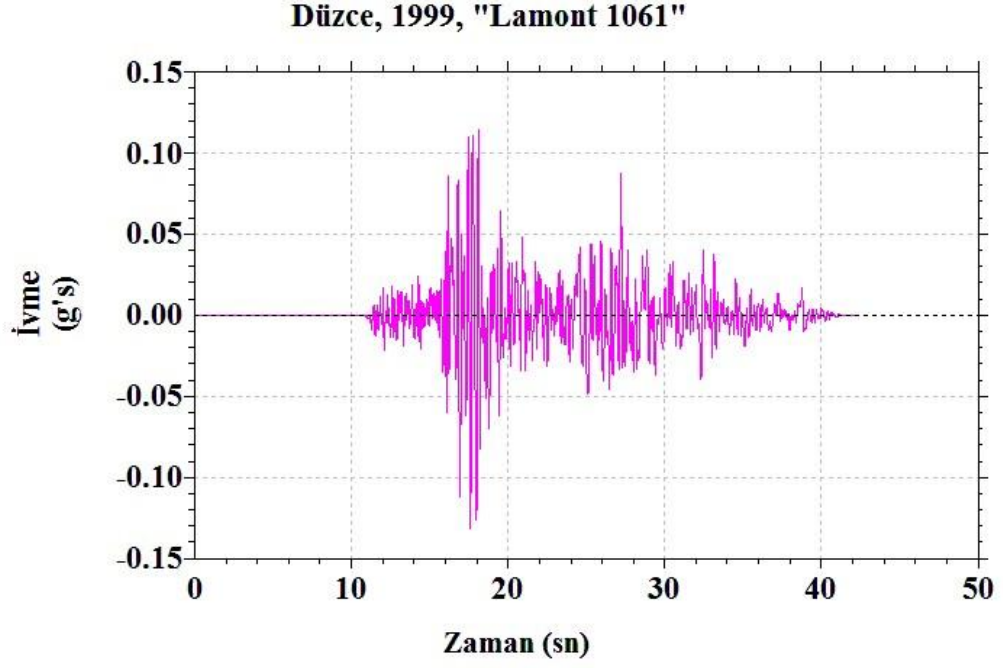
Belirlenen 23 deprem kaydı, zemin özellikleri ve büyüklük bakımından hedef spektruma benzer özellikler gösterse de Şekil 5.11’de görüldüğü gibi bazı periyotlardaki spektral ivme değerleri hedef spektrumdan farklılıklar göstermektedir. Bu yüzden, çalışma alanı için belirlenen 23 kayıt içerisinde görsel olarak hedef spektrumla daha uyumlu olan ve MSE değeri diğerlerine göre daha küçük olan 7 kayıt seçilmiştir. Seçilen kayıtların ölçeklenmiş spektrumu ve hedef spektrumun grafiği Şekil 5.12’de ölçek faktörü değerleri de Çizelge 5.12’de verilmiştir. Bu kayıtların orijinal ivme-zaman grafikleri ise Şekil 5.13 ile Şekil 5.18 arasında verilmiştir.



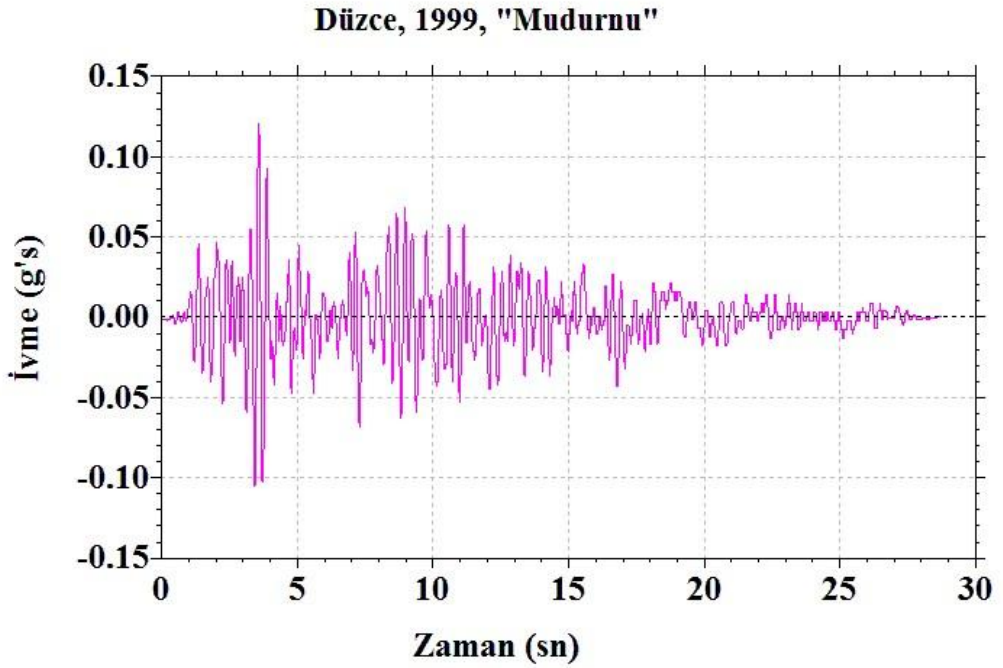
Şekil 5. 12. Hedef spektrum ve ölçeklenmiş kayıtların spektrumu

Çizelge 5. 12. Seçilen depremlerin MSE ve ölçek faktörü değerleri

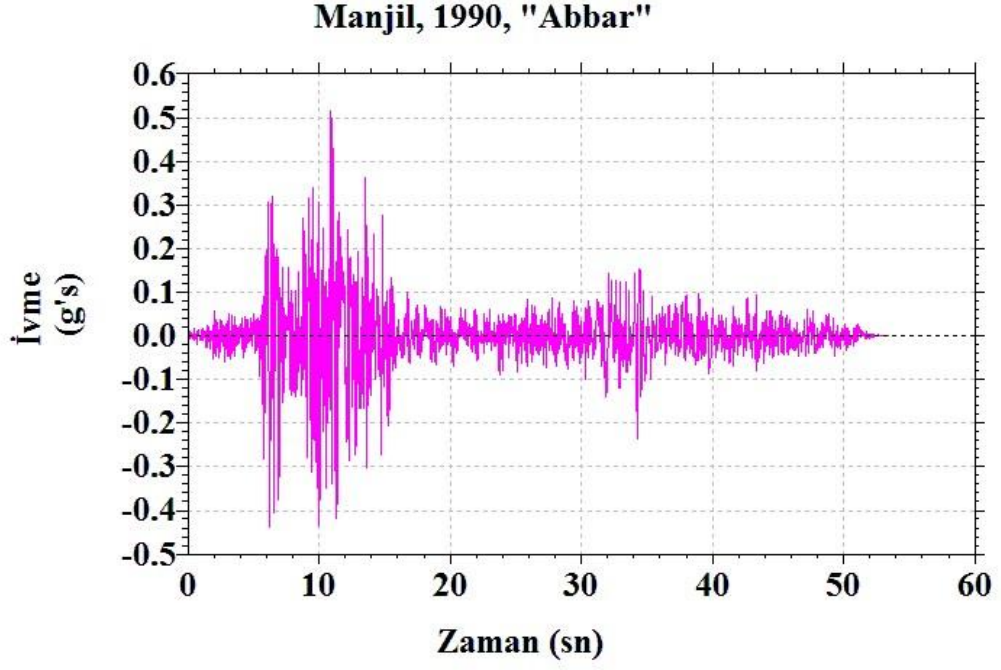
Hareket No	Kayıt No	Deprem Adı	Yıl	İstasyon adı	Büyükük	MSE	Ölçek Faktörü (f)	R_{rup} (km)	V_{S30} (m/s)
3	864	Landers, USA	1992	Joshua Tree	7.2	0.254	0.87	11.03	379
5	1614	Düzce, Türkiye	1999	Lamont 1061	7.1	0.105	2.37	11.46	481
7	1619	Duzce, Türkiye	1999	Mudurnu	7.1	0.292	2.66	34.3	535
8	1633	Manjil, İran,	1990	Abbar	7.3	0.052	0.54	12.55	723
20	6915	Darfield, New Zealand	2010	Heathcote Valley Primary School	7.0	0.238	0.90	24.36	422
22	6971	Darfield, New Zealand	2010	SPFS	7.0	0.189	1.38	29.86	389
23	8597	El Mayor-Cucapah, Mexico	2010	Sam W. Stewart	7.2	0.174	3.26	31.79	503



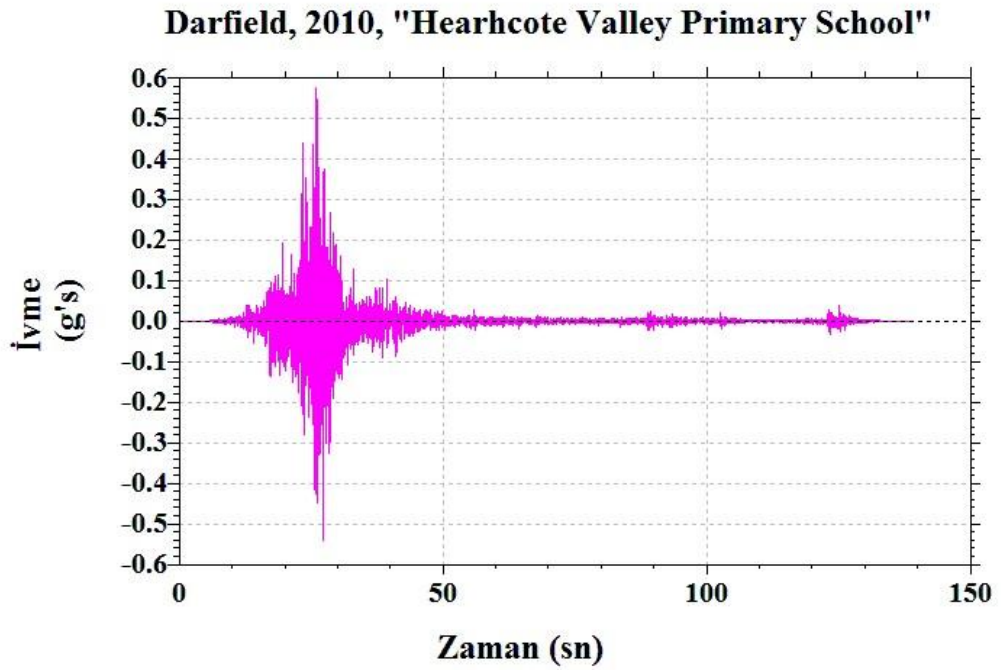
Şekil 5. 13. 1999 Düzce depremi Lamont 1061 kaydı



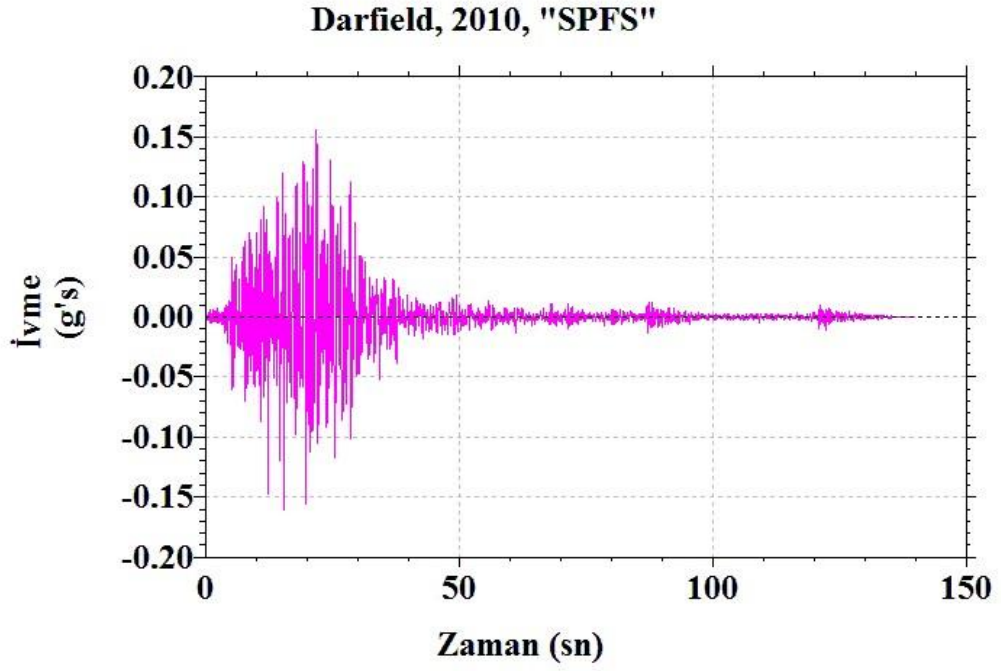
Şekil 5. 14. 1999 Düzce depremi Mudurnu kaydı



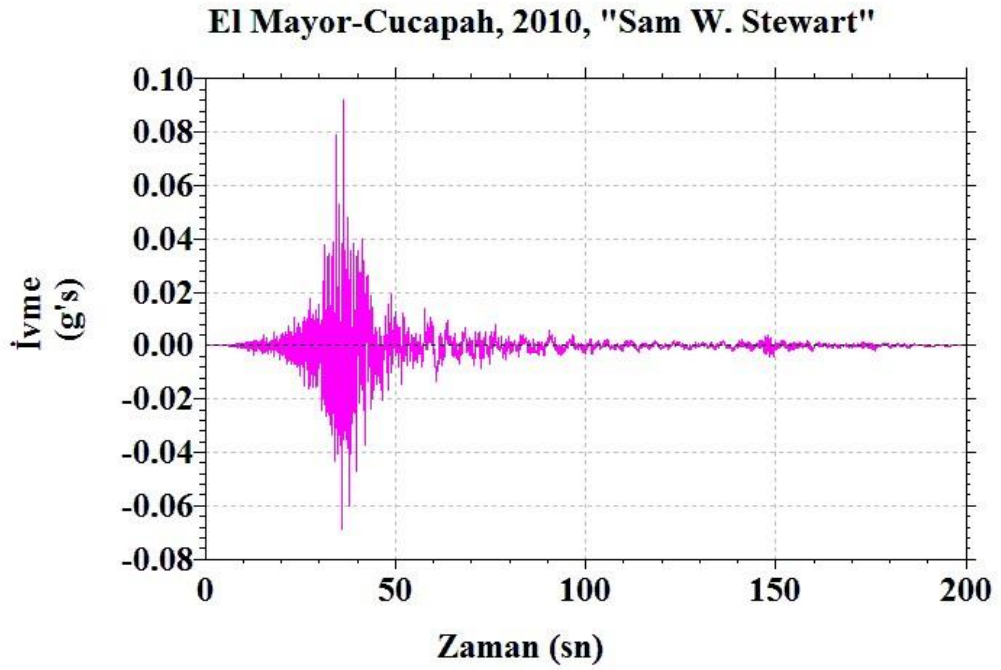
Şekil 5. 15. 1990 Manjil depremi Abbar kaydı



Şekil 5. 16. 2010 Darfield depremi Hearhcote Valley Primary School



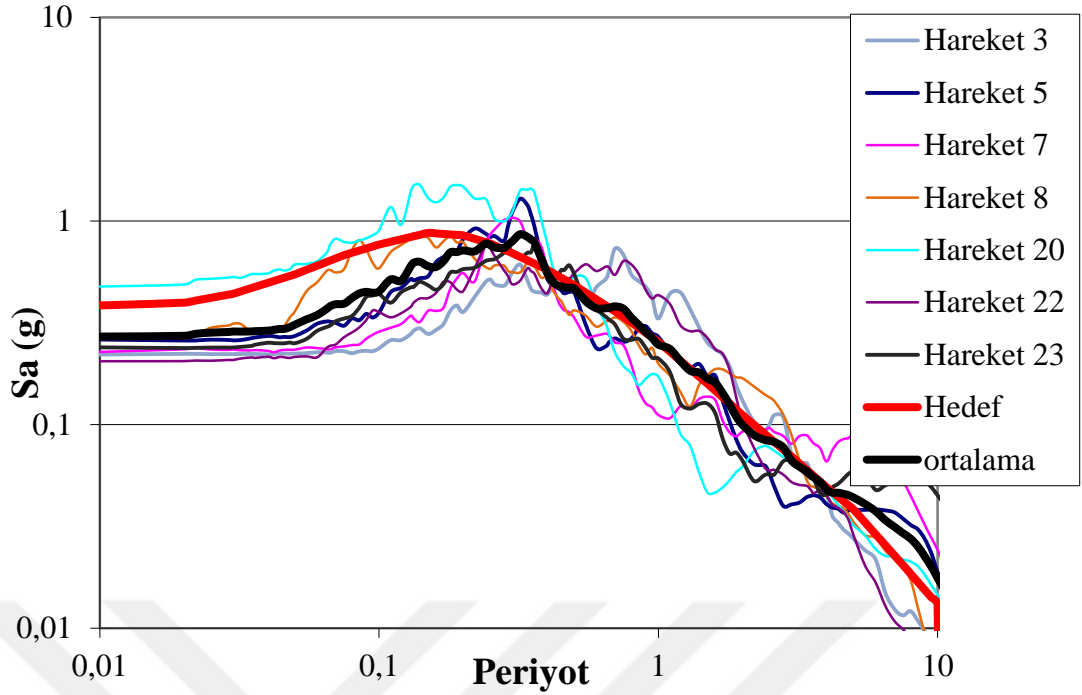
Şekil 5. 17. 2010 Darfield depremi SPFS kaydı



Şekil 5. 18. 2010 El Mayor-Cucapah depremi Sam W. Stewart kaydı

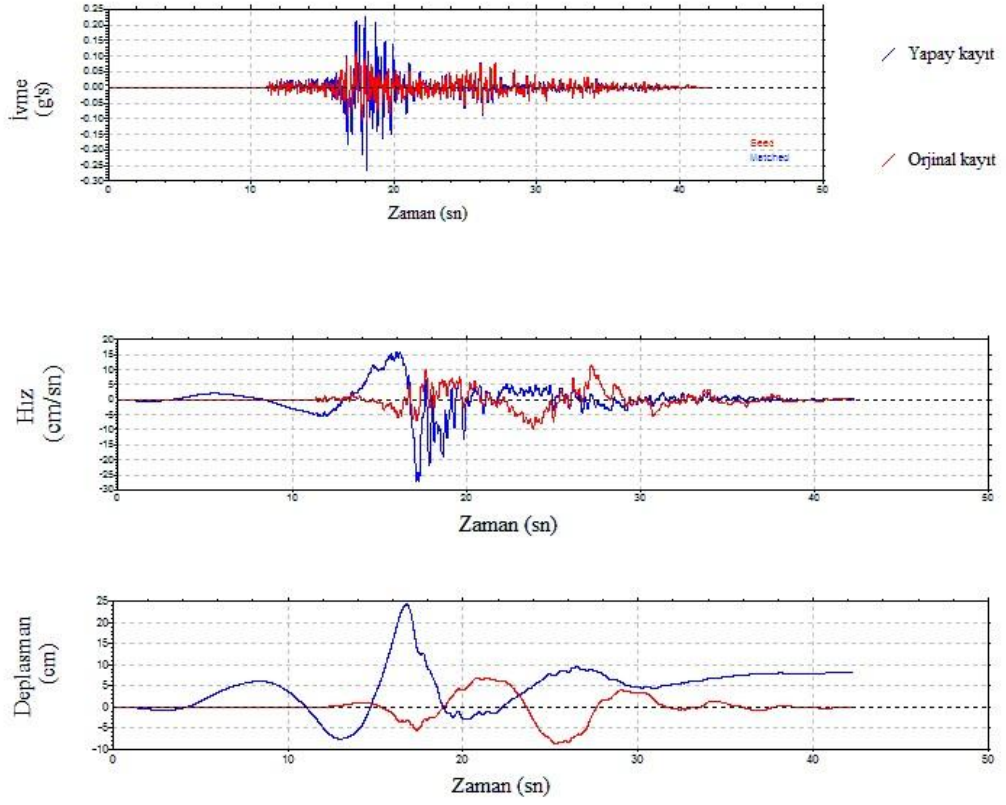
Belirlenen bu deprem kayıtlarının her birinin frekans içeriği birbirinden farklı ve kendine özgüdür. Bir depremin frekans içeriği, depremin kaynak özelliklerine ve deprem dalgalarının aldığı yol boyunca zemin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple meydana gelmesi muhtemel Kırıkkale senaryo depreminin frekans içeriğinin de belirlenen bu kayıtlardan farklı olması beklenmektedir. Bu nedenle daha sonraki bölümde anlatılacak olan zemin davranış analizlerinde, tek bir deprem kaydı kullanmak yerine, anakaya seviyesi için hedef spektrumla ölçeklenerek belirlenen 7 adet depremin ortalama spektrumuna, zaman tanım alanında spektral ölçekleme yöntemi kullanılarak ölçeklenmiş, yapay deprem kaydı kullanılmıştır. Bu yöntem, belirlenen bir başlangıç kaydının belli süre ve periyot aralıklarında sonlu süreli dalgacık (wavelet) eklenmesi veya çıkarılması ile seçilen hedef spektruma orijinal kaydın spektrumunun zaman tanım alanında ayarlanması işlemidir. Bu işlem sonucunda elde edilen kayıt, belli toleranslar içerisinde hedef spektrumla uyumlu bir spektruma sahip olmaktadır. Bu amaca yönelik olarak ilk defa Abrahamson [148] tarafından geliştirilen RSPMATCH programı sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada yer hareketlerinin zaman tanım alanındaki spektrum-uyumlu simülasyonları için yapılan analizlerde RSPMATCH programı tercih edilmiştir. Bu yaklaşımla elde edilen kayıtların hedef spektruma oldukça yakın ve uyumlu olduğu görülmektedir. Dalgacıkların oluşturulması için RSPMATCH yazılımında iki model kullanılmaktadır. Bu temsili iki dalgacık modellerinin birincisi “zamanda tersinirilmiş tek dereceli sistem darbe davranış ivmesi” ikincisi ise “filtrelenmiş kosinüs dalgası” yöntemidir. Uygulanan her iki dalgacık modeli sonucunda istenilen frekans içeriğinde en büyük ivme değerlerine göre faz içeriğinde önemli bir değişiklik olmadan yer hareketleri elde edilebilmektedir [149].

RSPMATCH programında yapay kayıt elde etmek için Şekil 5.19.’da görüldüğü gibi anakaya seviyesinde hedef spektruma ölçeklenerek elde edilmiş 7 kaydın ortalama spektrumu hedef spektrum olarak alınmıştır.

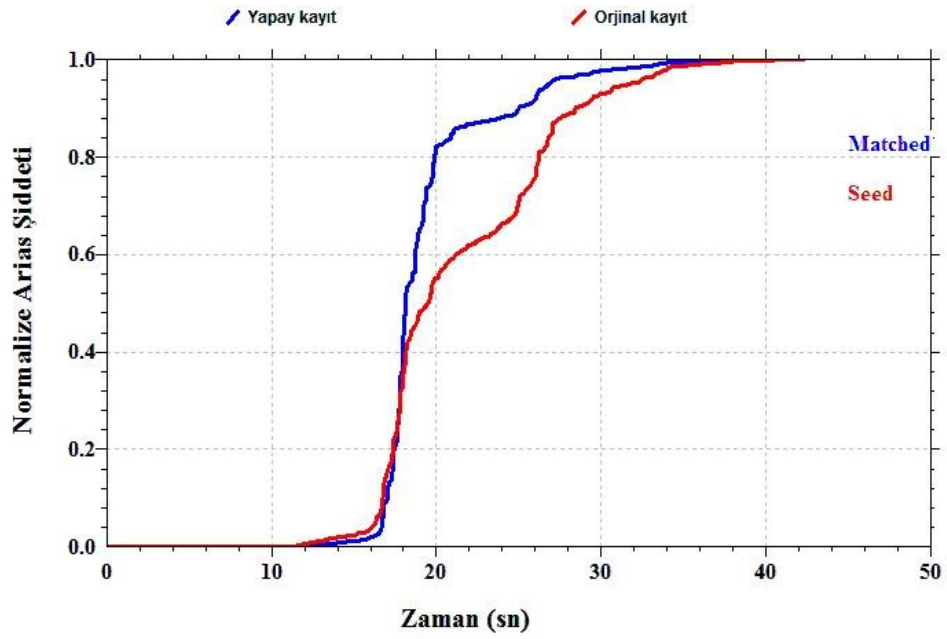


Şekil 5. 19. Seçilen kayıtların ortalama ivme spektrumu

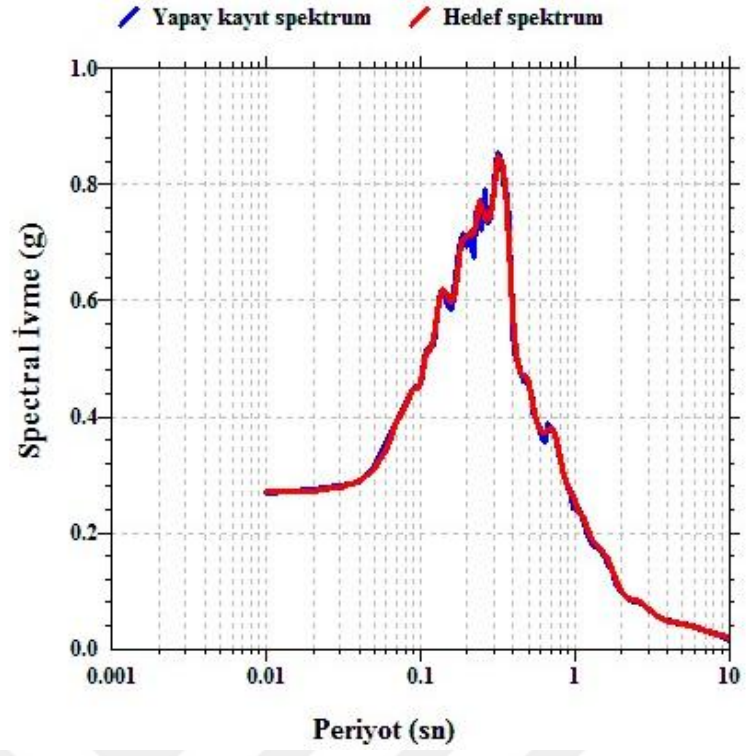
RSPMATCH programına başlangıç (orijinal) kaydı olarak hedef spektrumla daha uyumlu olan (MSE=0,105) Düzce depreminin “Lamont 1061” kaydı girilmiştir. Elde edilen yapay kaydın ve başlangıç kaydının ivme, hız ve deplasman grafikleri şekil 5.20’de verilmiştir. Şekil 5.21’de deprem esnasında açığa çıkan enerjinin bir göstergesi olan “Arias şiddeti” değişim grafiği, Şekil 5.22’de ise hedef spektrum ile üretilen kaydın ivme spektrumu grafiği görülmektedir. RSPMATCH programından zemin davranış analizlerinde kullanılmak üzere üretilen kaydın ivme spektrumu, Şekil 5.23’de görüldüğü gibi bazı periyotlarda kabul edilebilir küçük farklılıklar dışında, hedef spektrumla mükemmel yakın bir uyum göstermektedir. Üretilen kaydın kaydın ivme-zaman grafiği Şekil 5.24’de verilmektedir.



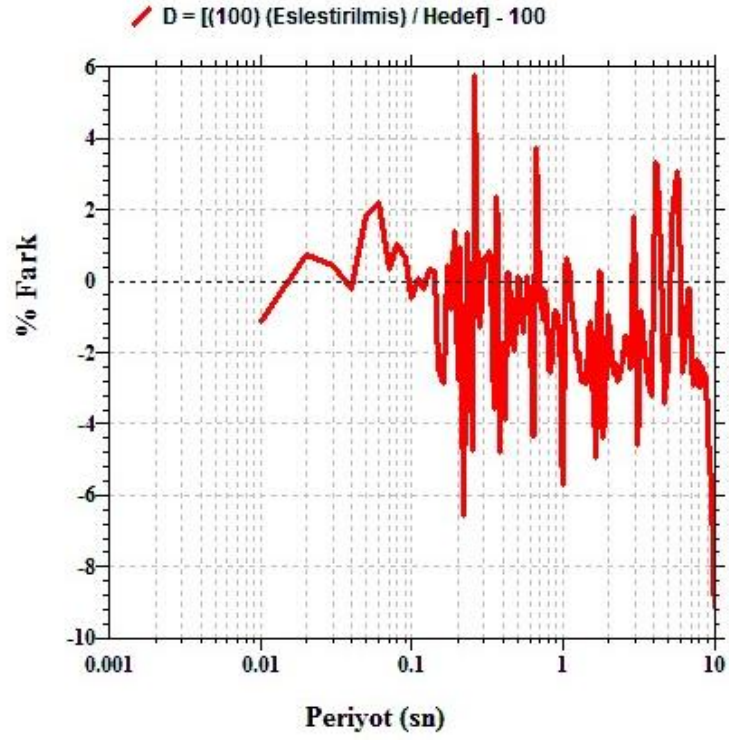
Şekil 5. 20. Orjinal kaydın ve üretilen yapay kaydın ivme, hız ve deplasman kayıtları



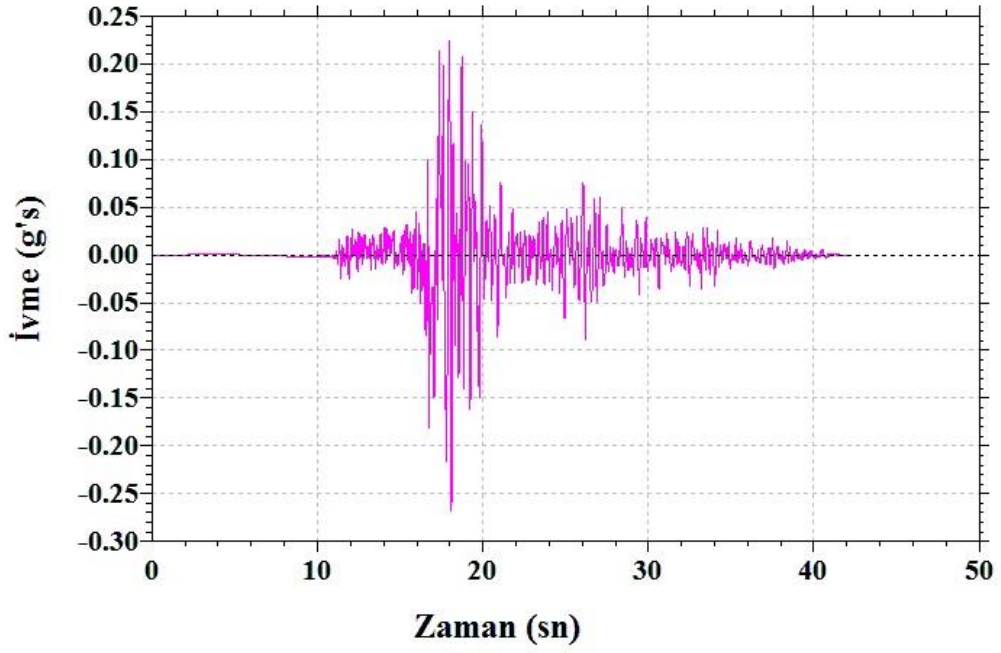
Şekil 5. 21. Üretilen kaydın Arias şiddeti değişim grafiği



Şekil 5. 22. Hedef spektrum ve üretilen kaydın spektrumu



Şekil 5. 23. Hedef spektrum ve üretilen kaydın spektrumları arasındaki fark



Şekil 5. 24. Üretilen kaydın ivme-zaman grafiği

Bu bölümde, Kırıkkale çevresinde 100 km yarıçaplı dairesel alan içerisinde meydana gelen depremler dikkate alınarak sismik tehlike analizi gerçekleştirilmiş ve yeni nesil azalım ilişkileri kullanılarak çalışma alanı için hedef spektrum belirlenmiştir. Belirlenen hedef spektrumla anakaya seviyesi için ölçeklenmiş gerçek kayıtlar elde edilmiştir. Zemin davranış analizlerinde kullanılmak üzere hedef spektrumla ölçeklenmiş gerçek kayıtların ortalama spektrumu dikkate alınarak zaman tanım alanında ölçeklenmiş yapay kayıt elde edilmiştir.

6. DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİ, DAVRANIŞ ANALİZİ VE BÜYÜTME

Dinamik zemin özellikleri, zemin davranış analizlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Zemin materyalleri, zemin davranış modellerinde çoğunlukla farklı özellikler ile temsil edilmektedir. Tekrarlı yüklemeler altında zeminlerin davranışı, dinamik zemin özellikleri ile açıklanmaktadır. Saha davranışı ve yenilmesi, çoğunlukla tekrarlı yükleme koşulları altında, zeminlerin davranışından etkilenmektedir. Dalga yayılımı tarafından kontrol edilen zemin davranışı, zeminlerin sönümlenme özellikleri ve rijitliğine bağlıdır. Ayrıca, zeminin kayma mukavemeti de zemin yenilmesini kontrol eden önemli bir parametredir [90]. Kayma dalgası hızı (V_s), dinamik kayma modülü (G), sönüm oranı ve bunların kayma birim deformasyonu ile değişimi, zeminlerin dinamik kayma deformasyon özellikleri olarak dikkate alınmaktadır. Deformasyonla rijitliğin değişimi, sönüm oranı (D) ve modül azalımı (G/G_{max}) eğrileri ile belirlenmektedir. Zeminlerin sönüm ve rijitlik özellikleri, depremle ilgili problemlerin değerlendirilmesi aşamasında kullanılabilir [90].

Zemin davranış analizleri, tasarım amaçlı zemin davranış spektrumunu ve depremler sırasında zemin koşullarının etkisini değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır. Zemin tabakalarının davranışı, anakaya üzerindeki materyal özelliklerine, yer hareket karakteristiklerine ve geometrisine bağlıdır [104].

Zemin büyümesi, sismik enerji ve zemin koşulları nedeniyle meydana gelen zemin davranışının bir sonucudur ve sismik dalgaların ana kayadan yüze seyahati sırasında oluşmaktadır [150].

Çalışma alanının, dinamik zemin özelliklerinden maksimum kayma modülü, sönüm oranı ve kayma dalgası hızı bu bölümde özetlenmiştir. Öncelikle zemin davranış analizlerinde kullanılacak temel parametreler belirlenmiş, sonra bir boyutlu eşdeğer zemin davranış modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerden belirlenen sonuçlar da bu bölümde sunulmuştur.

6.1. Dinamik Zemin Özellikleri

Kayma dalgası hızı (V_s), geoteknik çalışmalarda zeminlerin önemli dinamik özelliklerindedir. V_s değeri genellikle zemin tabakalarının yoğunluğu ve rijitliğine bağlı olarak jeolojik ortamı ve mühendislik özelliklerini yansıtmaktadır. Ayrıca tasarım ve zemin davranışını belirlemek amaçlı da önemli bir parametredir. V_s , genellikle zemin rijitliği, sismik zemin davranışı, sıvılaşma potansiyeli, zemin yoğunluğu, zemin stratigrafisi ve temel oturmalarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır [151, 152, 153, 154].

Kayma modülü (G), sönüm oranı (D) ve kayma dalgası hızı (V_s) zemin davranış analizlerinde yaygın olarak kullanılan önemli dinamik zemin parametreleridir. Yüksek deformasyon seviyelerinin özellikleri, artan sönümlenme ve azalan rijitlik şeklinde doğrusal olmayan inelastik davranışla temsil edilmektedir. Düşük deformasyon seviyelerinin özellikleri ise Poisson oranı, yoğunluk, sönümlenme ve rijitliktir [90]. Zeminlerin kayma modülü ve sönüm oranı yaygın şekilde, tekrarlı yüklemeler altında kayma birim deformasyonunun genliğinin fonksiyonu olarak kabul edilmektedir. Zeminlerin modül azalım ve sönüm oranı eğrileri, eşdeğer lineer teknik kullanılarak gerçekleştirilen zemin davranış analizlerinin de temel parametreleridir [155].

Maksimum kayma modülü (G_{max}) kayma dalgası hızı kullanılarak Eşitlik 6.1'den hesaplanabilmektedir.

$$G_{max} = \rho \times V_s^2 \quad (6.1)$$

Burada;

ρ : Yoğunluk

V_s : Kayma dalgası hızı

Ölçülen kayma dalgası hızı genellikle zeminler için G_{max} 'nü belirlemek için kullanılan çok güvenilir bir parametre olarak düşünülmektedir. V_s ölçümlerine ulaşılamadığında, dinamik kayma modülü standart penetrasyon testi (SPT), plastisite

indisi ve tane boyutu dağılımlarına bağlı korelasyonlardan da tahmin edilebilmektedir [90, 156].

G_{max} , yaygın bir şekilde zemin yapı etkileşimlerinin dinamik davranışlarında ve gelişmiş zemin modellerinde kullanılmaktadır. Maksimum kayma modülü (G_{max}) sahada yerinde yapılan testlerle de belirlenebilmektedir. Standart penetrasyon testi (SPT), koni penetrasyon testi (CPT), presiyometre testi (PMT) ve dilatometre testi (DMT) sonuçları, kayma dalgası hızı ve kayma modülü değerlerini elde etmek için kullanılabilir. Örneğin $(N_1)_{60}$ darbe sayısından G_{max} 'nü tahmin etmek için Eşitlik 6.2'de verilen ampirik formül yaygın olarak kullanılmaktadır [157, 158].

$$G_{max} = 20000 (N_1)_{60}^{0,333} (\sigma'_m)^{0,5} \quad (6.2)$$

Burada;

G_{max} : Maksimum kayma modülü

$(N_1)_{60}$: 1 atm basınç ve % 60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT-N darbe sayısı

σ'_m : ortalama efektif gerilme

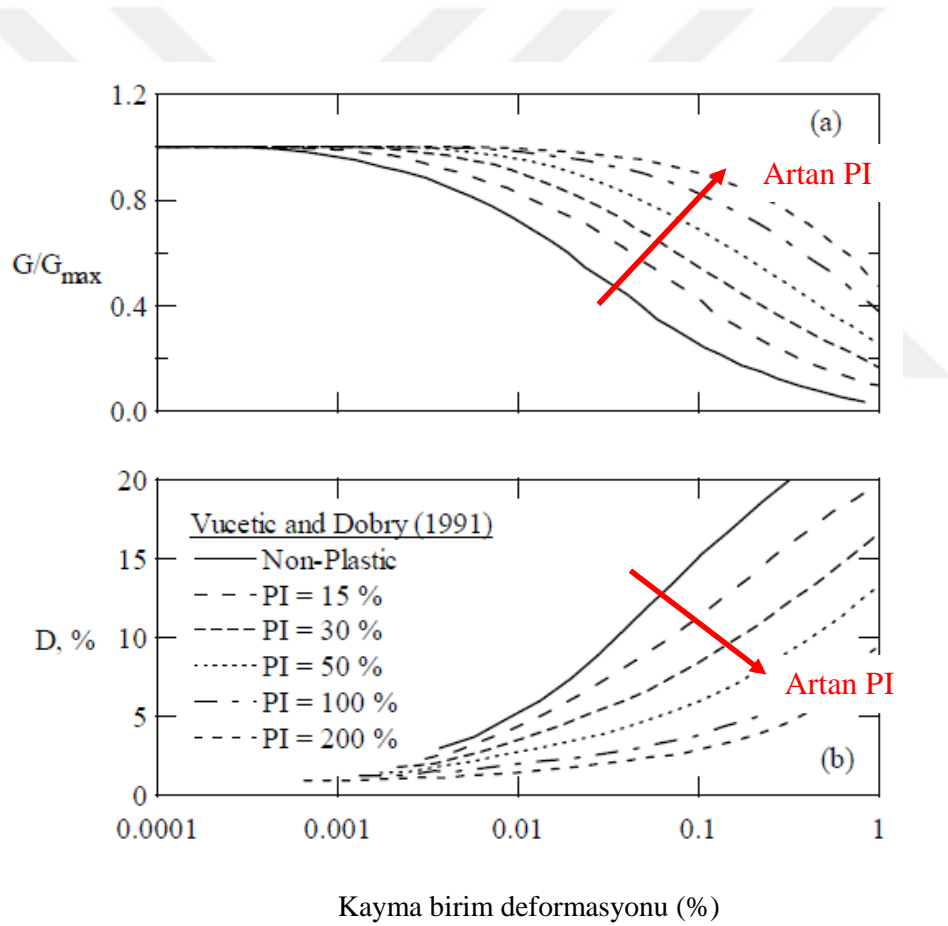
G_{max} ve σ'_m lb/ft² cinsinden

Zeminler tekrarlı yükleme koşulları altında doğrusal olmayan gerilme deformasyon davranışı gösterirler. Rijitlik ve sönümleme oranlarına bağlı olarak yüksek ve düşük deformasyon seviyelerinde davranışları farklılık göstermektedir. Buna nedenle, gerilme deformasyon modelleri, geoteknik deprem mühendisliği analizleri için; eşdeğer doğrusal modeller, tekrarlı doğrusal olmayan modeller ve gelişmiş yapıcı modeller olarak üç ana başlıkta sınıflandırılmıştır [90].

Maksimum kayma modülü ve kayma modülü, efektif çevre basıncı ve zemin plastikliğinden etkilenebilen modül azalım (G_{max}/G) eğrisi ile değerlendirilmektedir. Modül azalım eğrileri literatürde bir kaç araştırmacı tarafından incelenmiştir [159, 160]. Sönüm oranı (D) zemin davranış analizlerinde önemli bir parametredir. Literatürde farklı tip zeminler için tanımlanmış sönüm oranı kayma birim deformasyon ilişkileri mevcuttur [161, 162, 163]. Plastisite indisinin, sönüm oranına önemli bir etkisi vardır. Yüksek plastisiteli zeminler, aynı tekrarlı deformasyon

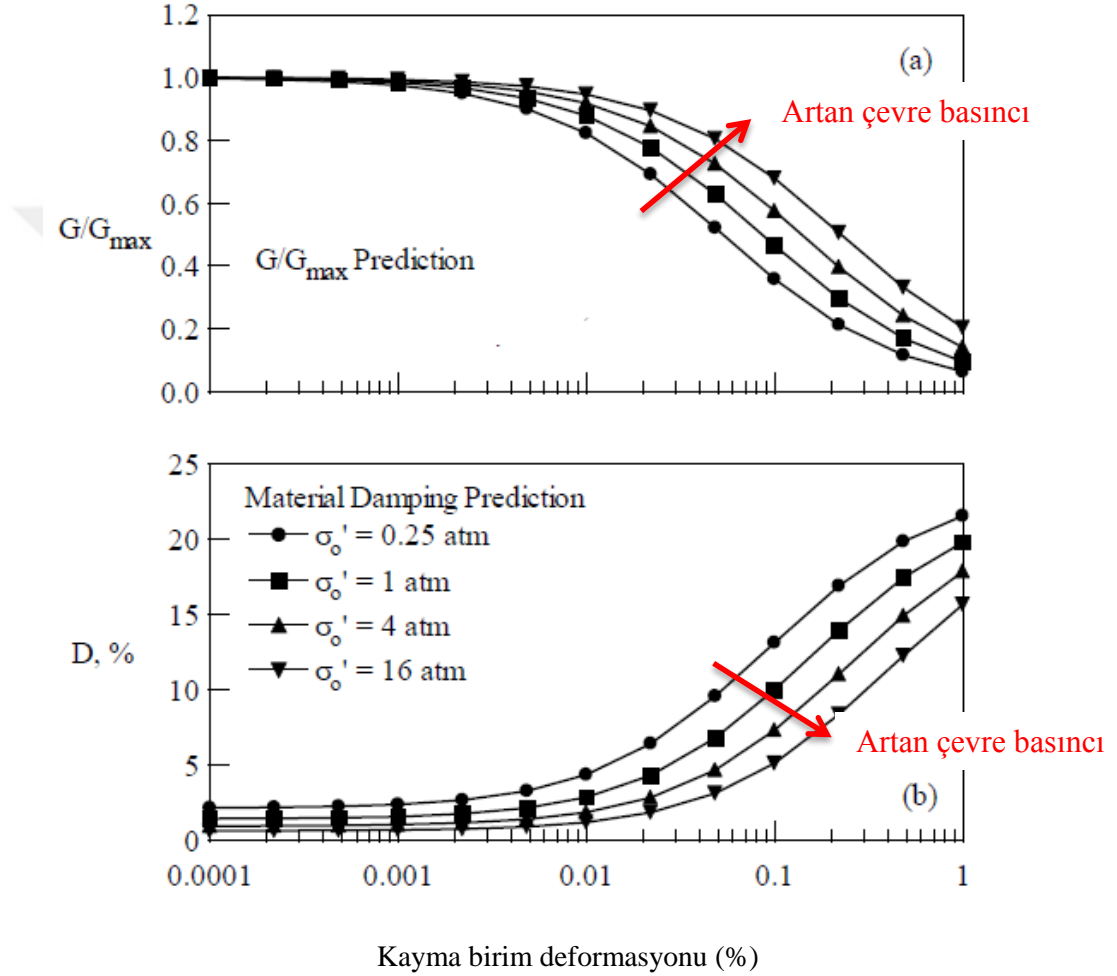
genliklerinde düşük sönüm oranına sahiptirler [156]. Sönüm oranı efektif çevre basıncı, boşluk oranı, jeolojik yaş ve boşluk oranından etkilenebilmektedir [164, 90, 160].

Şekil 6.1.'de Vucetic ve Dobry [156] tarafından yapılan çalışmada tekrarlı kayma birim deformasyonuna karşı, modül azalımı (G_{max}/G) ve sönüm oranı (D) eğrilerinde plastisite indisinin (PI) etkisi açıkça görülmektedir. Çalışmada farklı zemin türleri için sönüm oranı ve modül azalımını kontrol eden ana faktörün PI olduğu sonucuna varılmıştır.



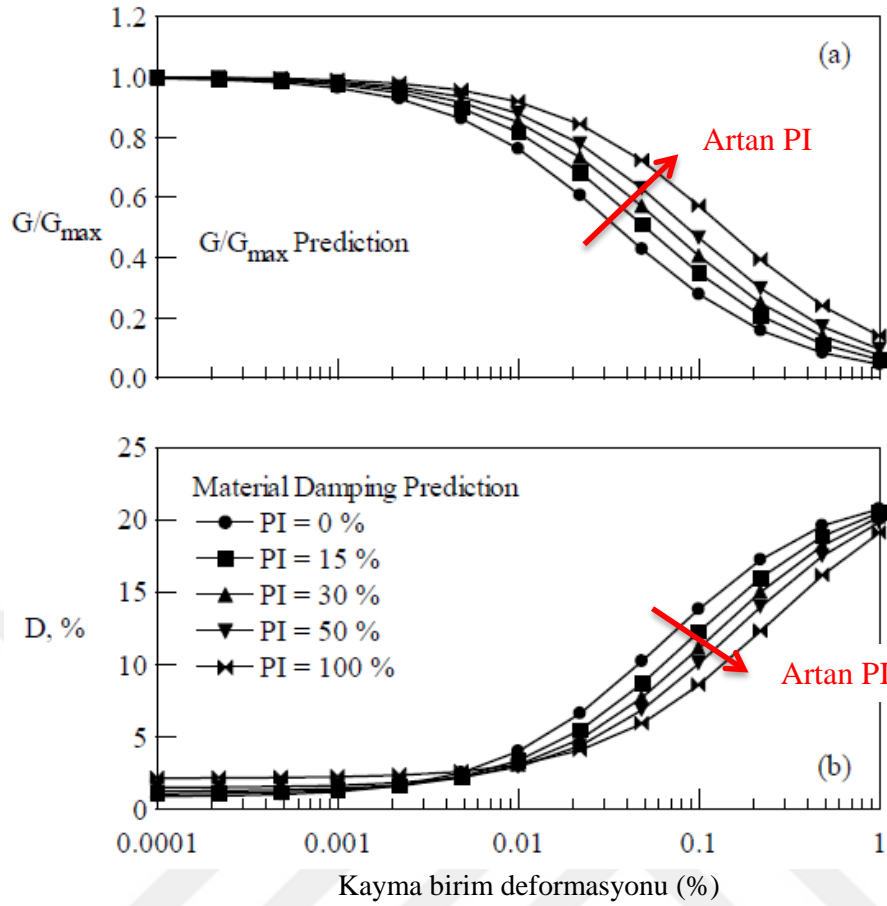
Şekil 6. 1. Plastisite indisinin etkisi a) kayma modülü oranı (G/G_{max}) b) sönüm oranı (D) [156]

Darendeli (2001) [160] yaptığı çalışmasında omurga eğrinin değiştirilmiş hiperbolik şekline dayalı yeni bir model önermiştir. Önerilen modelde zeminlerin tekrarlı yükleme koşulları altında, sönüm oranı ve modül azalım eğrilerinin, zeminin çevre basıncı ve plastisite indisine bağlı olarak değiştiği Şekil 6.2 ve 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6. 2. Ortalama çevre basıncının etkisi a) kayma modülü oranı (G/G_{max})

b) sönüm oranı (D) [160]



Şekil 6. 3. Plastisite indisinin etkisi a) Kayma modülü oranı(G/G_{max}) ve b) sönüm oranı (D)[160]

6.2. Kırıkkale için Kayma Dalgası Hızının Belirlenmesi ve Zemin Sınıflandırması

Kayma dalgası hızının belirlenmesine yönelik olarak çalışma alanında 6 MASW, 6 ReMi, 15 sismik kırılma ve 108 sondaj noktasında SPT testleri yapılmıştır. Kayma dalgası hızı ölçüldüğünde G_{max} 'nin hesaplanmasında Eşitlik 6.1 kullanılabilir. Ancak kayma dalgası hızına ulaşamadığı durumlarda, G_{max} ve/veya V_s ampirik bağıntılar kullanılarak tahmin edilmektedir. SPT darbe sayısı ve V_s arasındaki ilişkiler literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli zemin türleri için SPT-N ve V_s arasındaki ilişki, farklı araştırmacılar tarafından sunulmuştur. Literatürde SPT-N ve

V_s arasındaki ampirik ilişkilerin özeti çeşitli zemin türleri için Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6. 1. V_s ve SPT-N arasında literatürde yer alan bağıntılar

Araştırmacılar	V_s (m/sn)		
	Tüm Zeminler	Kum	Killer
Imai ve Yoshimura (1970)	$V_s=76N^{0,33}$	--	--
Ohma ve Toruimu (1970)	$V_s=84N^{0,31}$	--	--
Ohta ve Goto (1978)	$V_s=85,35N^{0,348}$	--	--
Seed ve Idriss (1981)	$V_s=61,4N^{0,5}$	--	--
Tonouchi vd. (1983)	$V_s=97N^{0,314}$	--	--
Jinan (1987)	$V_s=116,1(N+31,85)^{0,202}$	--	--
Okomoto vd. (1989)	--	$V_s=125N^{0,3}$	--
Lee (1990)	--	$V_s=114N^{0,31}$	$V_s=57N^{0,50}$
Athanasopoulos (1995)	$V_s=107,6N^{0,36}$	--	--
İyisan (1996)	$V_s=51,5N^{0,516}$	--	--
Kayabalı (1996)	--	$V_s=175+(3,75N_{60})$	--
Jafari vd. (1997)	$V_s=22N^{0,85}$	--	--
Kiku vd. (2001)	$V_s=68,3N^{0,292}$	--	--
Hasançebi and Ulusay (2007)	$V_s=90N^{0,308}$	$V_s=90,82N^{0,319}$	$V_s=97,89N^{0,269}$
Hanumantharao & Ramana (2008)	$V_s=82,6N^{0,42}$	$V_s=79N^{0,433}$	--
Dikmen (2009)	$V_s=58N^{0,40}$	$V_s=73N^{0,33}$	$V_s=44N^{0,48}$

SPT-N ve V_s ’nın tüm zeminler için değişim grafiği ise Şekil 6.4’de verilmiştir. SK-79 sondaj kuyusundan sağlanan SPT-N değerlerine dayalı kayma dalgası hızının derinlikle değişim grafiği ise farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen bağıntılar kullanılarak Şekil 6.5’de sunulmuştur. Kırıkkale zeminleri için her sondaj noktasında SPT-N değerlerinden kayma dalgası hızını belirlemek amacıyla tüm zemin türleri için geçerli olan, İyisan [165] tarafından geliştirilen ve Eşitlik 6.3’de verilen ampirik bağıntı tercih edilmiştir.

$$V_s = 51,5N^{0,516} \quad (6.3)$$

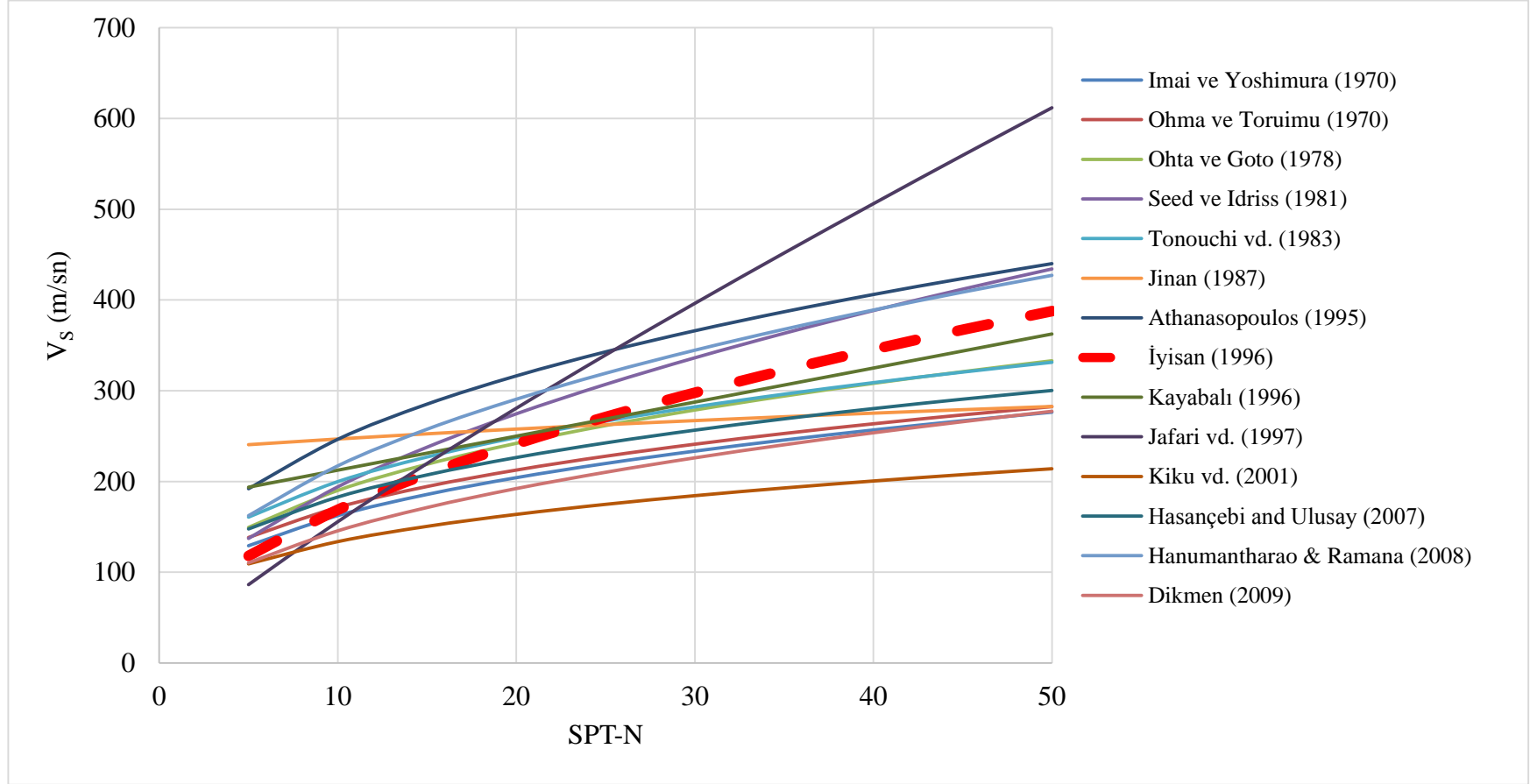
Burada;

V_s : Kayma dalgası hızı (m/s)

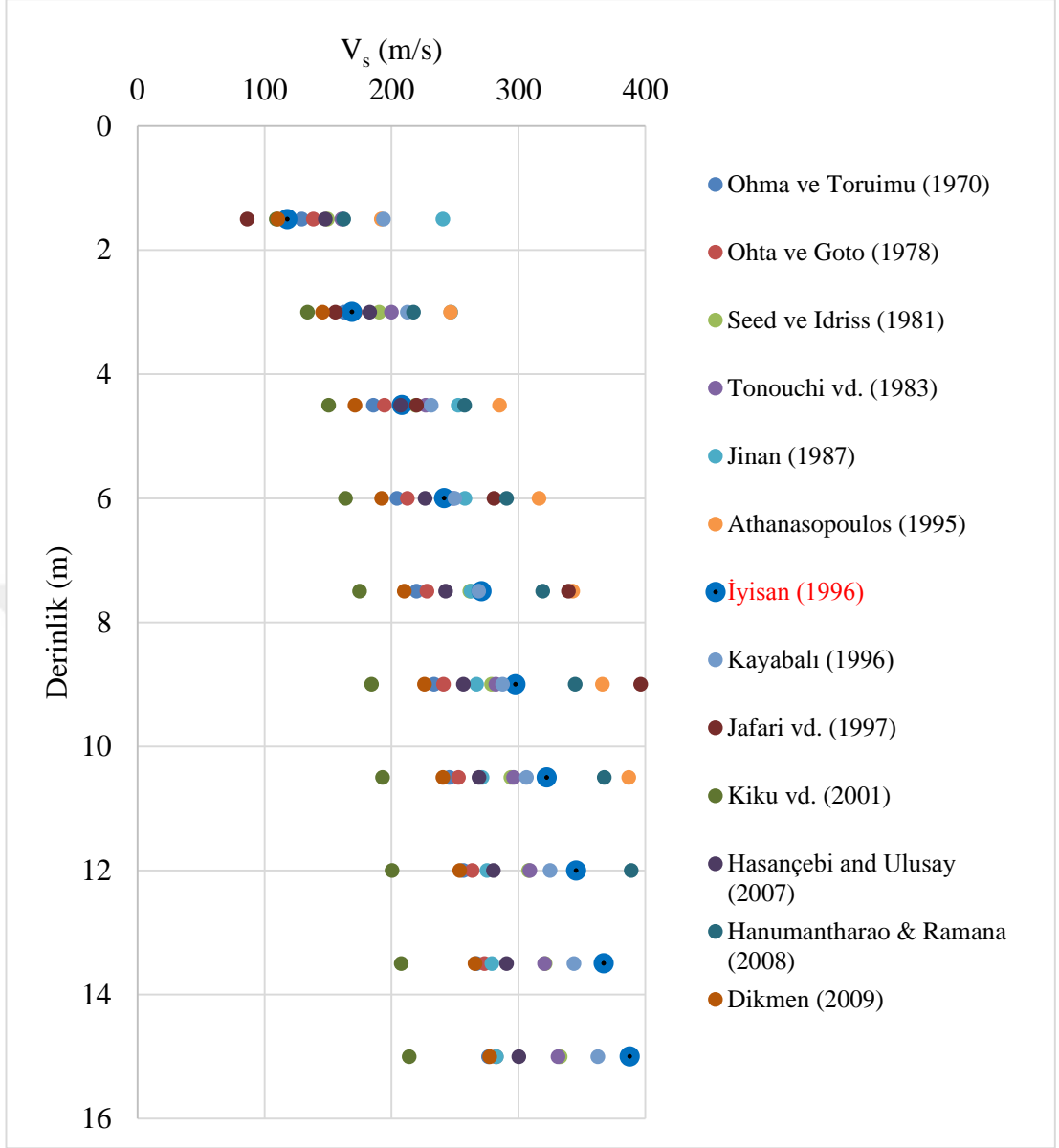
N: SPT darbe sayısı

Zemin davranış analizlerinde V_s değeri, zemin profillerinde 15-20 m derinliklere kadar SPT-N değerlerine dayalı olarak Eşitlik 6.3'de verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Ancak bu derinliklerden sonra anakayaya kadar olan derinlik boyunca kayma dalgası hızı MASW, ReMi ve sismik kırılma test sonuçlarına göre belirlenmiştir.





Şekil 6. 4. Farklı araştırmacılara göre SPT-N - V_s değişim grafiği



Şekil 6. 5. Farklı araştırmacılara göre SK-79 noktasına ait kayma dalgası hızının derinlikle değişimi

Zemin sınıflandırması, geoteknik verilere, yüzey jeolojisine ve üst 30 m’deki ortalama kayma dalgasına bağlı olarak yapılabilir [153]. Büyütme potansiyelini tahmin etmede zemin sınıflandırması için yaygın olarak üst 30 m’deki ortalama kayma dalgası hızı kullanılmaktadır. V_{s30} değeri yüzeyden 30 m derinliğe kadar Eşitlik 6.4’deki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (6.4)$$

Burada; d_i üst 30 m içerisindeki herhangi bir tabaka kalınlığı, V_{si} ise yine üst 30 m içerisindeki herhangi bir tabakanın kayma dalgası hızıdır.

V_{s30} değeri, tasarım spektrumlarının geliştirilmesi ve deprem kayıplarının azaltılması için zemin sınıflandırmasında kullanılan önemli bir parametredir [166]. Bu değer aktif tektonik bölgelerde ve derin havzalarda zemin büyütme tahmin etmek için de kullanılmaktadır. V_{s30} 'na dayalı NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) yönetmeliğine [167] göre zemin sınıflandırması Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6. 2. NEHRP' e göre zemin sınıfları.

NEHRP Yönetmeliği	
Zemin Sınıfı	Zemin Özellikleri
A	Kayma dalgası hızı $V_s > 1500$ m/sn olan sert kayalar
B	Kayma dalgası hızı $760 \text{ m/s} < V_s \leq 1500$ m/sn olan kayalar
C	Kayma dalgası hızı $360 \text{ m/sn} < V_s \leq 760$ çok sert zeminler
D	Kayma dalgası hızı $180 \text{ m/sn} < V_s \leq 360$ m/sn
E	Kayma dalgası hızı $V_s < 180$ m/sn
F	Saha araştırması ve değerlendirilmesi gerektiren zeminler

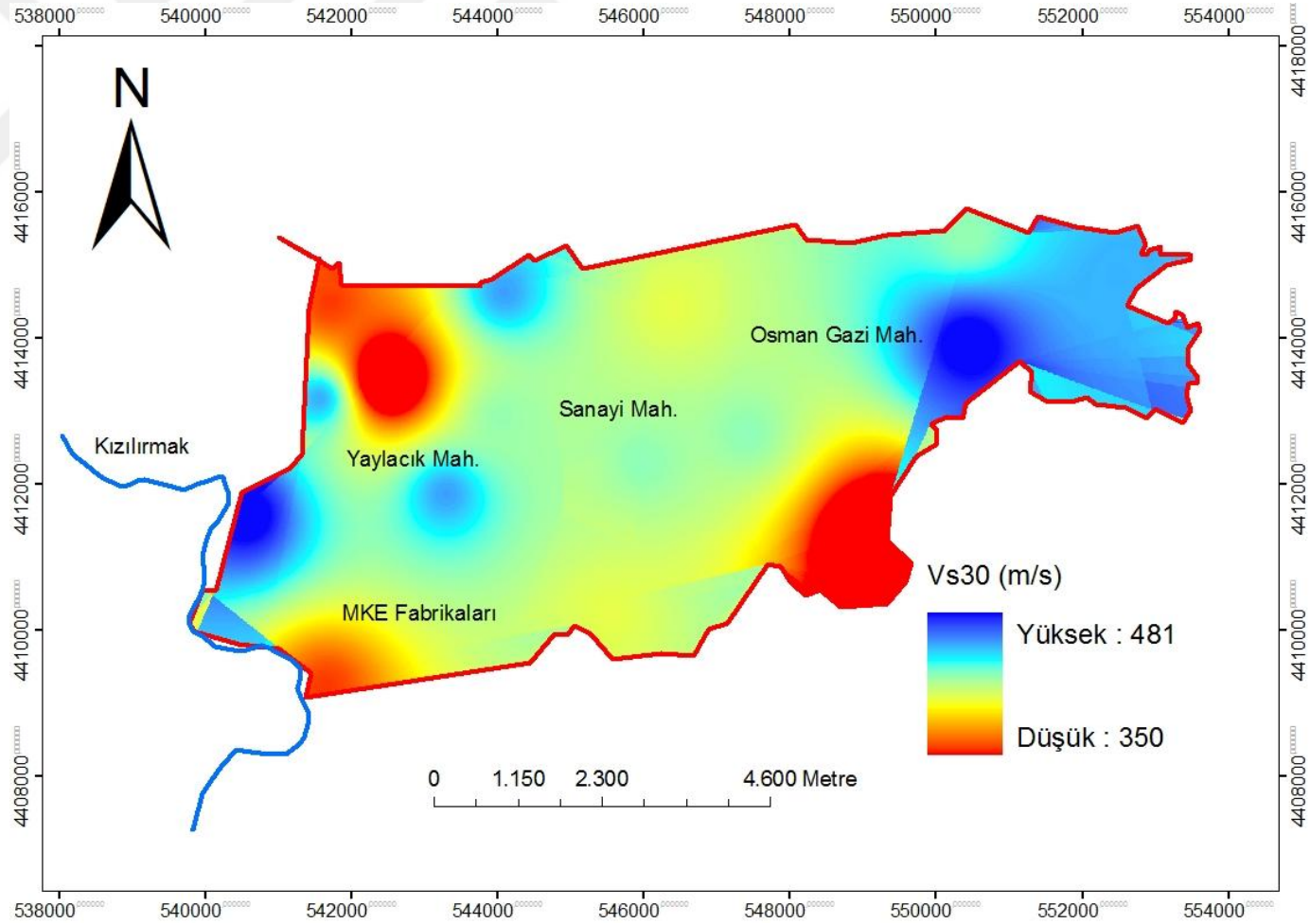
Kırıkkale çalışma alanında yapılan sismik kırılma testi sonuçlarına göre belirlenen V_{s30} değerleri Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6. 3. Kırıkkale için sismik kırılma testi sonuçlarına göre V_{s30} değerleri

Test No	JF1	JF2	JF3	JF4	JF5	JF6	JF7	JF8
V_{s30} (m/s)	393	458	424	438	437	350	456	481

Test No	JF9	JF10	JF11	JF12	JF13	JF14	JF15	JF16
V_{s30} (m/s)	393	458	424	438	437	350	456	481

Çalışma alanında V_{s30} değerleri 350 ile 481 m/s arasında değişmektedir. NEHRP yönetmeliğine göre C sınıfı zeminler 360-760 m/s arasında V_{s30} değerlerine sahiptir. Buna göre, çalışma alanı çok sert zeminler, “C” zemin sınıfı olarak sınıflandırılmış, Ayrıca Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe (DBYBHY 2007) [168] göre de Z2 ve yer yer bazı lokasyonlarda Z3 zemin sınıfı olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma alanında V_{s30} değerlerinin dağılımı ise Şekil 6.6’da sunulmuştur.

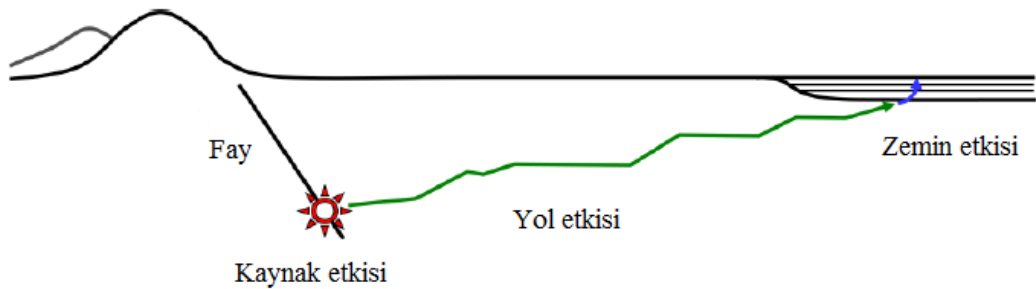


Şekil 6. 6. Kırıkkale için sismik kırılma testi sonuçlarına göre V_{s30} değerlerinin dağılımı

6.3. Zemin Davranış Analizi

Yerel zemin etkisi, 1985 Michoacan-Mexico, 1995 Kobe ve 1999 Kocaeli gibi sismolojik olarak aktif alanlardaki birçok yıkıcı depremde gözlenmiştir. Önceki yıkıcı depremler, sismik zemin davranışında jeolojik ve jeomorfolojik şartların önemini birçok kez ispatlamıştır. 1985 Michoacan depremi ($M_S=8,1$) özellikle pasifik okyanusundaki üst merkezinden yaklaşık 350 km uzaklıkta Mexico vadisindeki Mexico şehrinde çok ciddi hasarların oluşmasına sebebiyet vermiştir. Bu depremde vadi tabanında sismik tabakalarda görülen aşırı büyütme, zemin etkisinin önemini ve büyütme olayının etkisinin anlaşılmasına iyi bir örnektir [156]. Zemin tabakalarında sismik dalgaların yayılmasına ve yapıların davranışı üzerinde direkt etkisi olan topoğrafik özelliklerin varlığına bağlı olarak yer hareketlerindeki değişkenlikler zemin etkisi olarak tanımlanabilir [169]. Bu süreç zeminde karmaşık olarak meydana gelmesine rağmen üç bölümde sınıflandırılabilir (Şekil 6.7).

- Kaynak etkisi
- Yol etkisi
- Yerel zemin etkisi



Şekil 6. 7. Zemin tabakalarında yer hareketlerinin etkisi [118]

Kaynak etkileri, farklı fay mekanizmaları için kırık şekline, kırık başlangıcının yerine ve faylanma oranına göre değişebilir ve çoğu durumda rastgeledir. Saha ve kaynak arasında sismik dalgaların yer kabuğu içerisinde yayılması yol etkilerini belirleyebilir. Son olarak ise topoğrafik etkiler tarafından etkilenen ve sismik dalgaların büyütülmesi ve sönümlenmesi ile sonuçlanan yerel zemin etkileri, sismik dalgaların anakayadan yüzeye değişmesine neden olabilir. Zemin davranış analizleri yer hareketleri üzerinde zemin tabakalarının etkisini ölçmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu metotlar iki ana sınıfı ayrılabilir;

- a) Frekans tanım alanında analizler
- b) Zaman tanım alanında analizler

Frekans tanım alanındaki metotlar, basitlikleri, esneklikleri ve daha az hesaplama gerektirmeleri nedeniyle zemin etkisini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [170, 169].

Zemin davranış analizlerinin çözümünde, rijit yarı sonsuz ortamı kapsayan, sonsuz uzunlukta ve tek düze özelliklere sahip yatay tabakalar dikkate alınmaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan zemin özelliklerinin sayısal modellemesi 1-D (bir boyutlu), 2-D veya 3-D boyutlu oldukça ileri metotlar gerektirmektedir [171]. Çoğu zemin davranış analizinde, 1-D dalga yayılımının dalga denklemi ile çözümü, eşdeğer lineer metot kullanılarak yapılmaktadır. Bu çalışmada 1-D eşdeğer lineer zemin davranış analizleri SHAKE2000 [172] programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.4. Zemin Davranış Analizlerinde Kullanılan Zemin Parametreleri

Zemin davranış analizleri, daha önce sözü edilen 108 sondaj noktasındaki SPT, 16 sismik kırılma ve 6 MASW testi sonuçlarından sağlanan laboratuvar ve saha sonuçları dikkate alınarak 108 noktada yapılmıştır. Çalışma alanını oluşturan ana zemin grupları Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi CH, CL ve SC olarak belirlenmiştir. 1-D eşdeğer lineer zemin davranış analizlerinde modül azalımı ve sönümlenme oranı eğrilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada hem plastisite indisi hem de çevre basıncını

dikkate alan Darendeli [160] modeli kullanılarak modül azalım ve sönüm eğrileri belirlenmiştir. Çalışma alanına özel modül azalım ve sönüm eğrileri, Çizelge 6.4'de verilen, temsil eden derinlikler dikkate alınarak, farklı çevre basıncı ve farklı zemin grupları için yeniden oluşturulmuştur. Eğriler oluşturulurken her derinlik aralığı için temsil eden derinlik ve zeminin birim ağırlığı (Çalışma alanında örselenmemiş numunelerden belirlenen) kullanılarak efektif gerilme değeri belirlenmiştir. Belirlenen efektif gerilme ve sükunetteki yanal zemin basınç katsayısı (K_0) Eşitlik 6.5 [173] kullanılarak, her derinlik aralığı için ortalama efektif çevre basıncı belirlenmiştir.

$$\sigma'_m = \sigma'_v \left(\frac{1+2K_0}{3} \right) \quad (6.5)$$

Burada;

σ'_m = Ortalama efektif çevre basıncı

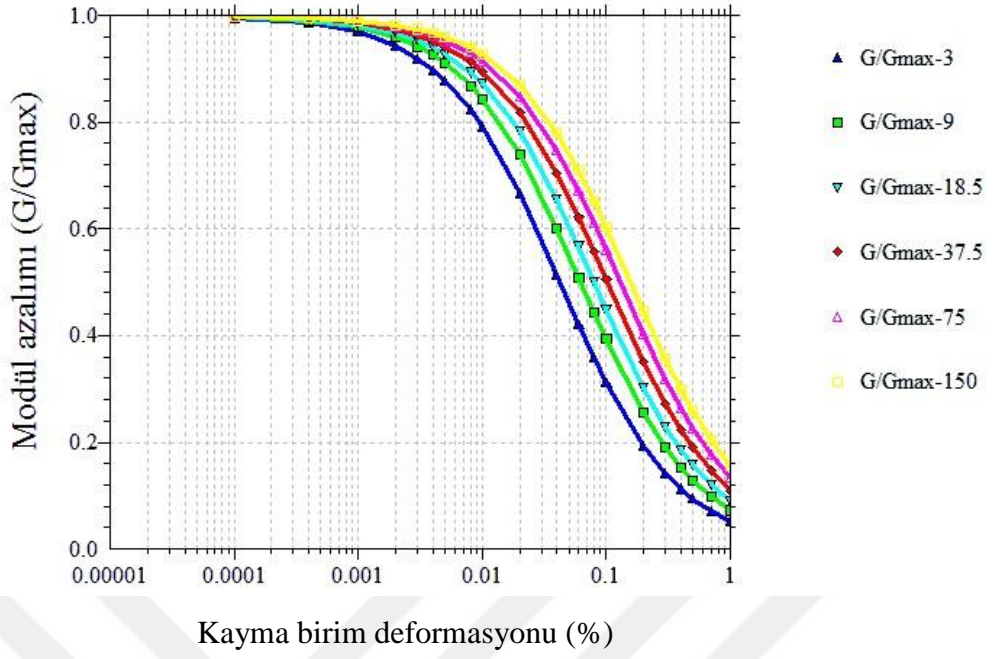
σ'_v = Düşey efektif gerilme

K_0 = Sükunetteki yanal zemin basınç katsayısı

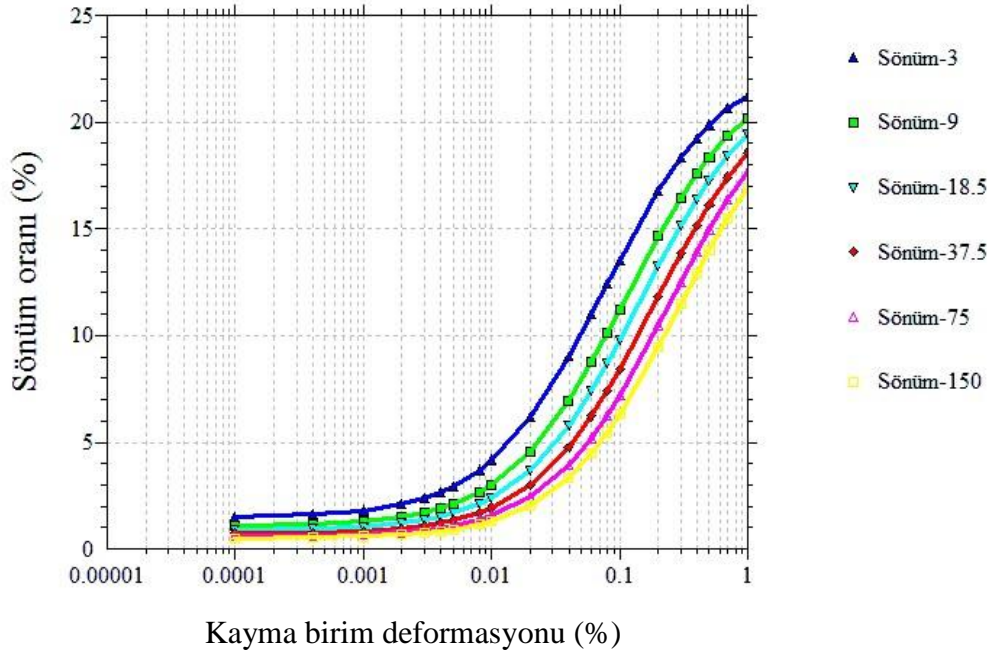
Her derinlik aralığı için belirlenen ortalama efektif çevre basıncı ve plastisite indisi (Çalışma alanında elde edilen numuneler üzerinden belirlenen) Shake2000 yazılımına girilmiş ve Şekil 6.8, 6.9, 6.10 ve 6.11'de gösterilen modül azalım oranı ve sönüm oranı eğrileri oluşturulmuştur.

Çizelge 6. 4. Dinamik eğriler için derinlik aralıkları ve temsil eden derinlikler [174]

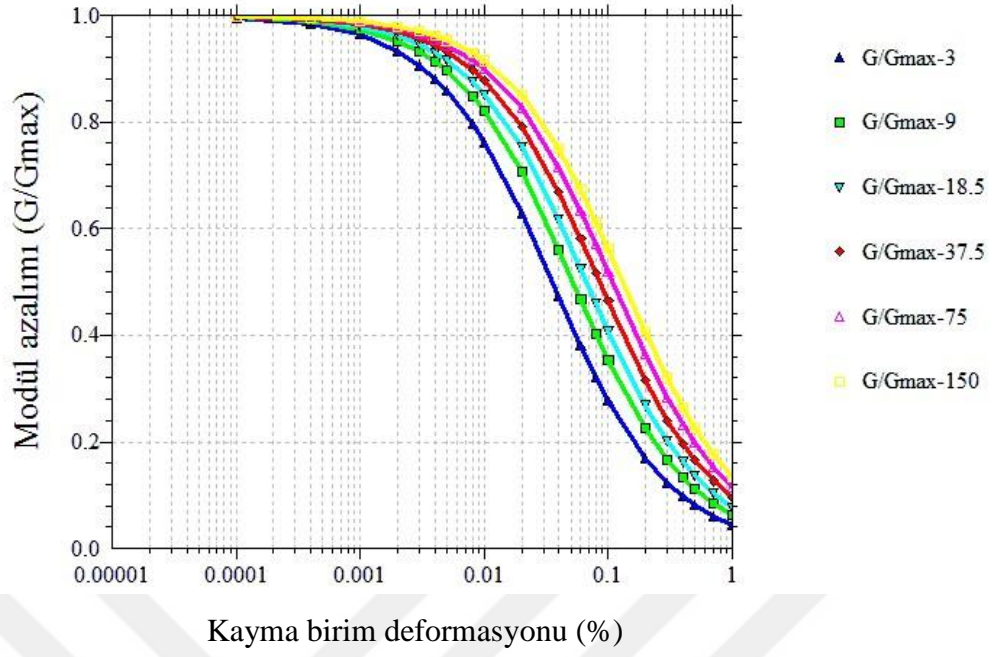
Derinlik aralıkları (m)	Temsil eden derinlik(m)
0-6	3
6-12	9
12-25	18,5
25-50	37,5
50-100	75
100-200	150
>200	>250



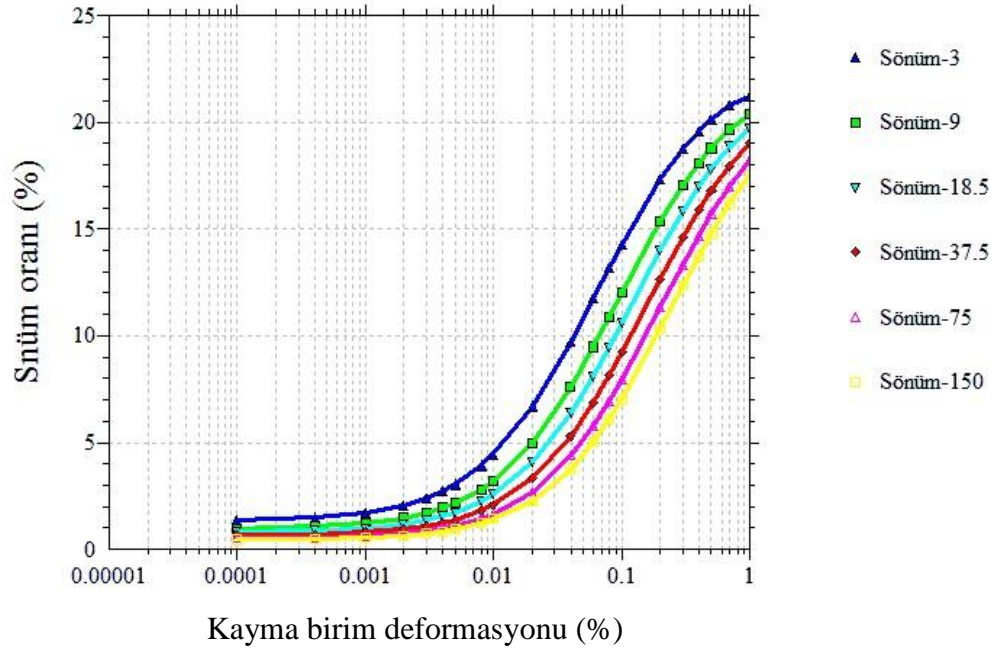
Şekil 6. 8. Killer için modül azalımı eğrileri



Şekil 6. 9. Killer için sönüm oranı eğrileri



Şekil 6. 10. Kumlar için modül azalım eğrileri



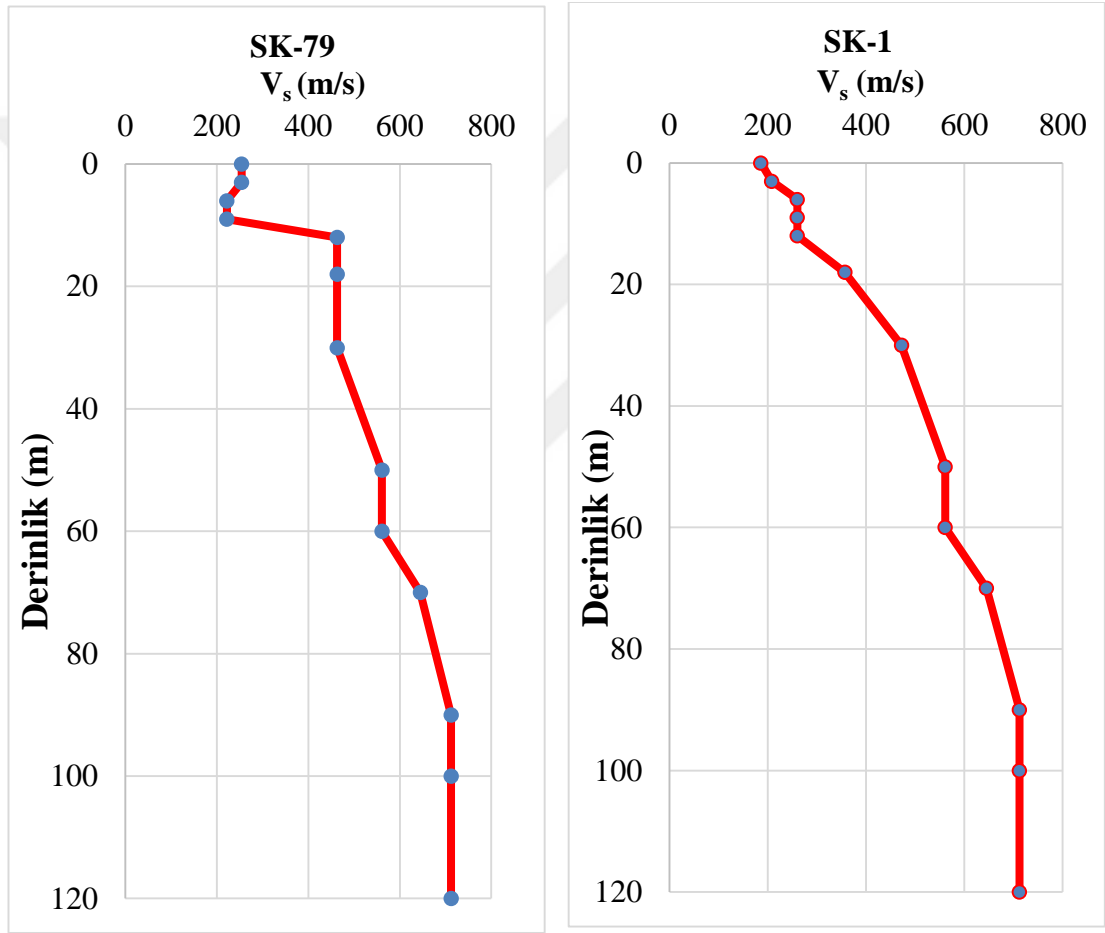
Şekil 6. 11. Kumlar için sönüm oranı eğrisi

6.5. Zemin Davranış Analizlerindeki Zemin Profillerinin Modellenmesi

Sismik mikrobölgeleme uygulamalarında çalışma alanını kare hücelere bölmek yaygın bir uygulamadır. Çalışma alanındaki kare hücrelerin boyutları eldeki jeolojik, jeofizik ve geoteknik verilere göre değişmektedir. Literatürde hücre boyutları genellikle 250*250 m ve 500*500 m arasında değişmektedir [175]. Kırıkkale yerleşim alanında zeminler çoğunlukla CL sınıfında zeminlerden oluşmakta ve yer yer bazı seviyelerde çok az CH ve SC türü zeminlere de rastlanmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak çalışma alanını oluşturan zeminler için homojen bir dağılımdan söz edilebilir. Bu nedenle bu çalışmada hücre boyutları 500*500 m olarak belirlenmiş ve Şekil 6.12'de görüldüğü gibi yerleşim alanı 269 hücreye bölünmüştür.



Her hücre için elde yeterli veri olmadığından zemin davranış analizleri 108 noktada yapılabildiği görülmüştür. Zemin davranış analizlerinde zemin profilleri oluşturulurken ana kaya derinliği, bölgede Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yapılan derin su sondajları gözönüne alınarak, 120 m olarak belirlenmiştir. Ana kaya derinliğinde kayma dalgası hızı 760 m/s olarak belirlenmiştir [176]. Zemin yüzeyinden anakaya derinliğine kadar kayma dalgası hızı her bir noktada SPT, MASW ve sismik kırılma testleri sonuçlarına göre belirlenmiştir. Tipik zemin profilleri Şekil 6.13’de verilmiştir.



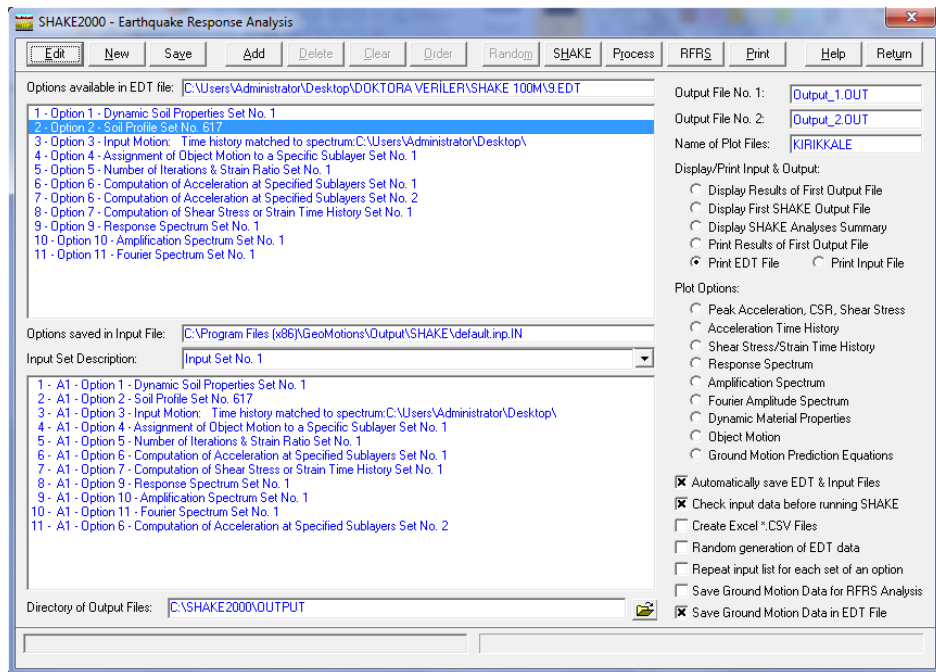
Şekil 6. 13. a) SK-79 zemin profili

b) SK-1 zemin profili

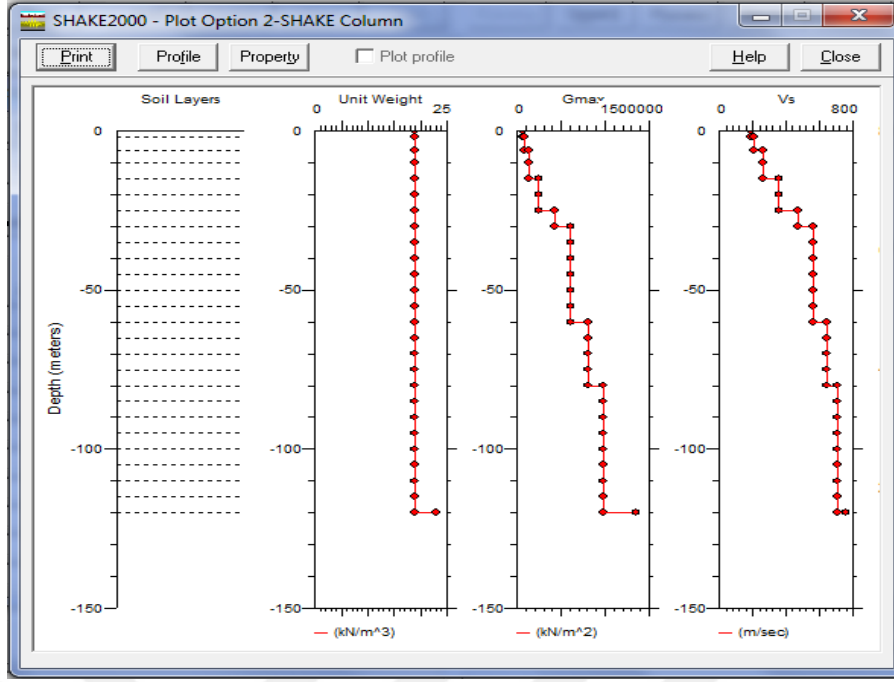
6.6. Zemin Davranış Analizlerinde Kullanılan Deprem Kaydı

Bölgesel sismik tehlike, daha önceki bölümlerde yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi Kırıkkale’de olması muhtemel deprem büyüklüğü 7 ve faya olan mesafe 5 km olarak kabul edilebilir. Bölüm 3’de verildiği gibi NGA-West2 azalım modellerinden sağlanan, ana kaya seviyesi için hedef spektrumla ölçeklenmiş toplam 7 adet deprem kaydı seçilmiş ve bu kayıtların ortalama spektrumu belirlenmiştir. Belirlenen spektrumla zaman tanım alanında ölçeklenmiş yapay deprem kaydı, RSPMATCH programında elde edilmiş ve her analiz noktası için zemin davranış analizlerinde, giriş deprem kaydı olarak kullanılmıştır.

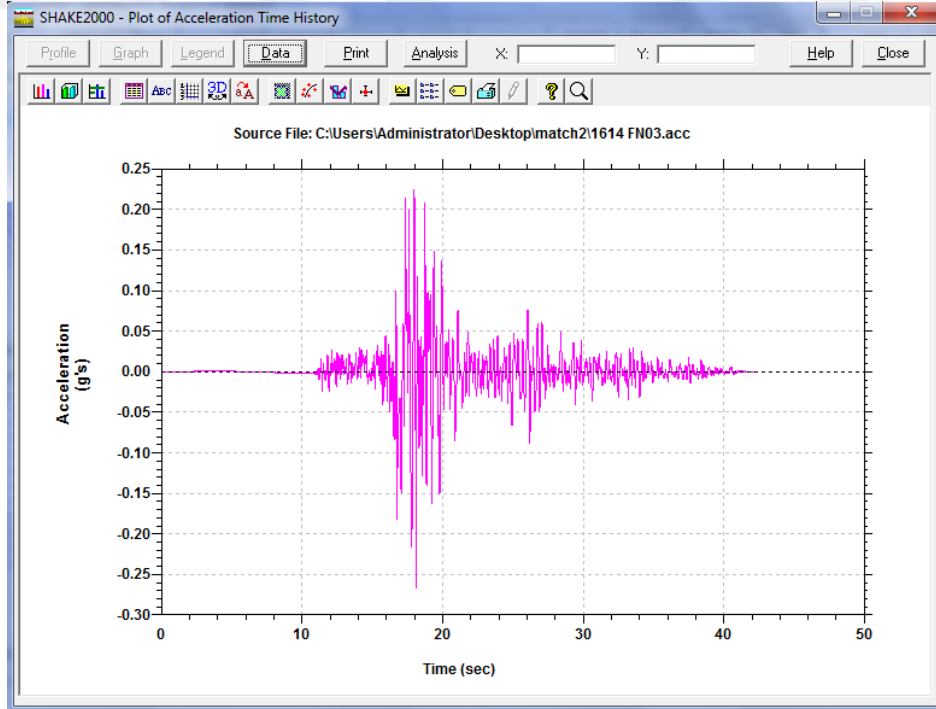
Her hücre için belirlenen tipik zemin profilleri ve yapay deprem kaydı, SHAKE2000 programında zemin davranış analizlerinde giriş parametreleri olarak kullanılmıştır. SHAKE2000 programının giriş sayfası Şekil 6.14’de gösterilmiştir. İlaveten örnek bir zemin profil grafiği de Şekil 6.15’de verilmiştir. Şekil 6.16’de ise giriş hareketi olarak programa girilen deprem kaydı sunulmuştur.



Şekil 6. 14. SHAKE2000 programı parametre giriş sayfası



Şekil 6. 15. SHAKE2000 programı zemin profilleri



Şekil 6. 16. SHAKE2000 programı giriş deprem kaydı

6.7. Zemin Büyütmesi

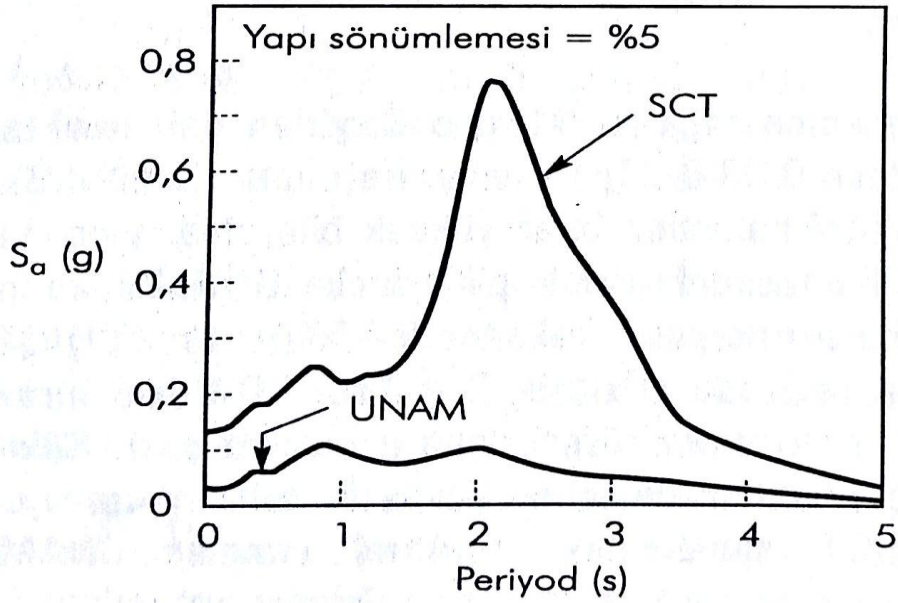
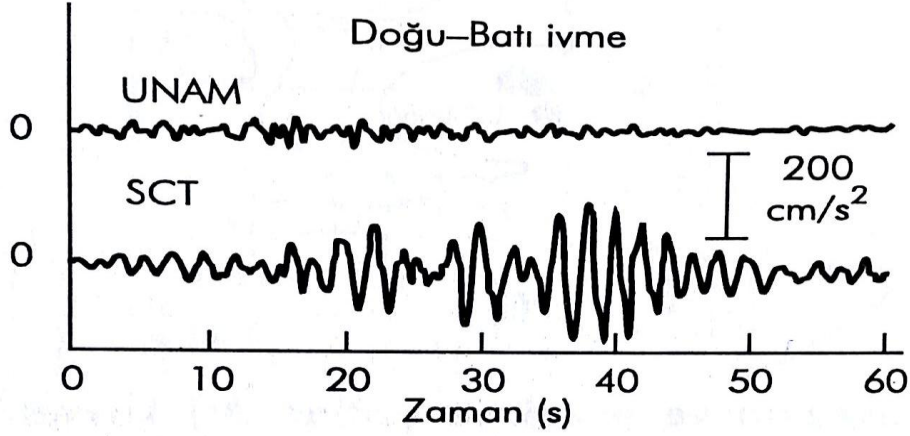
Zemin etkisi, dalga yayılmasında yerel jeolojinin etkisini göstermesi bakımından önemlidir. Yerel jeoloji, zemin kalınlığı ve yüzey topoğrafyasından etkilenebilmektedir. Zemin etkisi, zemin tabakalarının ve yüzey topoğrafyasının özellikleri nedeniyle gelen dalgaların neden olduğu yüzey yer hareket bileşenlerindeki değişimi kontrol eder. Bu değişim yer hareket bileşenlerinin genliklerinde büyütme veya sönümleme şeklinde açıklanabilmektedir [177].

Şekil 6.17’de ivme genliklerinde görülen artışlar 1985 Michoacan depreminde (M_s : 8.1) merkez üssünden 350 km uzaklıkta Mexico şehrinde görülen büyütmelerdir. Bu depremde yumuşak zemin tabakaları üzerine yerleştirilmiş SCT kayıt istasyonundaki ivme kayıtlarında, bazaltlar üzerine yerleştirilmiş UNAM istasyonundaki kayıtlara göre yaklaşık 8-10 kat büyütme görülmektedir [90].

Zemin büyütmesi, kuvvetli depremler sırasında kentsel alanlarda deprem zararlarını kontrol eden önemli faktörlerden biridir. Deprem sırasında yumuşak zemin tabakaları üzerindeki aynı karakterde yapıların, sert zeminlere veya kaya ortamlara göre daha fazla hasar görmesinin en önemli sebeplerinden biride zemin büyütme etkisidir. Bu etkinin sayısal değerlendirmesi zemin büyütmesi oranları ile tanımlanmaktadır. Büyütme oranları kentsel alanların sismik tehlike hesaplamalarında kullanılabilir. Bu oranlar, zemin koşullarının etkisini değerlendirmek ve çalışma alanlarını zemin büyütmesi amaçlı sınıflandırmak için kullanılmaktadır. Büyütme amaçlı saha sınıflandırmaları, V_{s30} değerleri, geoteknik veriler ve yüzey jeolojisi verileri kullanılarak yapılabilmektedir [178].

Zemin büyütmesini aslında deprem sırasında odak noktasından ana kaya içerisine doğru dağılan ve yüzeye doğru seyahat eden sismik dalgaların, seyahatlerinin son bölümünde ana kayaya göre yumuşak zemin tabakaları içerisinden geçerken genliklerinde meydana gelen artış olarak tanımlamak mümkündür. Bu zemin tabakalarının fiziksel özellikleri yüzeydeki hareketin karakteristiğini belirler. Yumuşak zemin tabakaları farklı periyotlarda gelen sismik dalgalara aynı tepkiyi vermez; bazı frekanslardaki sismik dalgalar büyütülürken bazı frekanslardaki dalgalar

sönümlendirilir yani büyütme frekans bağımlıdır. En fazla büyütmenin hangi periyotlarda olacağına yumuşak zemin tabakasının kalınlığı ve sismik dalga hızı karar verir. Maksimum büyütmenin görüldüğü periyot (T_0) zemin hakim periyodu olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 6. 17. 1985 Michoacan depreminde meydana gelen büyütme [90]

Büyütme oranları çoğunlukla ilgili sahada yüzey spektrumunun anakaya spektrumuna oranlanması ile belirlenmektedir. Büyütme oranlarının belirlenmesi farklı zemin

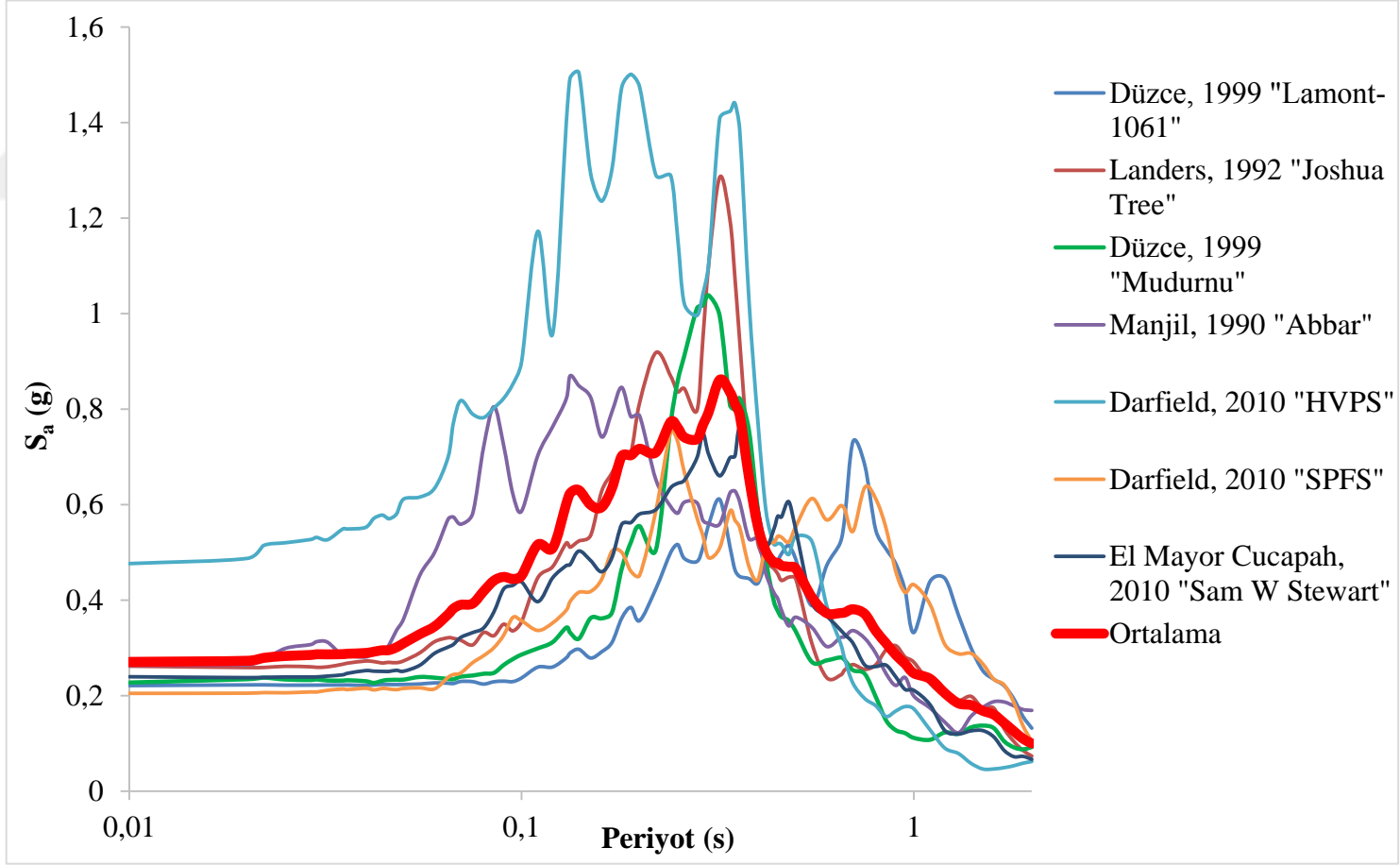
davranış teknikleri kullanılarak yapılabilmektedir. Bunlar Pitilakis [177] tarafından beş an grupta toplanmıştır;

- 1) Deneysel-ampirik metotlar
- 2) Ampirik teknikler
- 3) Yarı ampirik teknikler
- 4) Teorik (nümerik ve analitik) metotlar
- 5) Hibrit metotlar

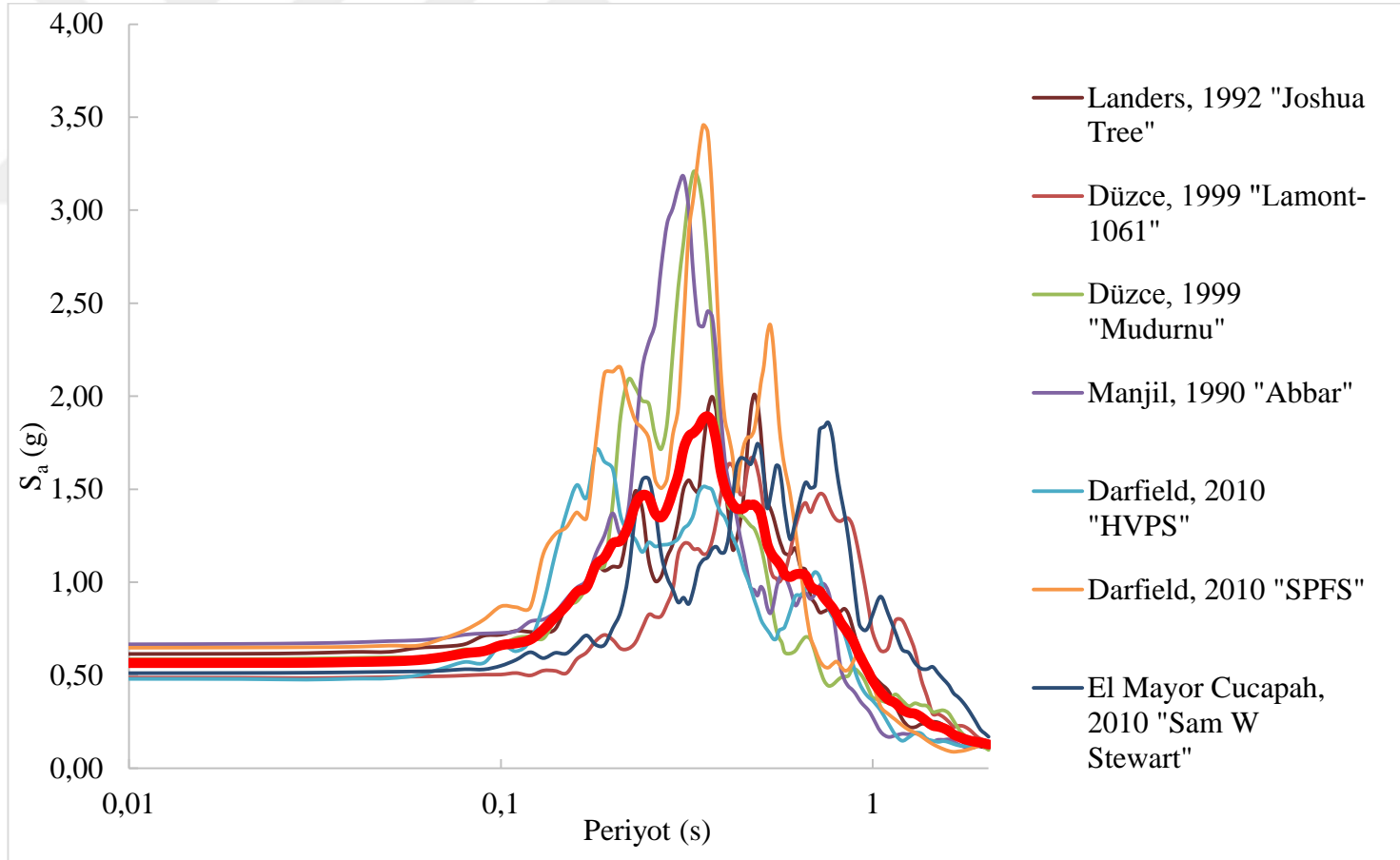
Kırıkkale’de zemin davranış analizleri 1-D eşdeğer lineer analiz yapabilen SHAKE2000 programı kullanılarak yapılmıştır. SHAKE2000’den sağlanan sonuçlar ile literatürde kayma dalgası hızına bağlı denklemler kullanılarak yapılan büyütme analizi sonuçları karşılaştırılmıştır.

6.8. Kırıkkale’de Zemin Büyütmesi, İvme Spektrumu ve Pik Yer İvmesi

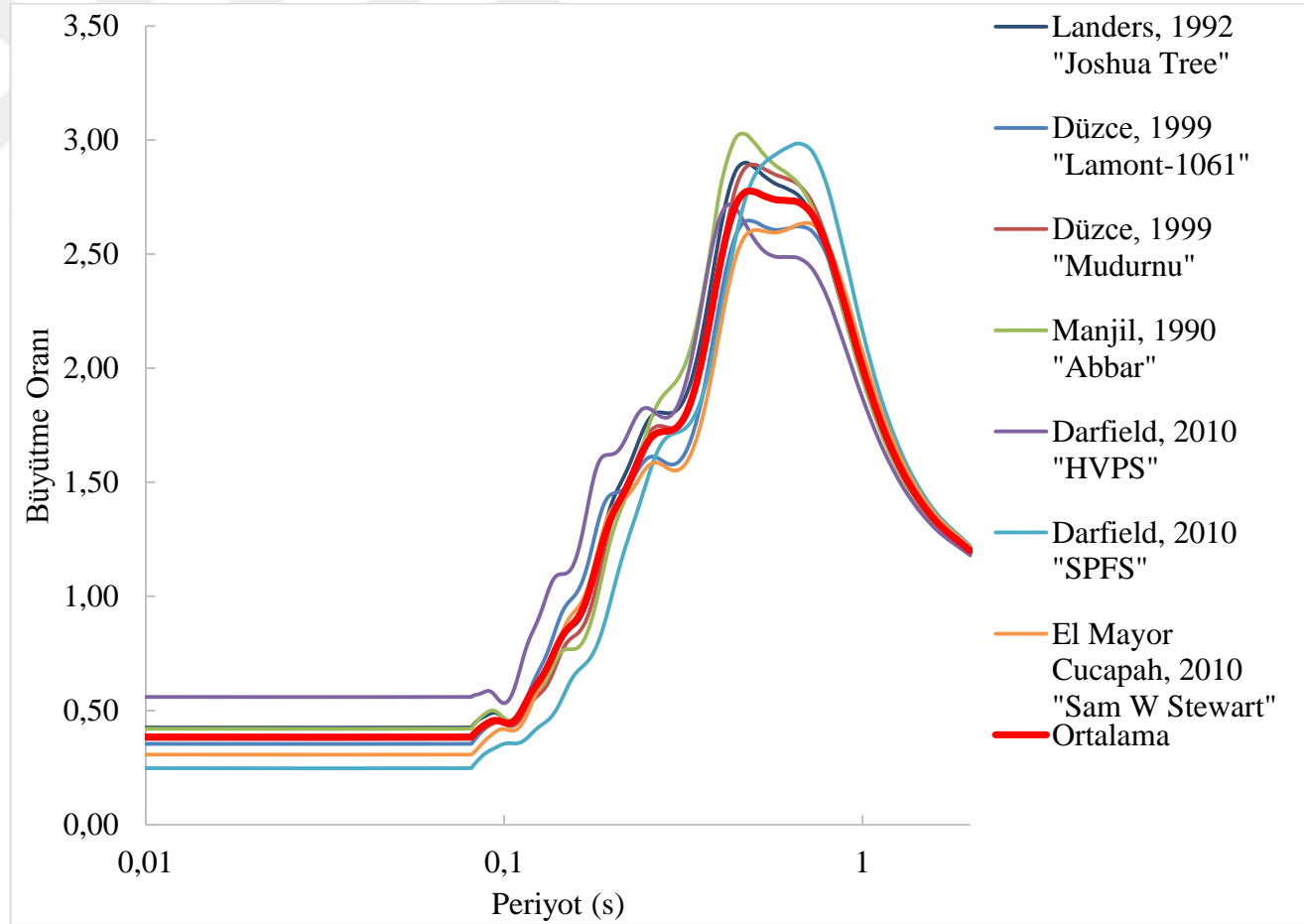
Kırıkkale’de elde edilen test sonuçlarına bağlı olarak oluşturulan SK-1 lokasyonundaki zemin profili üzerinde yapılan zemin davranış analizlerinde, giriş hareketi olarak ASK13, BSSA13 ve CB13 azalım ilişkilerinden belirlenen hedef spektrumla ölçeklenmiş Çizelge 5.10’da verilen 7 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Seçilen kayıtların anakaya ivme spektrumları Şekil 6.18’de, zemin davranış analizlerinden sağlanan yüzey ivme spektrumları Şekil 6.19’da, büyütme oranları ise Şekil 6.20’de verilmiştir.



Şekil 6. 18. 5 km mesafe için hedef spektruma ölçeklenmiş kayıtların ivme spektrumları



Şekil 6. 19. 5 km mesafe için SK-1 zemin profiline göre yüzey ivme spektrumları

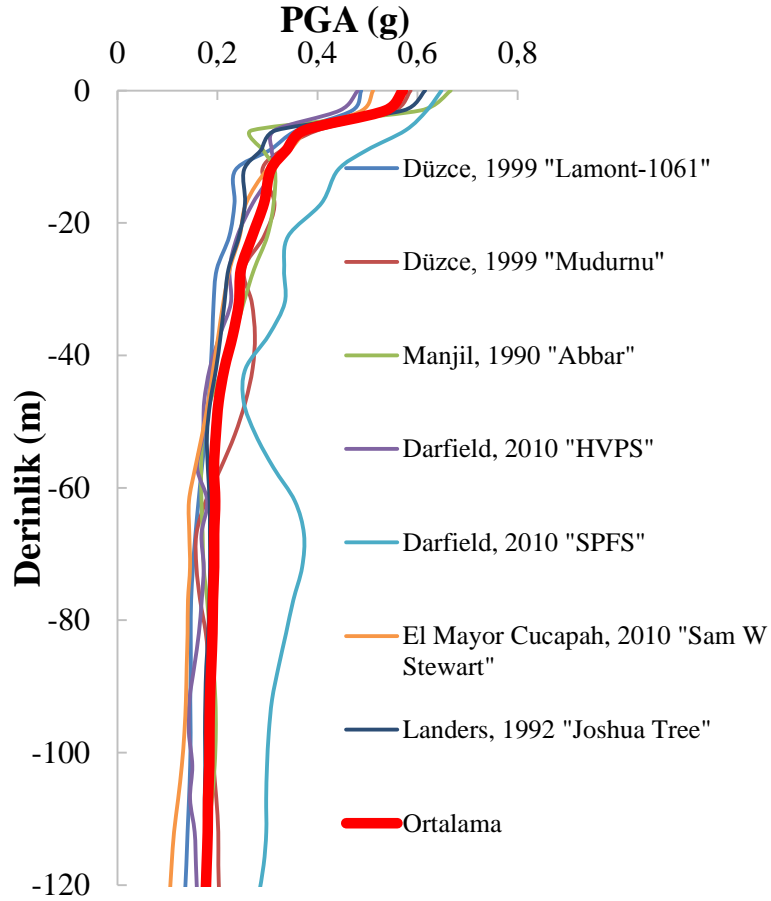


Şekil 6. 20. 5 km mesafe için SK-1 zemin profiline göre büyütme oranları

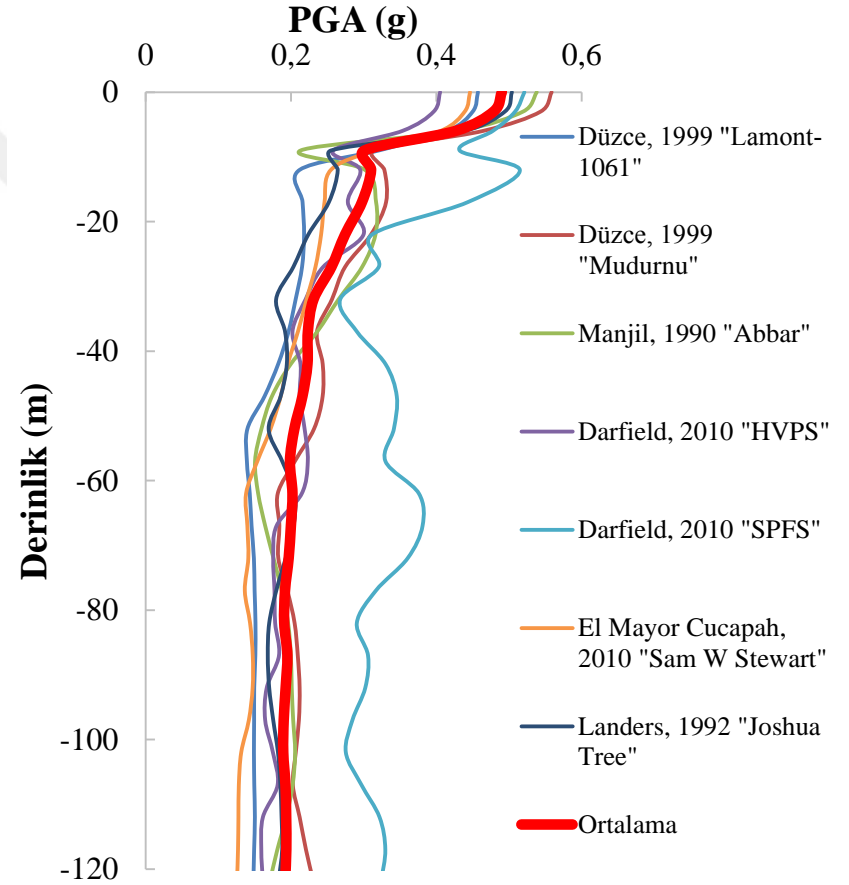
SC aralanmalı CL birimlerden oluşan SK-1 ve tamamen CL birimlerden oluşan SK-79 zemin profilleri üzerinde, farklı deprem kayıtları kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen PGA'nin derinlikle değişim grafikleri Şekil 6.21 ve 6.22'de sunulmuştur. Ayrıca SK-1 ve SK-79 zemin profili üzerinde SHAKE2000 programı kullanılarak gerçekleştirilen zemin davranış analizinin sonuçları özet olarak Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6. 5. SK-1 ve SK-79 için zemin davranış analizlerinin sonuçları

Yer Hareketi	Pik Yer İvmesi PGA (g)		Büyütme Oranı		Zemin Hakim Periyodu (s)	
	SK-1	SK-79	SK-1	SK-79	SK-1	SK-79
Düzce, 1999 "Lamont-1061"	0,49	0,46	2,64	2,43	0,47	0,42
Düzce, 1999 "Mudurnu"	0,59	0,56	2,87	2,49	0,47	0,44
Manjil, 1990 "Abbar"	0,67	0,54	3,01	2,52	0,44	0,42
Darfield, 2010 "HVPS"	0,48	0,41	2,71	2,23	0,42	0,36
Darfield, 2010 "SPFS"	0,65	0,52	2,96	2,46	0,61	0,62
El Mayor Cucapah, 2010 "Sam W Stewart"	0,51	0,45	2,63	2,40	0,66	0,40
Landers, 1992 "Joshua Tree"	0,61	0,50	2,86	2,50	0,44	0,42
Ortalama	0,57	0,49	2,81	2,43	0,50	0,44



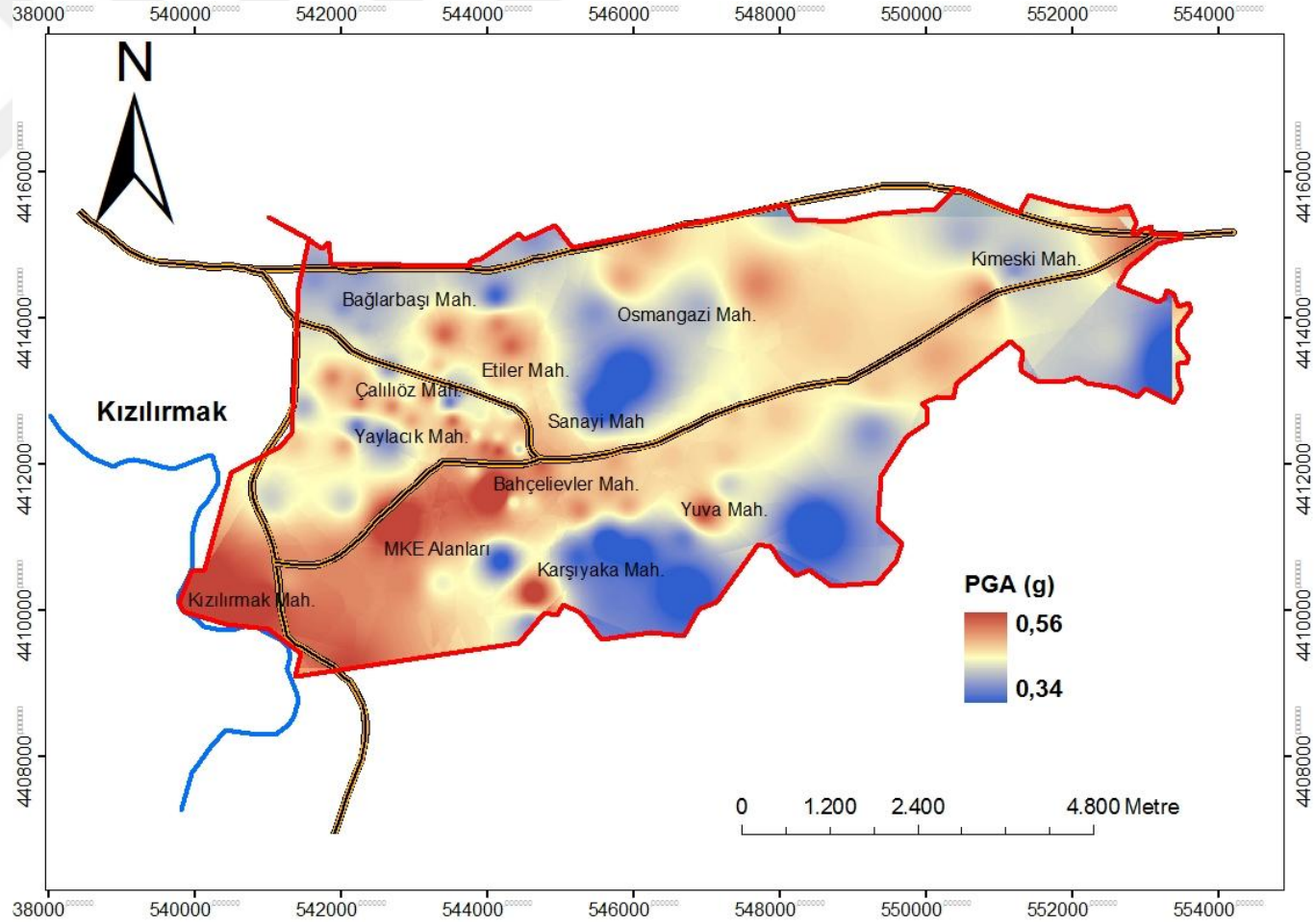
Şekil 6. 21. SK-1 zemin profili için PGA'nin derinlikle değişimi



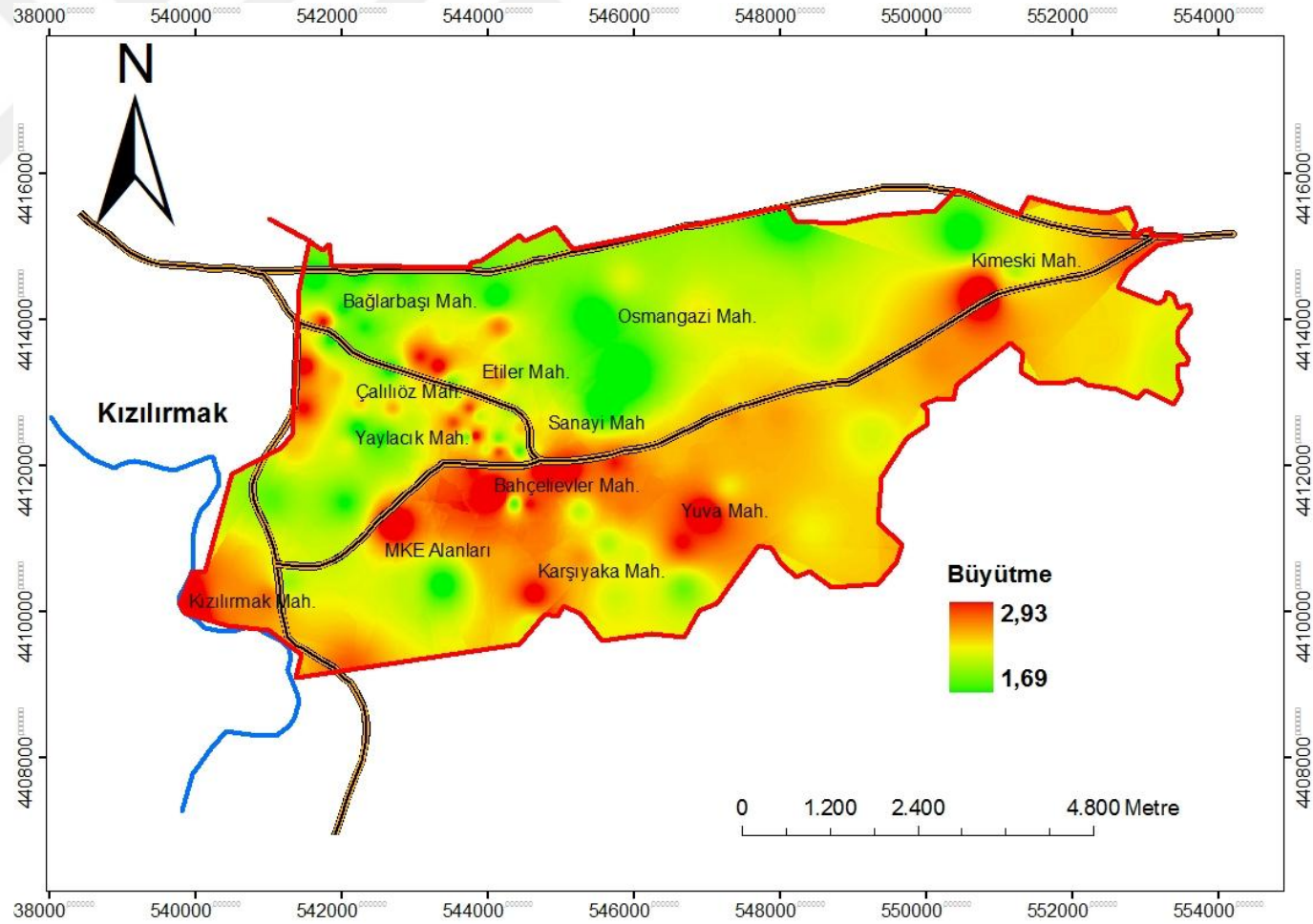
Şekil 6. 22. SK-79 zemin profili için PGA'nin derinlikle değişimi

Çizelge 6.5’de görüldüğü gibi, SK-1 ve SK-79 zemin profilleri üzerinde farklı deprem hareketleri kullanılarak yapılan davranış analizleri sonucunda, pik yer ivmesi (PGA) 0,45 ile 0,67 g arasında, zemin hakim periyodu ise 0,36 ile 0,66 s arasında değişmektedir. Büyütme oranları ise her iki zemin profili için 2,23 ile 3,01 arasında değişmektedir. Zemin profillerindeki yer hareket parametreleri arasındaki küçük farklılıkların, zemin tabakalarının kayma dalgası hızlarındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Pik yer ivmesi (PGA), büyütme oranı ve zemin hakim periyodu haritaları daha önceki bölümlerde sözü edilen 108 lokasyonda yapılan zemin davranış analizleri sonucunda hazırlanmış ve sırasıyla Şekil 6.23, 6.24, 6.25’de verilmiştir. Zemin davranış analizlerinde, RSPMATCH programından elde edilen ve Şekil 5.24’de ivme-zaman grafiği verilen kayıt kullanılmıştır.

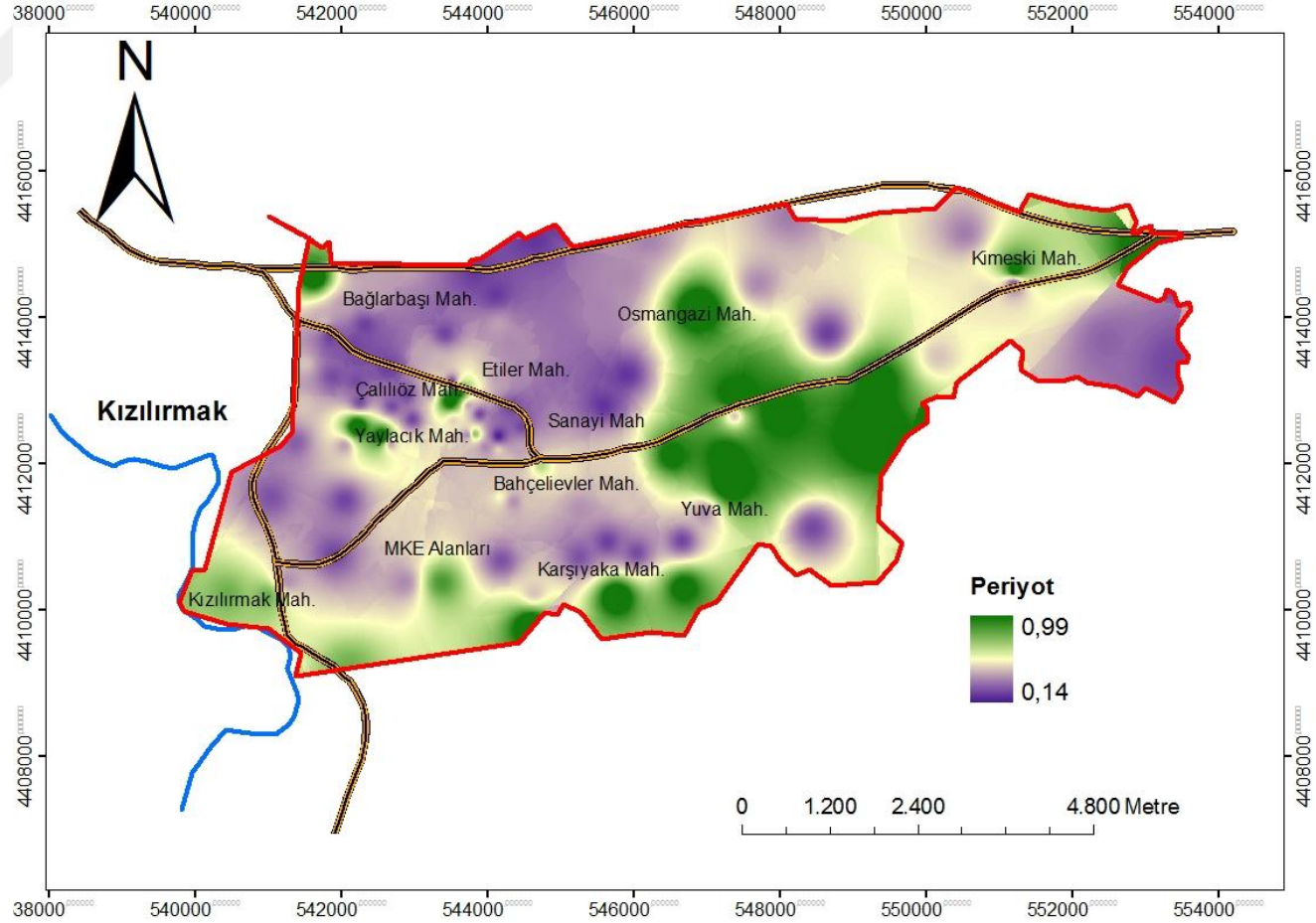
Deprem mühendisliği uygulamalarında ivme spektrumları yaygın olarak kullanılmaktadır. İvme spektrumları, farklı periyotlardaki tek serbestlik dereceli sistemler üzerine gelen maksimum ivmeleri yansıtmaktadır. İvme spektrumlarında belli bir periyottaki ivme değeri, sıklıkla spektral ivme (S_a) olarak tanımlanmaktadır. Binalar tek serbestlikli sistem olarak düşünüldüğünde ivme spektrumları, farklı periyotlardaki binalar üzerine gelen spektral ivme (S_a) değerlerini göstermektedir. Zemin davranış analizlerinden elde edilen yüzey spektral ivmelerin maksimum değerini kullanarak yapılan haritalama, ivmelerin hangi periyotlarda meydana geldiğini göstermediğinden çok kullanışlı değildir. Ancak 0,2 s (kısa periyot) ve 1,0 s (uzun periyot) değerlerine göre yapılan haritalamalar daha kullanışlı ve rezonans olayını tanımlamada daha aydınlatıcı olmaktadır. Kırıkkale için yapılan analizlerden elde edilen 0,2 s ve 1,0 s periyotlu S_a değerleri Şekil 6.26 ve 6.27’de sunulmuştur.



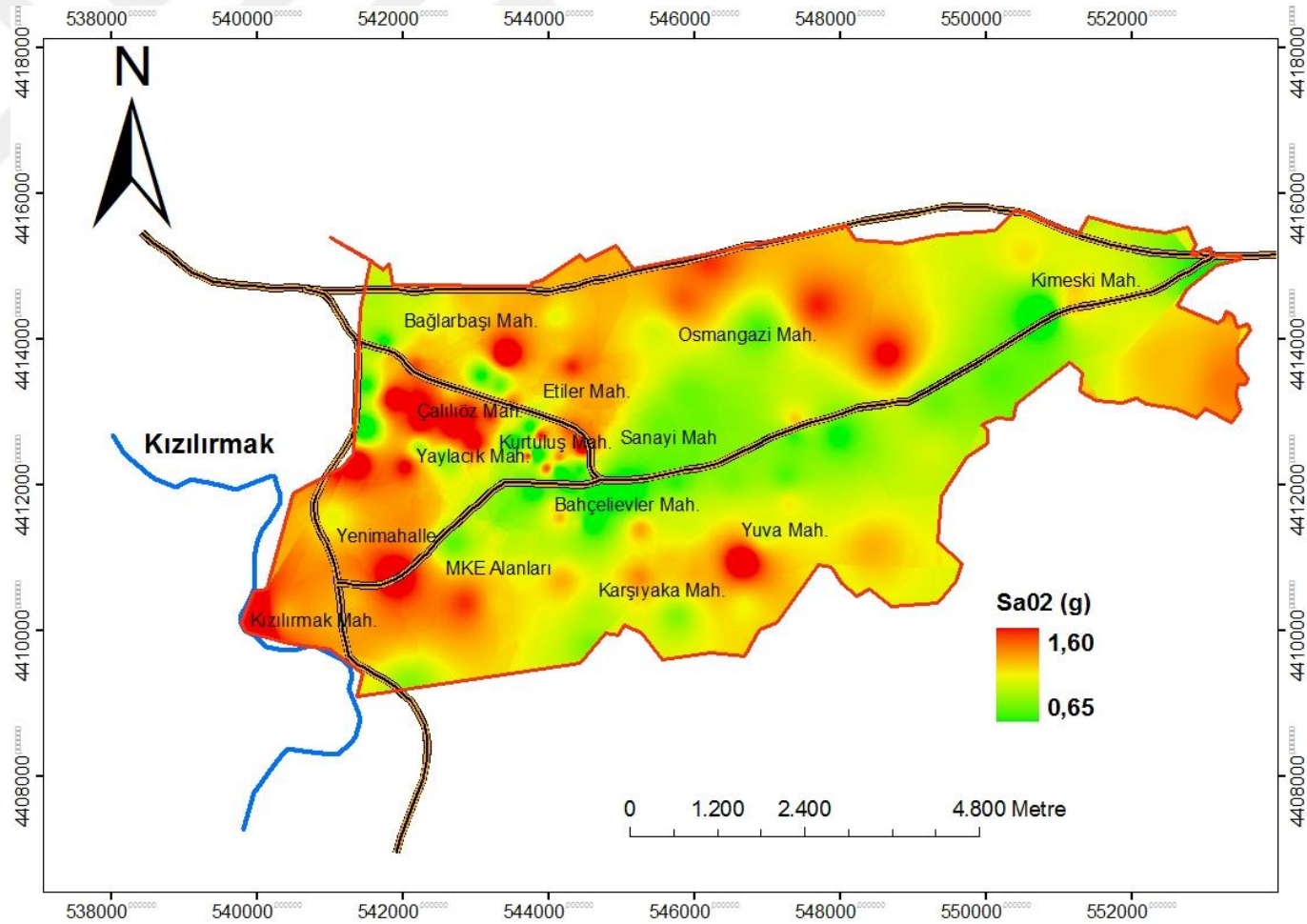
Şekil 6. 23. Kırıkkale için pik yer ivmesi (PGA) haritası



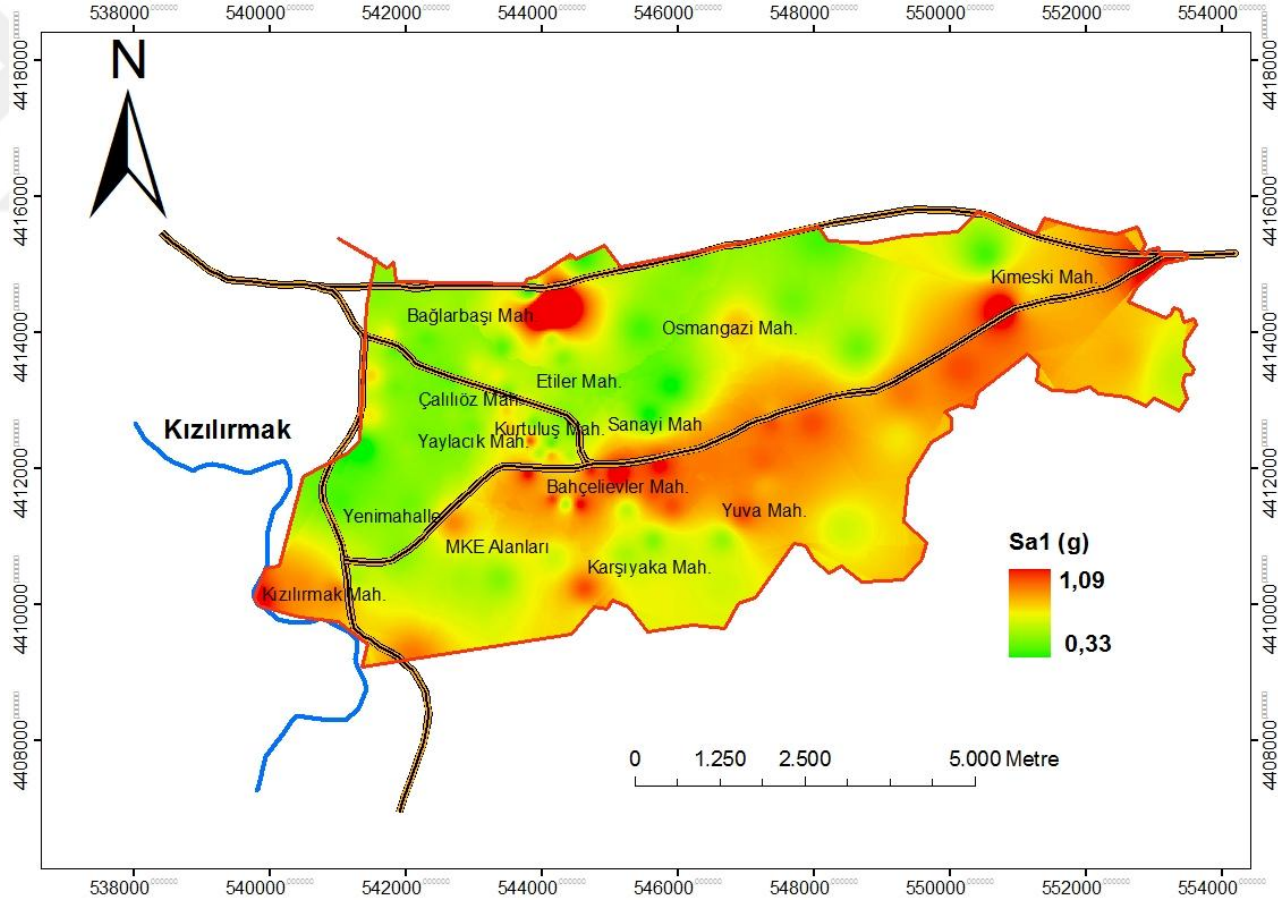
Şekil 6. 24. Kırıkkale için zemin büyüme haritası



Şekil 6. 25. Kırıkkale için zemin hakim periyodu haritası



Şekil 6. 26. Kırıkkale için 0,2 s periyotlu spektral ivme haritası



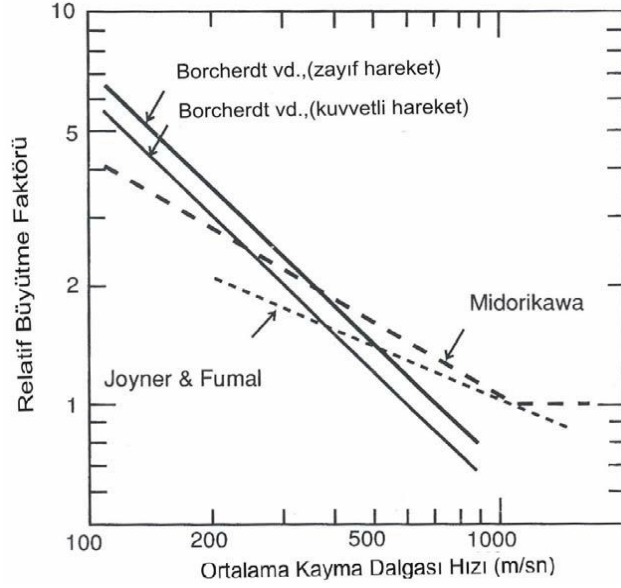
Şekil 6. 27. Kırıkkale için 1 s periyotlu spektral ivme haritası

Çalışma alanında zemin hakim periyodu 0,14 ile 0,99 s arasında değişmektedir. MKE alanları, Kızılırmak, Karşıyaka, Yaylacık, Osmangazi, Yuva ve Kimeski mahallelerinde periyotlar 0,65 ile 0,9 s arasında değişirken, diğer yerlerde ise 0,2 ile 0,6 s arasında değişmektedir. Büyütme oranları ise 1,69 ile 2,93 arasında değişim göstermekle beraber, yüksek büyütme değerleri Kızılırmak nehri boyunca gözlenmektedir. Çalışma alanında pik yer ivmesi (PGA) değerleri 0,34 ile 0,56 g arasında değişirken, yüksek PGA değerleri çalışma alanını doğu-batı yönünde bölen alüvyon zeminler üzerinde, MKE alanlarında ve Kızılırmak mahallesinde görülmektedir. Kısa periyot (0,2 s) spektral ivmeler alüvyon zeminler üzerinde 0,65 g seviyesinde iken, uzun periyot (1 s) spektral ivme değerleri 0,79 g seviyesindedir..

6.9. Büyütme Oranlarının Kayma Dalgası Hızından Belirlenmesi

Zemin büyütmesini belirlemek için yüzey tabakalarının kayma dalgası hızı önemli bir parametredir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde belli bir derinlikteki zemin tabakalarının ortalama kayma dalgası hızı ile spektral büyütme arasındaki ilişki bazı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur [179, 180, 181]. Önerilen bağıntılar Çizelge 6.6'da verilmiştir ve TCEGE [182] tarafından Şekil 6.28'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Çalışma alanı için büyütme faktörü değerleri Midorikawa [179] tarafından önerilen bağıntı kullanılarak belirlenmiştir. Kırıkkale için her lokasyonda V_{s30} değerleri belirlenmiş ve büyütme faktörlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Elde edilen büyütme sonuçları 1,67 ile 2,45 arasında değişmektedir ve Çizelge 6.7'de verilmiştir. Büyütme faktörleri haritası ise Şekil 6.29'da sunulmuştur.



Şekil 6. 28. Farklı ilişkilere göre büyütme faktörlerinin karşılaştırması [182]

Çizelge 6. 6. Ortalama kayma dalgası hızı ile büyütme faktörü arasındaki ilişkiler

Araştırmacılar	Eşitlikler
Midorikawa (1987)	$A = 68 V_1^{-0,6}$ ($V_1 < 1100$ m/s)
	$A = 1$ ($V_1 > 1100$ m/s)
Joyner ve Fumal (1984)	$A = 23 V_2^{-0,45}$
Borchardt vd. (1991)	$AHSA = 700/V_1$ (Zayıf yer hareketi için)
	$AHSA = 700/V_1$ (Kuvvetli yer hareketi için)

A: Pik yer hızı için relatif büyütme faktörü

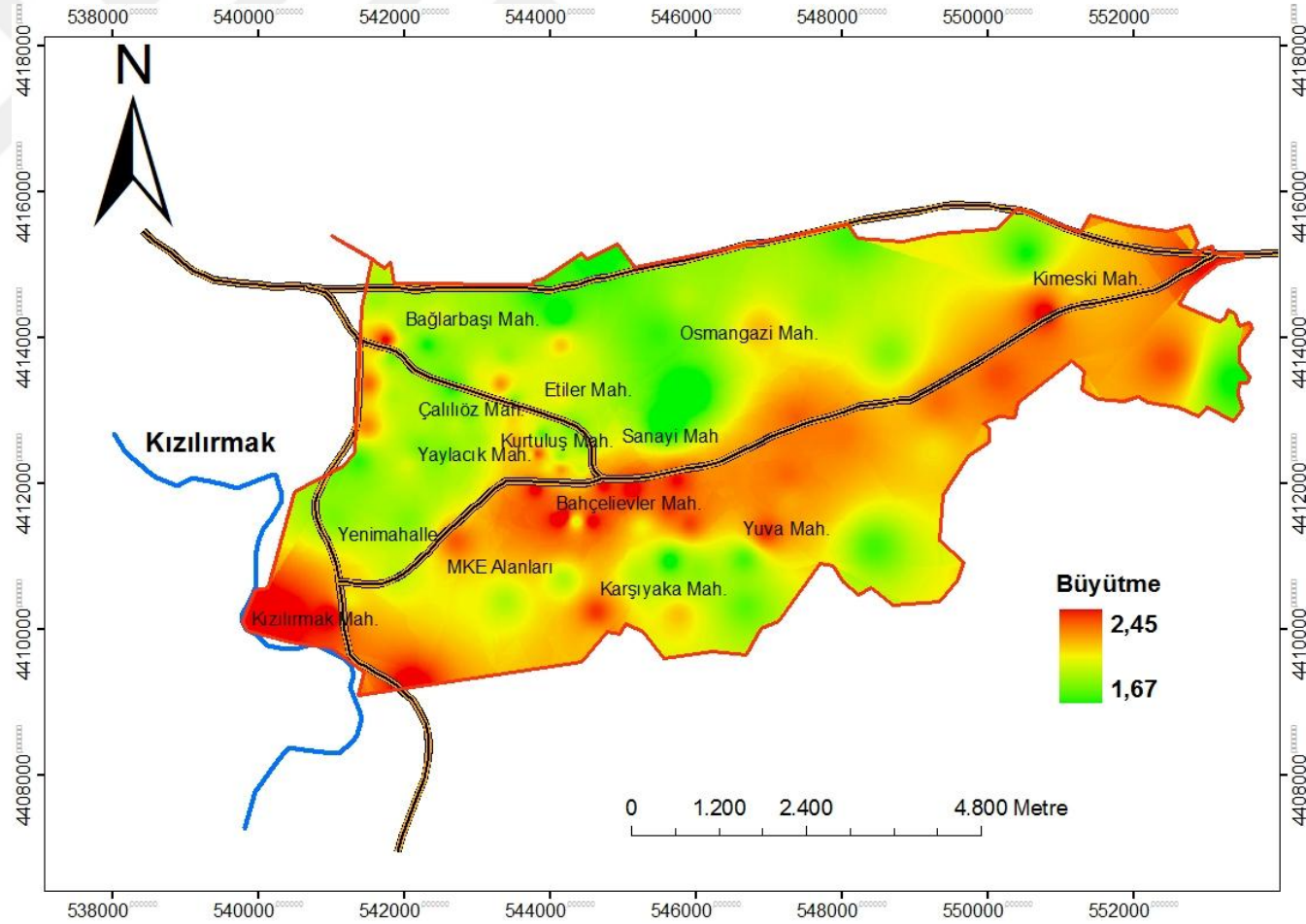
AHSA: 0,2-0,4 s periyot aralığı için ortalama yatay spektral büyütme

V_1 : 30 m derinlik için ortalama kayma dalgası hızı (m/s)

V_2 : Yarım periyot dalgası için bir çeyrek dalga boyunun ortalama kayma dalgası hızı (m/s)

Çizelge 6. 7. Midorikawa (1987) bağıntısına bağlı büyütme faktörleri

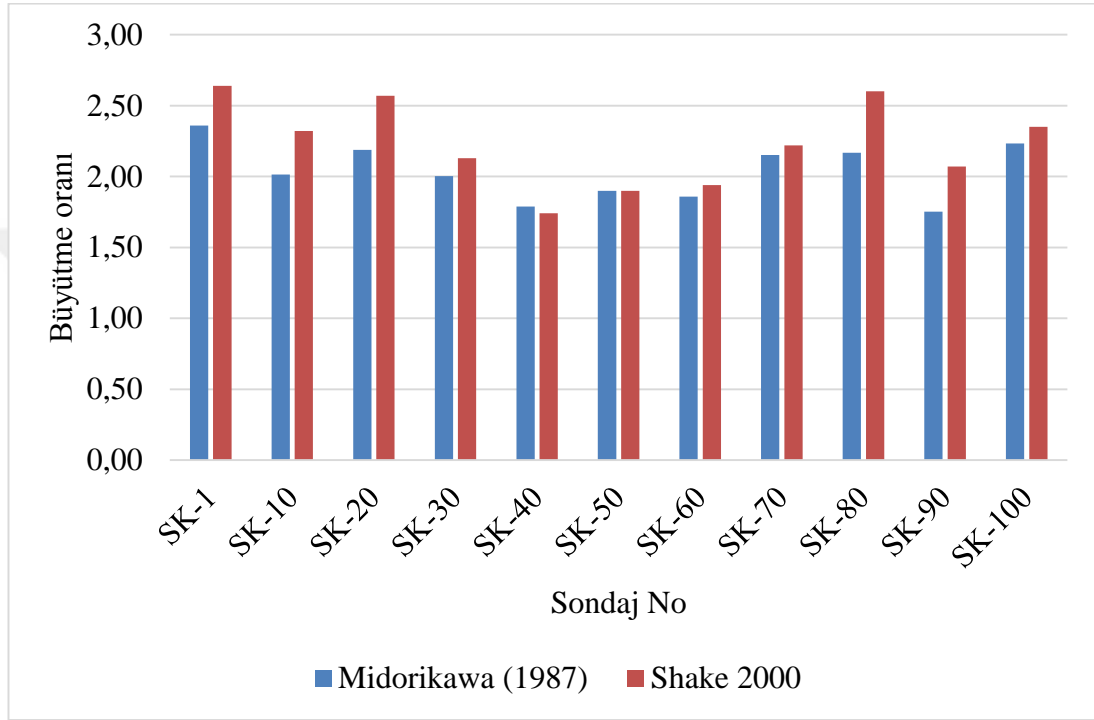
Sondaj No	Büyütme Oranı	Sondaj No	Büyütme Oranı	Sondaj No	Büyütme Oranı
SK-1	2,36	SK-37	1,82	SK-73	1,92
SK-2	2,00	SK-38	1,88	SK-74	2,11
SK-3	1,96	SK-39	1,82	SK-75	1,93
SK-4	2,15	SK-40	1,79	SK-76	1,94
SK-5	2,06	SK-41	2,02	SK-77	2,03
SK-6	2,20	SK-42	2,21	SK-78	2,03
SK-7	1,84	SK-43	2,17	SK-79	2,08
SK-8	1,95	SK-44	1,78	SK-80	2,17
SK-9	1,90	SK-45	2,17	SK-81	2,01
SK-10	2,01	SK-46	2,02	SK-82	2,10
SK-11	1,94	SK-47	2,14	SK-83	2,02
SK-12	2,45	SK-48	1,90	SK-84	2,23
SK-13	2,07	SK-49	1,90	SK-85	2,24
SK-14	2,08	SK-50	1,90	SK-86	2,21
SK-15	2,24	SK-51	1,79	SK-87	2,18
SK-16	1,93	SK-52	1,73	SK-88	2,18
SK-17	1,86	SK-53	2,23	SK-89	1,82
SK-18	1,97	SK-54	1,90	SK-90	1,75
SK-19	1,86	SK-55	1,79	SK-91	1,92
SK-20	2,19	SK-56	1,98	SK-92	2,05
SK-21	1,83	SK-57	1,99	SK-93	2,06
SK-22	2,00	SK-58	2,10	SK-94	1,93
SK-23	1,88	SK-59	1,90	SK-95	2,24
SK-24	2,00	SK-60	1,86	SK-96	2,24
SK-25	1,92	SK-61	2,05	SK-97	2,16
SK-26	1,88	SK-62	1,97	SK-98	1,94
SK-27	1,83	SK-63	1,75	SK-99	2,25
SK-28	1,99	SK-64	1,89	SK-100	2,23
SK-29	1,84	SK-65	1,92	SK-101	2,25
SK-30	2,00	SK-66	1,81	SK-102	1,87
SK-31	1,79	SK-67	1,67	SK-103	1,81
SK-32	1,90	SK-68	1,67	SK-104	1,94
SK-33	1,87	SK-69	1,90	SK-105	1,88
SK-34	1,96	SK-70	2,15	SK-106	2,11
SK-35	2,08	SK-71	1,88	SK-107	2,14
SK-36	2,13	SK-72	2,14	SK-108	2,12



Şekil 6. 29 Kırıkkale için Midorikawa (1987) kayma dalgası hızına bağlı büyütme faktörleri haritası

6.10. Kırıkkale için Büyütme Oranlarının Karşılaştırması

Çalışma alanında, Shake2000 zemin davranış analizlerinden sağlanan büyütme oranları ile Midorikawa kayma dalgası hızına dayalı büyütme oranları, bazı lokasyonlar için Şekil 6.30'da verilmiştir.



Şekil 6. 30. Kırıkkale zeminleri için farklı metotlara göre büyütme faktörlerinin karşılaştırılması

Davranış analizlerinden elde edilen büyütme oranları 1,69 ile 2,93 arasında ve ortalamaları 2,2 iken, Midorikawa amprik bağıntısından elde edilen zemin büyütme oranları 1,67 ile 2,45 arasında ve ortalamaları 2 dir. Her iki metotta da büyütme oranlarının alt sınırı değişmemekle beraber üst sınırdaki metod farklılıklarından kaynaklanan kabul edilebilir değişimler söz konusudur. Şekil 6.25 ve Şekil 6.30'daki zemin büyütme haritalarına bakıldığında, hem Shake2000 analizlerinde hem de Midorikawa metodunda, Kızılırmak mahallesinde ve çalışma alanını doğu-batı

yönünde ikiye bölen alüvyon zeminlerin yaygın olarak gözleendiği bölgelerde, büyütme oranlarının daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Her iki metottan sağlanan sonuçlara bakıldığında, Kırıkkale zeminleri için ortalama büyütme oranlarının 2 civarında olduğu söylenebilir.



7. YAPILARIN DEPREM RİSKİNİN SOKAKTAN HIZLI TARAMA YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Dünyada ve Türkiye’de geçmişte meydana gelen şiddetli depremler, çoğunluğunu betonarme binaların oluşturduğu yerleşim yerlerinde ciddi mal ve can kayıplarının meydana gelmesine sebep olmuştur. Bu durum, deprem riski altında bulunan birçok yerleşim alanında sismik risklere karşı mevcut binaların ne derece hazır olduğuna dair soruların tartışılmasına; Türkiye’de özellikle İstanbul gibi büyük şehirlerde meydana gelmesi muhtemel deprem sonrasında oluşacak sorunların teşhisine yönelik çalışmaların önem kazanmasına sebebiyet vermiştir. Bu amaca yönelik olarak, kentsel yerleşim alanlarındaki yapı stoğu içerisinde, sismik hareketlere maruz kaldığında ağır hasar görecektir veya yıkılacak yapıların tespit edilmesine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır [183, 184, 185].

Deprem sırasında binaların hasar görebilirliğini değerlendirmede güncel yaklaşımlar üç ana grupta toplanmıştır. Birinci aşama “sokaktan hızlı tarama” olarak bilinen en basit seviyedir. Bu aşamada binalar üzerinde herhangi bir analiz yapılmamakta; depremde hasar görebilirliği yüksek olan binalar envanter bilgilerine dayalı olarak sokaktan hızlı bir şekilde tespit etmektir. FEMA 154 [186] ve FEMA 310 [187] aşama 1 ve Sucuoğlu ve Yazgan [185] tarafından geliştirilen yöntemler bu aşamaya örnek olarak verilebilir.

İkinci aşamada çeşitli metotlara dayalı olarak binaların basitleştirilmiş analizleri yapılmaktadır. Bu analizler yapısal ve yapısal olmayan elemanların boyutlarına ait verileri gerektirmektedir. FEMA 310 aşama 2 ve Özcebe vd. [188] tarafından başlanan ve daha sonra Yakut vd. [189] tarafından tamamlanan yöntemler bu aşamaya örnek olarak verilebilir. Makul bir süre içerisinde bu yöntemler kullanılarak büyük yapı stokları incelenebilmektedir [190].

Üçüncü aşama ise tüm yapısal elemanların betonarme detayları ve boyutları dikkate alınarak, yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri yapılmaktadır. ATC 40

[191], FEMA 356 [192], EUROCODE 8 [193] ve Sucuoğlu vd. [194] tarafından önerilen yöntemler üçüncü aşama değerlendirme yöntemlerine örnek olarak verilebilir.

7.1. Sokaktan İnceleme Parametreleri

Geçmişte meydana gelen birçok deprem, bina kat sayısı ile deprem hasarlarının doğru orantılı olduğunu göstermiştir. Bu durum genellikle mühendislik hizmeti almamış binalar için geçerli olmaktadır. Hasarı artıran başka faktörler de bulunmaktadır. Bunlar özellikle ağır çıkma, yumuşak kat gibi aşırı düzensizlikler, çerçevelerdeki süreksizlikler ve kalitesiz malzeme ve işçilik olarak söylenebilir [195]. Bu parametrelerin birçoğu sokaktan inceleme yöntemi ile belirlenebilmektedir. Sucuoğlu ve Yazgan [185] bu parametreleri aşağıdaki şekilde sıralamışlardır;

- Toplam kat sayısı
- Yumuşak kat
- Ağır çıkmalar
- Kısa kolon
- Görünen yapı kalitesi
- Çarpışma etkisi
- Topoğrafik etki
- Yerel zemin koşulları

1999 Düzce ve İzmit depremlerinden sonra yapılan bina gözlemlerinde bina kat sayısı ile hasar oranı arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Yönetmeliklere uygun yapılan binalarda, artan katsayısı ile artan yatay deprem kuvvetleri kapasite artışı ile dengelenmektedir. Ancak, mühendislik hizmeti almayan yönetmeliklere aykırı yapılan binalarda kapasite artışı sağlanamadığından hasar oranları yüksek olmaktadır.

Yumuşak kat genellikle binalarda giriş katların üst katlara oranla daha az dayanıma ve rijitliğe sahip olması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Özellikle ana cadde ve sokaklarda ticari mekan olarak kullanılan yerlerde, çerçevelerin içleri ön cephede vitrin oluşturmak ve iç mekanlarda ise geniş alanlar yaratmak amacıyla boşaltılmaktadır. Bu

durum, deprem mühendisliğinde Şekil 7.1'de görüldüğü gibi yumuşak kat olarak tanımlanan zayıflığı ortaya çıkarmaktadır. Üst katlar ise çerçevelerin duvarlar ile dolu olması sebebiyle daha fazla dayanıma ve rijitliğe sahip olmaktadır.

Ülkemizde yapılan bina projelerinin çoğunda üst katlardan alan kazanmak amacıyla kapalı veya açık çıkma yapılabilmektedir. Ağır ıkma olarak adlandırılan bu uygulama, binalarda zemin kat taban alanı ile üst katların taban alanları arasında farklılık oluŐturmakta; binada kütle ve rijitlik düzensizliğine neden olmakta; dış ereve akslarında belirgin kiriŐ süreksizliği meydana gelmektedir [195].



Şekil 7. 1. Betonarme binalarda yumuşak kat rneği

Bu durumda çıkmaların olduğu katlarda dış çerçeveler sürekliliğini kaybetmekte, tam taşıyıcı çerçeve oluşumu sağlanamamaktadır. Çoğu depremde ağır çıkmalı binaların, olmayan binalara göre daha fazla hasar gördükleri gözlenmiştir.(Şekil 7.2) Binalarda dış duvarların, üst kat tabliyesine kadar imalatının yapılmadığı durumlarda kuvvetli depremler sırasında kolonların bölme duvar örülmeven bölümlerinde kısa kolon etkileri ortaya çıkmaktadır.



Şekil 7. 2. Betonarme binalarda ağır çıkma örneği

Özellikle ticari yapılarda ışıktan yararlanmak ve havalandırma sağlamak amacıyla, bu duvarların kolon yüksekliği boyunca devam etmemesi durumunda, deprem esnasında gelen yatay kuvvetler nedeniyle kolonlar kendi düzlemleri boyunca eğilememektedir. Bunun sonucu kolonlar duvar üstünde bırakılan boşlukta eğilmeye zorlanmakta ve kolonun bu bölümünde çok büyük kesme kuvvetlerinin oluşmasına sebebiyet vermektedir [196]. Kısa kolon olarak adlandırılan bu etkiler Şekil 7.3'deki gibi birçok depremde gözlenmektedir [197].



Şekil 7. 3. Betonarme binalarda kısa kolon örneği

Binaların yapımında kullanılan malzeme ve imalatın kalitesi ile bakımına gösterilen özen, tamamlanmış bir yapıda görünüşüne yansımaktadır. Bu durum eğitilmiş gözlemciler tarafında kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Yapı kalitesi ile deprem hasarı arasında yakın ilişki olduğu geçmiş depremlerde yapılan incelemelerde belirlenmiştir.

Deprem esnasında bitişik nizam ve farklı yükseklikteki binalarda farklı titreşim periyotları ve uyumlu olmayan titreşim genliklerinin sonucu olarak çarpışma etkisi ortaya çıkmaktadır. Bu etki döşeme seviyelerinin farklı olması durumunda da meydana gelmekte ve çarpışan binalar ağır hasar alabilmektedir. Çarpışan binaların üst katları daha fazla hasar görmekte, farklı yükseklikteki binaların çarpışması ara kat göçmelerine sebebiyet vermektedir.

Topoğrafik büyütme, etrafına göre daha yüksek olan yerlerde (tepelerde) yer hareket şiddetini artıran bir başka faktördür. Genellikle 30 dereceden daha büyük eğimli

yamaçlara yerleşen bina temelleri, üst yapısal elemanlara zemin deformasyonlarını düzgün dağıtmada yetersiz olmakta ve hasarın artmasına sebebiyet vermektedir. [185].

Yerel zemin koşulları binalarda deprem hasarının ve yer hareket parametrelerinin artışında önemli faktörlerdendir. Yerel zemin koşullarını tanımlamada pik yer ivmesi (PGA) ve pik yer hızı (PGV) sıklıkla kullanılmaktadır. Büyük magnitüdü depremlerde PGV zemin koşullarının etkisini daha iyi yansıtmaktadır [198]. Geçmiş depremler bina hasarının PGV ile korelasyonunun yüksek olduğunu göstermiştir. Hız yer hareketinin yüksek frekans içeriğine çok fazla duyarlı olmadığından, yer hareketinin karakteristiğini daha iyi yansıtmaktadır [90].

Sucuoğlu ve Yazgan [185] tarafından önerilen yöntemde öncelikle eğitilmiş gözlemciler tarafından yukarıda sıralanan parametrelerin mevcut olup olmadığı her bina için tespit edilmekte, binanın bulunduğu bölgede olması muhtemel depremde ortaya çıkacak PGV değeri dikkate alınarak bir hız bölgesi belirlenmekte ve bir başlangıç puanı verilmektedir. Hesaplamalarda kullanılan başlangıç puanları ve olumsuzluk puanları Çizelge 7.1'de verilmiştir. Gözlemciler bina incelemesinde belirledikleri olumsuzluk parametresini var/yok şeklinde anket formuna işlemektedirler. Daha sonra gözlemlenen her olumsuzluk parametresi için Çizelge 7.1'de verilen başlangıç puanları azaltılmaktadır. Sonuçta elde edilen deprem performans puanı ne kadar düşükse binanın deprem riskinin o kadar yüksek olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 7. 1. Bina için belirlenen başlangıç ve olumsuzluk puanları [185]

KA	HB I 60<PGV<80	HB II 40<PGV<60	HB III 20<PGV<40	YK	AÇ	GK	KK	ÇE	TE
1	90	125	160	0	-5	-5	-5	0	0
2	90	125	160	0	-5	-5	-5	0	0
3	90	125	160	-10	-10	-10	-5	-2	0
4	80	100	130	-15	-10	-10	-5	-3	-2
5	80	90	115	-15	-15	-15	-5	-3	-2
6	70	80	95	-20	-15	-15	-5	-3	-2
7	70	80	95	-20	-15	-15	-5	-3	-2

KA: Kat adedi

HB: Hız Bölgesi

PGV: Pik yer hızı

YK: Yumuşak kat

AÇ: Ağır çıkma

GK: Görünen kalite

KK: Kısa Kolon

ÇE: Çarpışma etkisi

TE: Topoğrafik etki

Performans puanının hesaplanması Sucuoğlu ve Yazgan [185] tarafından Eşitlik 7.1’de verilen şekilde formüle edilmiştir.

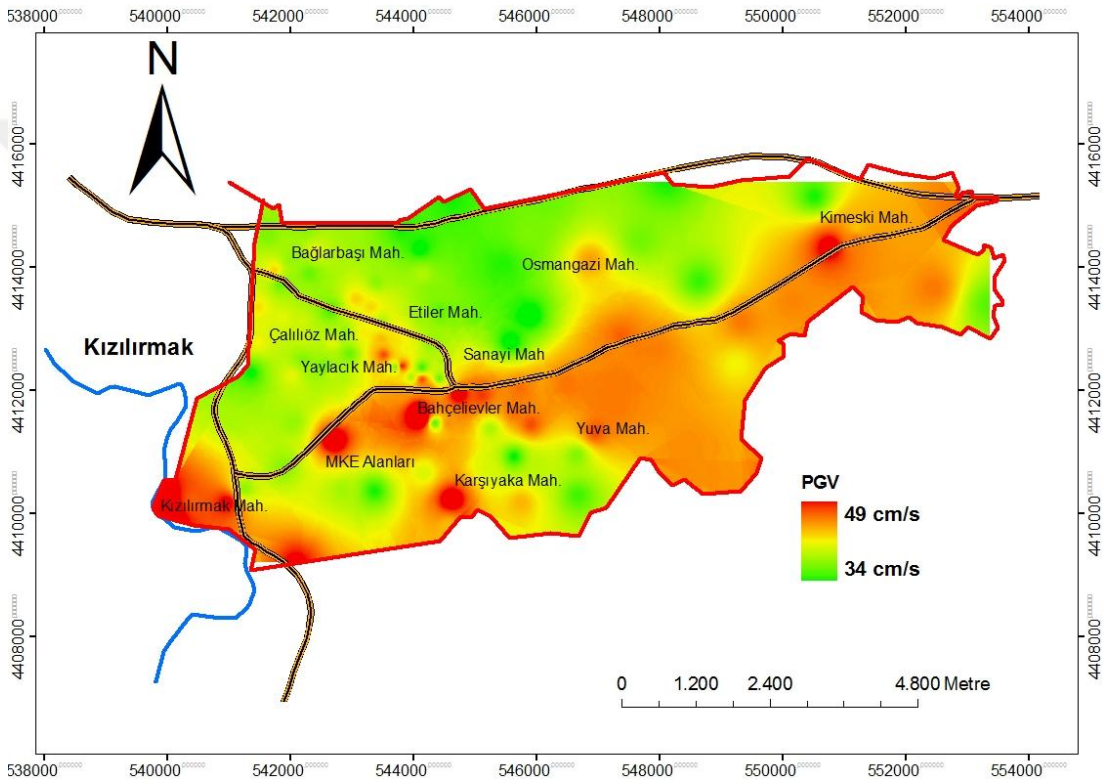
$$\text{Bina performans puanı} = \text{Hız bölgesi puanı} - \sum_1^5 \text{olumsuzluk puanı} \times \text{olumsuzluk parametresi} \quad (7.1)$$

7.2. Kırıkkale için Deprem Riskinin Sokaktan Hızlı Tarama Yöntemi ile Belirlenmesi

Bu çalışmada Sucuoğlu ve Yazgan [185] tarafından önerilen ve “ODTÜ yöntemi” olarak bilinen metot kullanılarak, Kırıkkale yapı stoğunun hasar görülebilirliği sokaktan hızlı değerlendirme yöntemi ile incelenmiştir. Önerilen yöntemde 1-7 katlı mevcut betonarme binalar sokaktan gözlenebilen yapı parametreleri kullanılarak bir risk değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Kırıkkale yapı stoğunda yaklaşık olarak 27000

bina bulunmaktadır. Bu çalışmada Kırıkkale’de 2074 adet betonarme bina eğitilmiş gözlemciler tarafından incelenmiş ve sonuçları verilmiştir.

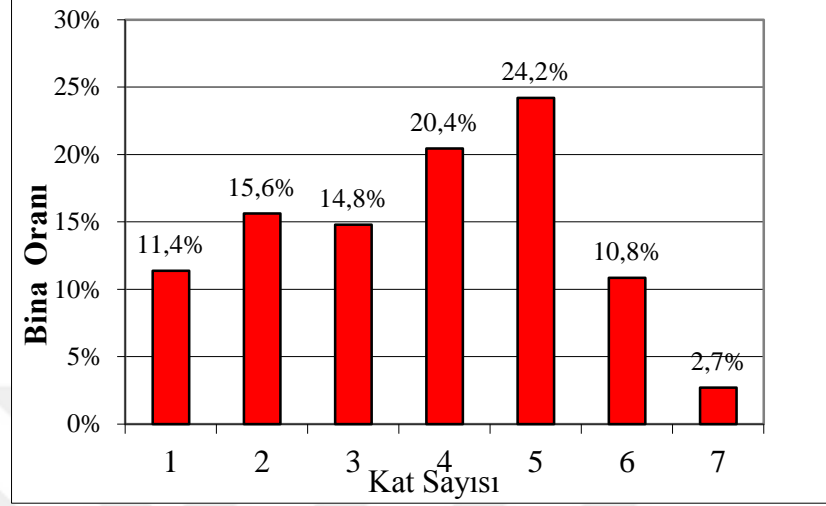
Kırıkkale için Bölüm 6’da açıklanan yer tepki analizlerinden elde edilen pik yer hızı (PGV) dağılımı Şekil 7.4’de verilmiştir. Analizlerde PGV değerleri 34 cm/s ile 49 cm/s arasında değişmektedir. Özellikle MKE alanları, Kızılırmak, Bahçelievler, Yuva ve Kimeski mahallelerinde PGV değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 7. 4. Kırıkkale’de PGV’nin dağılımı

Bu çalışmada zemin davranış analizlerinden elde edilen PGV değerleri dikkate alınarak Kırıkkale için başlangıç deprem performans puanının hesaplanmasında $40 < PGV < 60$ değerleri arasında yer alan II. hız bölgesi seçilmiştir. Kırıkkale’de sokaktan hızlı tarama yöntemi ile incelenen 2074 adet binanın kat sayılarına göre toplam bina sayısı

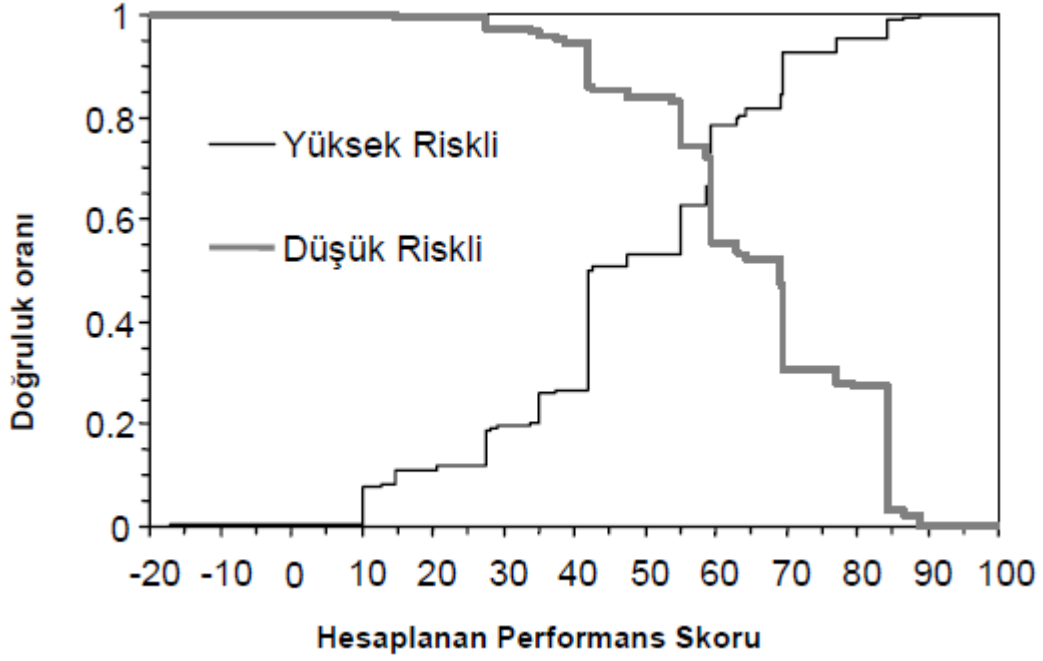
içindeki oranları Şekil 7.5’de verilmiştir. Kırıkkale’de gözlemlenen binaların ağırlıklı olarak 4 ve 5 katlı binalardan oluştuğu görülmektedir.



Şekil 7. 5. Kırıkkale’de gözlemlenen binaların kat sayılarına göre dağılımı

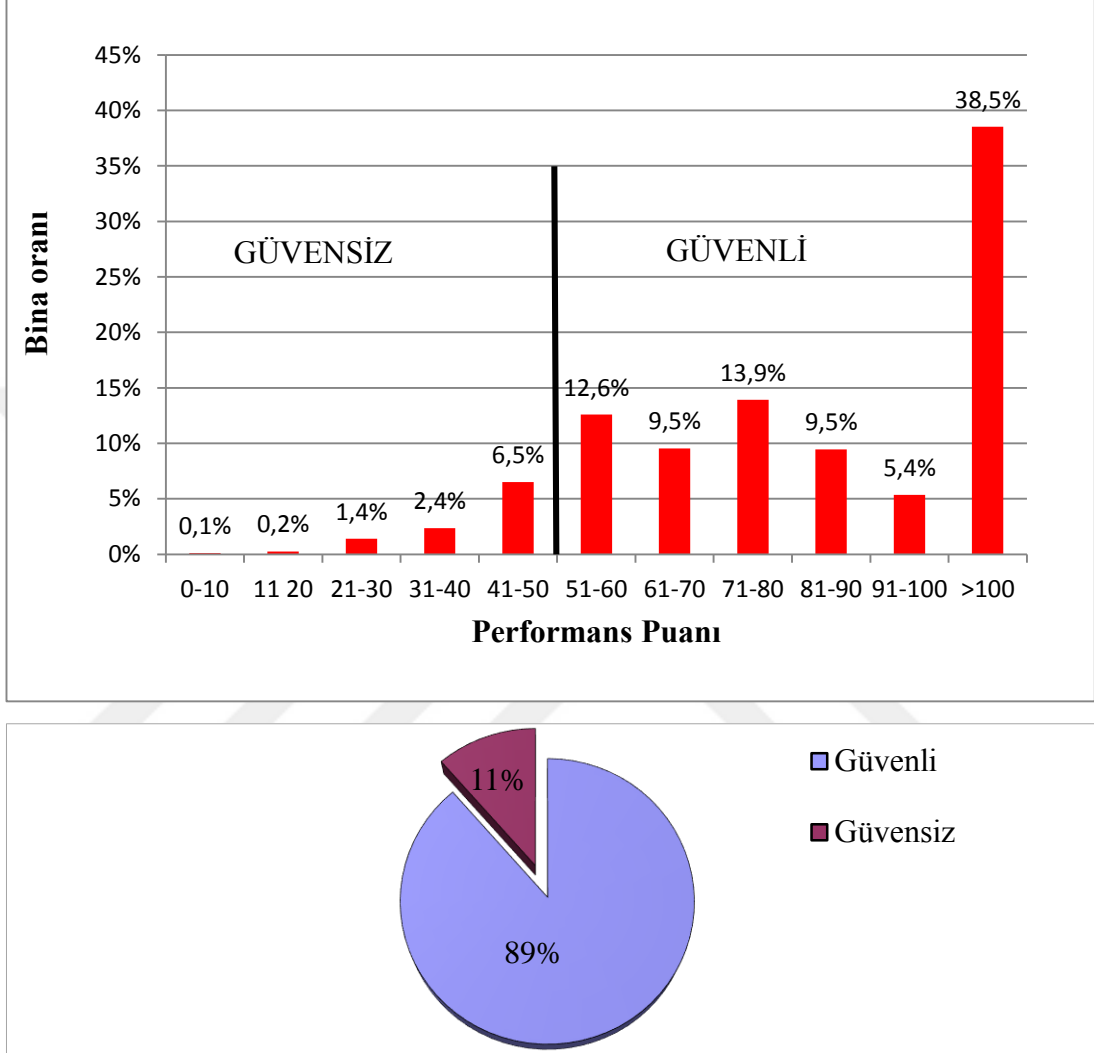
Güvenli (düşük riskli) ve güvensiz (yüksek riskli) binaların ayırt edilmesinde sınır performans puan değeri Yazgan ve Sucuoğlu [185] tarafından yapılan çalışmada 50 puan olarak belirlenmiştir. Sucuoğlu [195] tarafından Düzce veri tabanı kullanılarak deprem sonrası gözlemlere ve hesaplanan performans puanına göre yapılan bir başka çalışmada, doğruluk oranının hesaplanan performans puanı ile değişimi güvenli ve güvensiz binalar için Şekil 7.6’da verilmiştir.

Yapılan çalışmada iki eğrinin kesişim noktası olarak hesaplanan performans puanının 60 sınır değer olarak kabul edilmesi durumunda hesaplanan performans puanı 60’dan küçük olan binaların %75’i güvensiz olarak; 60’dan büyük olan binaların da %75’i güvenli olarak doğru sınıflanmış olmaktadır. Bu durumda sınır değerinin 60’dan düşük seçilmesi güvenli binaları daha doğru sınıflamak için, 60’dan yüksek seçilmesi ise güvensiz binaları daha doğru sınıflamak için uygun olduğu belirtilmektedir.

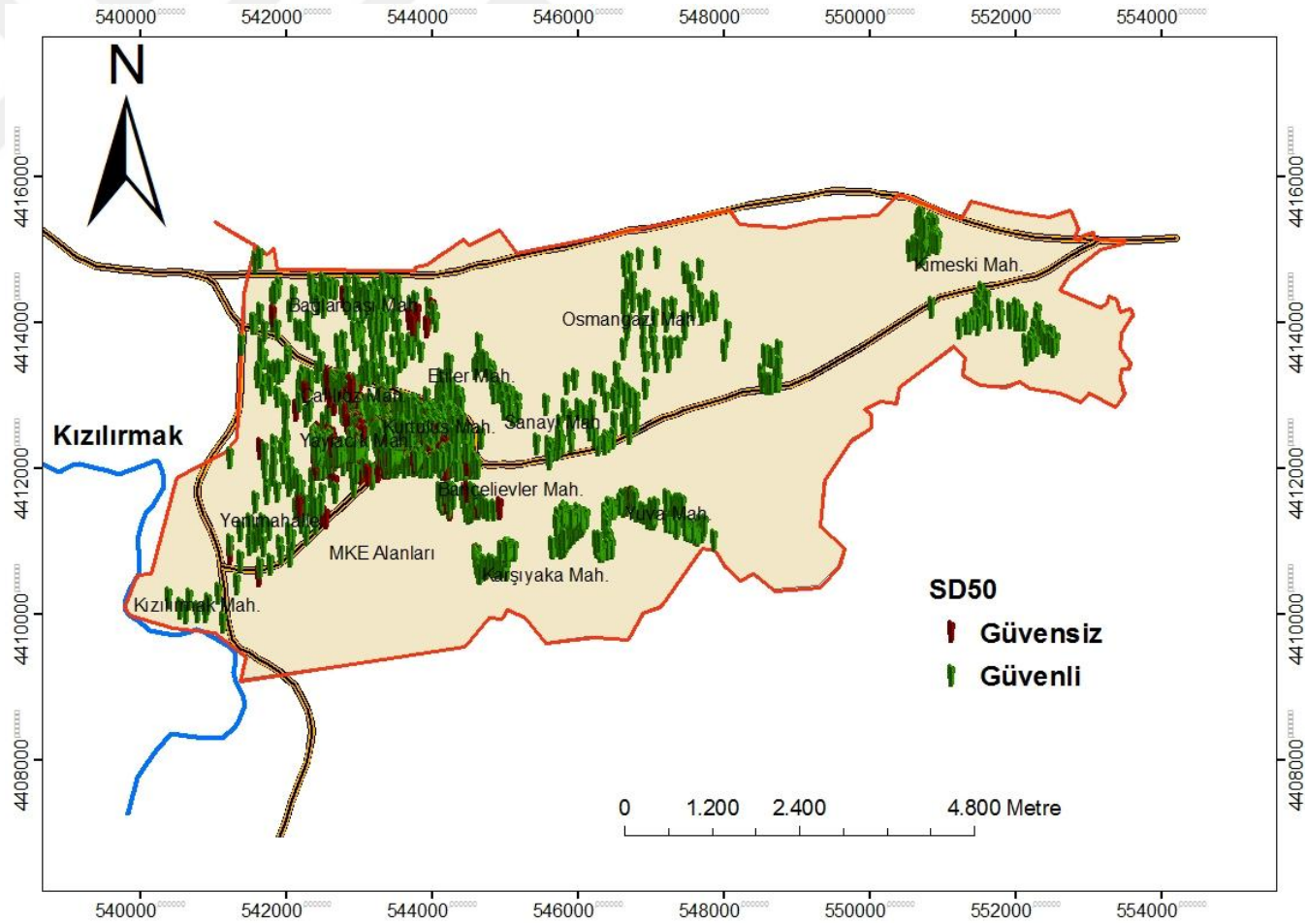


Şekil 7. 6. Düşük ve yüksek riskli binalar için doğruluk oranının hesaplanan performans skoru ile değişimi [195]

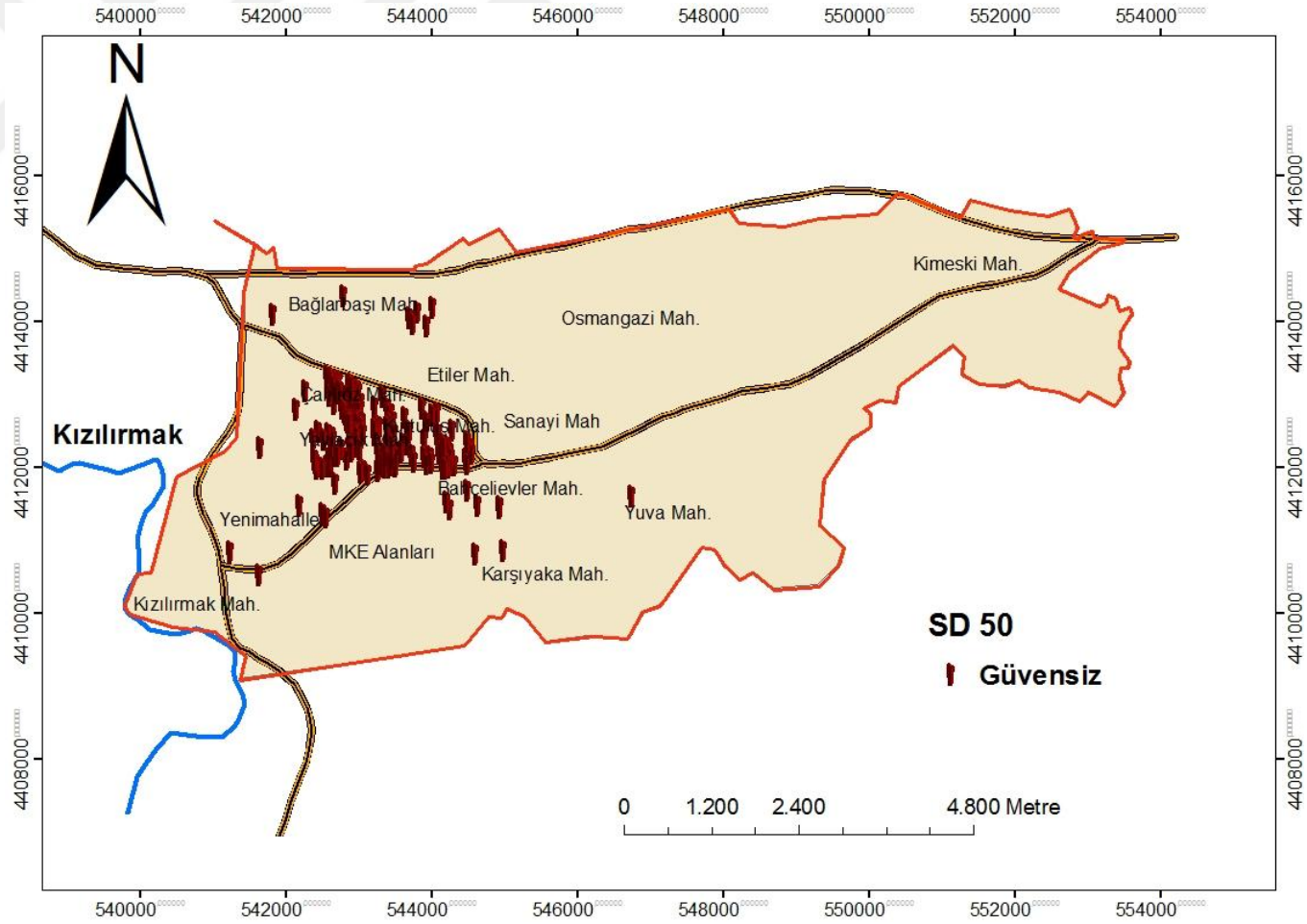
Bu çalışmada güvenli (düşük riskli) ve güvensiz (yüksek riskli) binaların ayırt edilmesinde sınır performans puan değeri (SD) olarak, Sucuoğlu tarafından yapılan çalışmalar da dikkate alınarak hem 50 hem de 60 puan değerleri göz önüne alınmıştır. SD 50'ye göre bina oranlarının performans puanlarına göre dağılımları Şekil 7.7'de; çalışma alanına göre güvenli ve güvensiz binaların haritası ise Şekil 7.8'de, sadece güvensiz binaların haritası ise Şekil 7.9'da verilmiştir.



Şekil 7. 7. Sınır değer 50'ye göre Kırıkkale'de gözlemlenen binaların performans puanı dağılımı ve güvenli ve güvensiz bina oranları

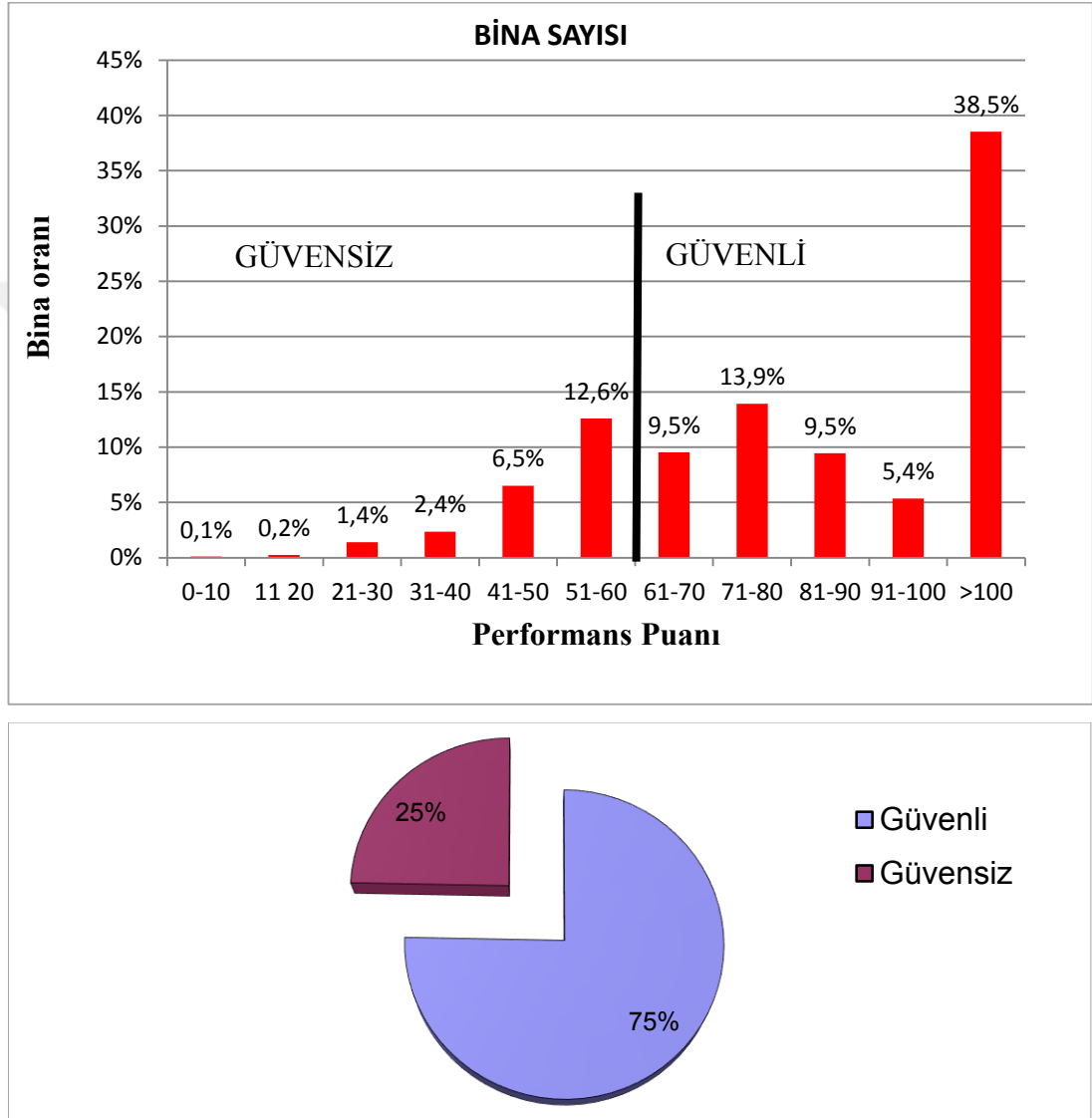


Şekil 7. 8. Sınır değer 50'ye göre güvenli ve güvensiz binaların haritası

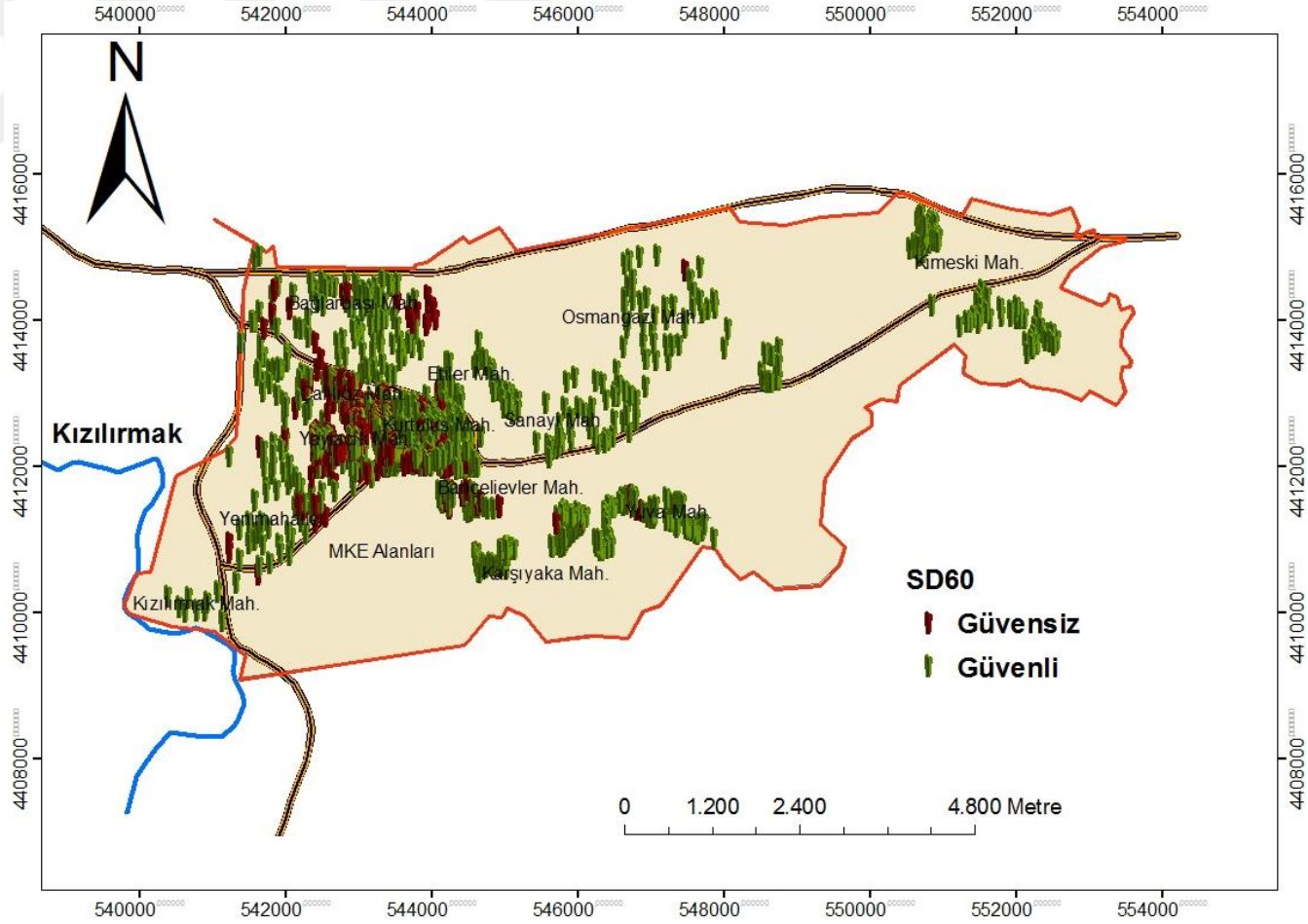


Şekil 7. 9. Sınır değer 50'ye göre güvensiz binaların haritası

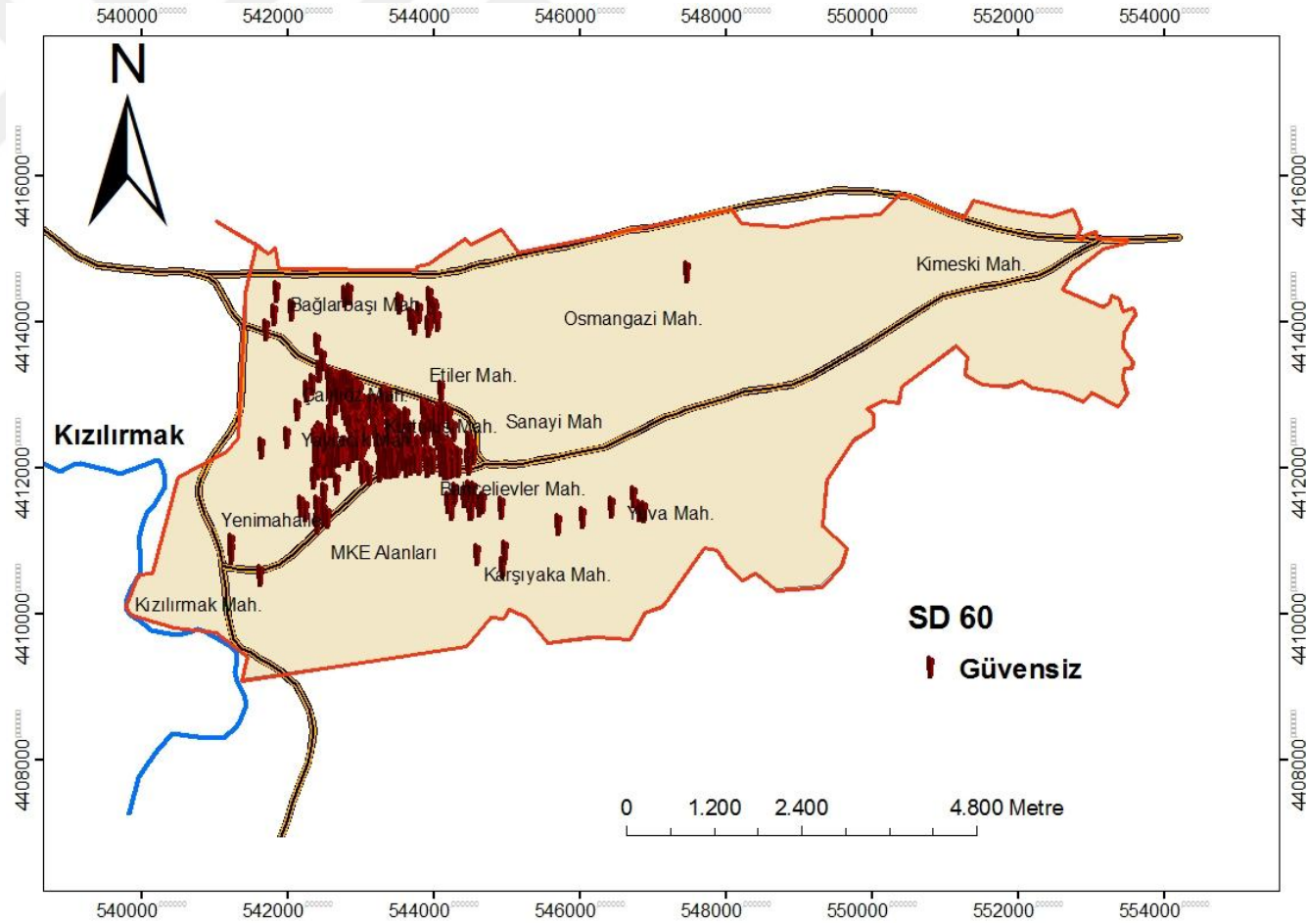
SD 60'a göre bina oranlarının performans puanlarına göre dağılımları Şekil 7.10'da çalışma alanına göre güvenli ve güvensiz binaların haritası Şekil 7.11'de sadece güvensiz binaların haritası ise Şekil 7.12'de verilmiştir.



Şekil 7. 10. Sınır değer 60'a göre Kırıkkale'de gözlemlenen binaların performans puanı dağılımı ve güvenli ve güvensiz bina oranları



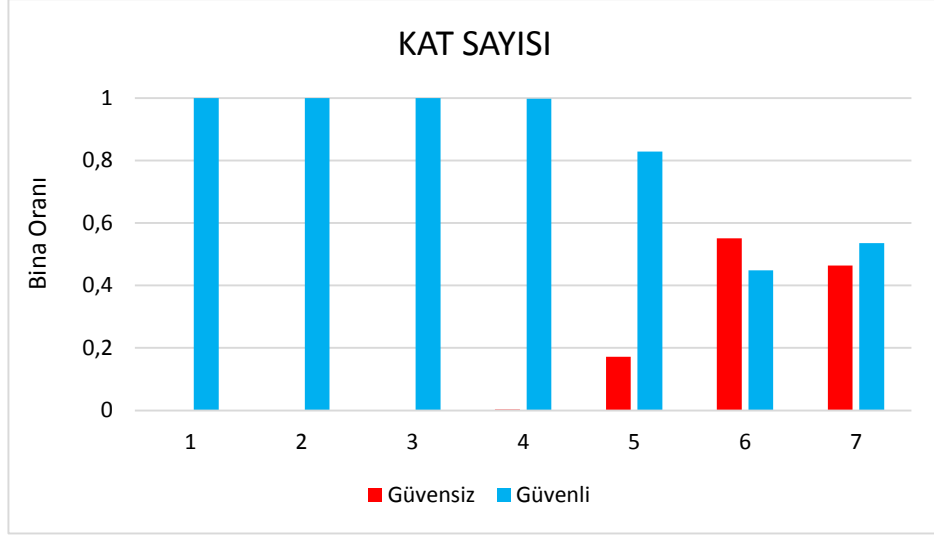
Şekil 7. 11. Sınır değeri 60'a göre güvenli ve güvensiz binaların haritası



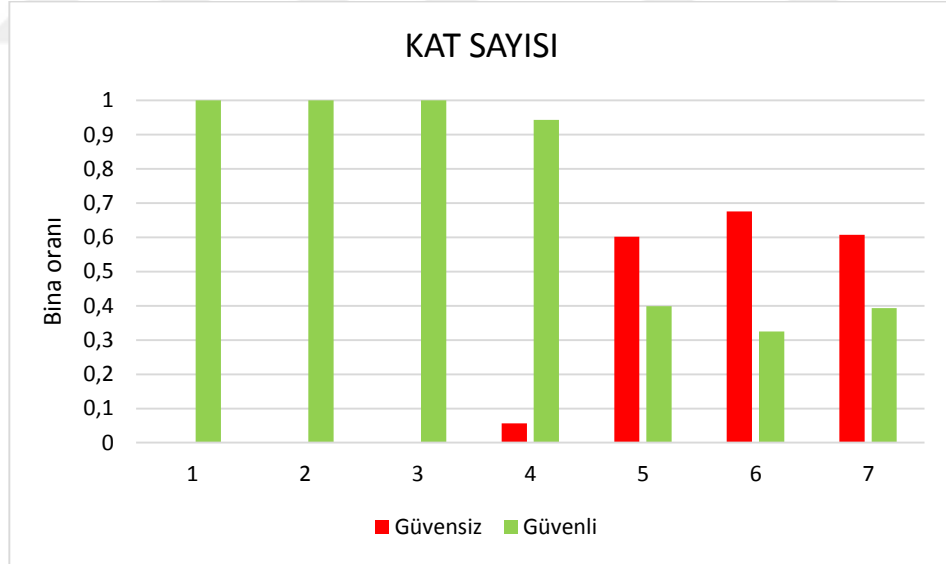
Şekil 7. 12. Sınır değeri 60'a göre güvensiz binaların haritası

Kırıkkale’de güvenli (düşük riskli) ve güvensiz (yüksek riskli) bina oranları sınır değerin (SD) 50 olması durumunda % 11 güvensiz, % 89 güvenli; SD’nin 60 olması durumunda % 25 güvensiz, % 75 güvenli olarak belirlenmiştir. Sucuoğlu [195] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 1999 Düzce depreminde yıkılan ve ağır hasar gören binaların oranı % 20 olduğu, benzer sonuçların 1999 İzmit depremi sonucunda Gölcük ve Adapazarı’nda da gözlemlendiği belirtilmiştir. Düzce gibi bir Anadolu şehri olan Kırıkkale’nin şehir merkezinin de benzer yapı stoğuna sahip olduğu düşünüldüğünde; analiz sonuçlarından elde edilen % 11-25 güvensiz bina oranlarının Düzce depremi sonucunda yıkılan ve ağır hasar gören bina oranları ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

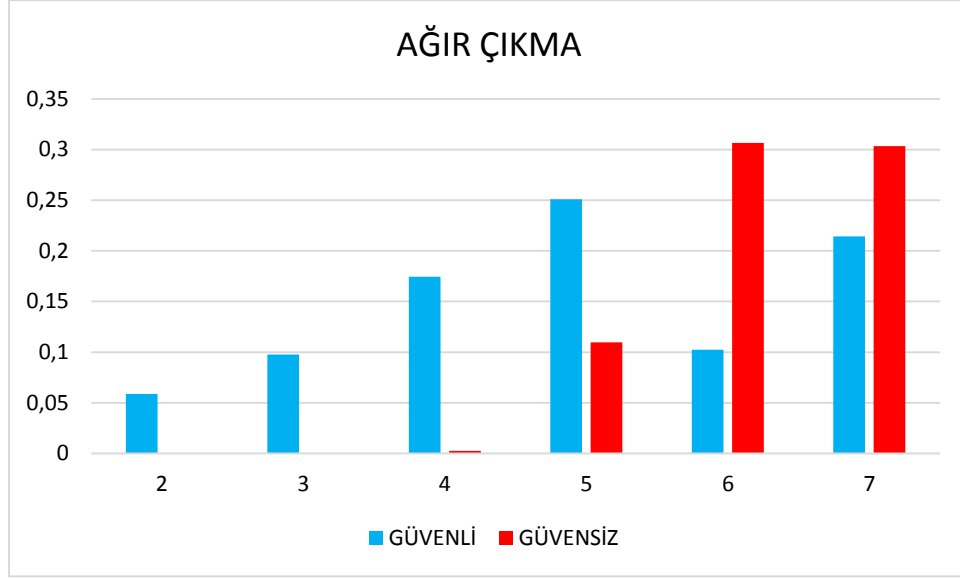
Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’de katsayılarına göre tüm yapıların güvenli ve güvensiz bina oranları verilmiştir. Şekil 7.15 ve Şekil 7.16’da katsayısına göre ağır çıkmalı, Şekil 7.17 ve Şekil 7.18’de katsayısına göre yumuşak katlı ve Şekil 7.19 ve Şekil 7.20’de katsayısına göre kısa kolonlu güvenli ve güvensiz bina oranları verilmiştir. Şekil 7.21 ve 7.22’de ise kat sayısına göre görünen kalitenin güvenli ve güvensiz binalar üzerindeki etkileri görülmektedir.



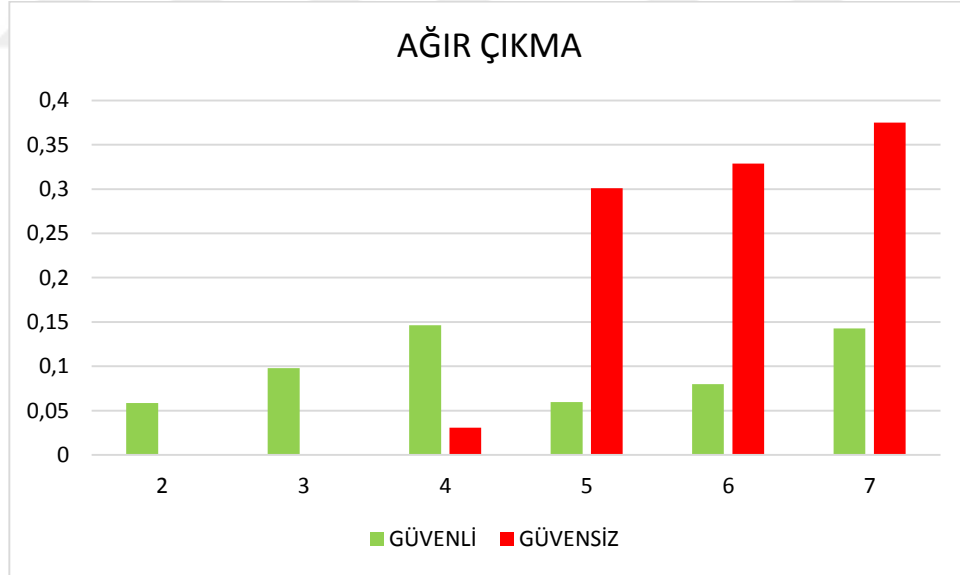
Şekil 7. 13. Katsayılarına göre güvenli güvensiz bina oranları (SD=50)



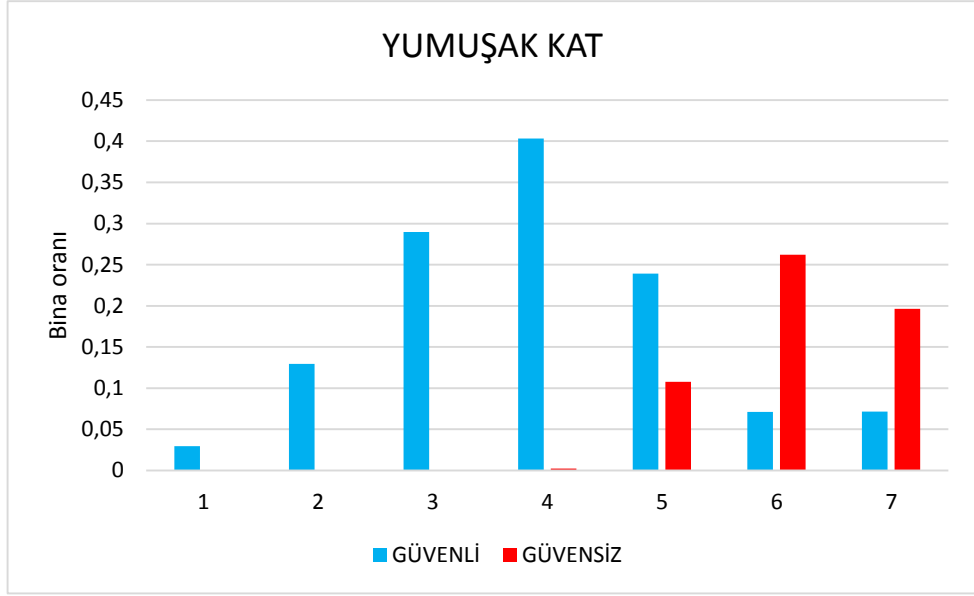
Şekil 7. 14. Katsayılarına göre güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=60)



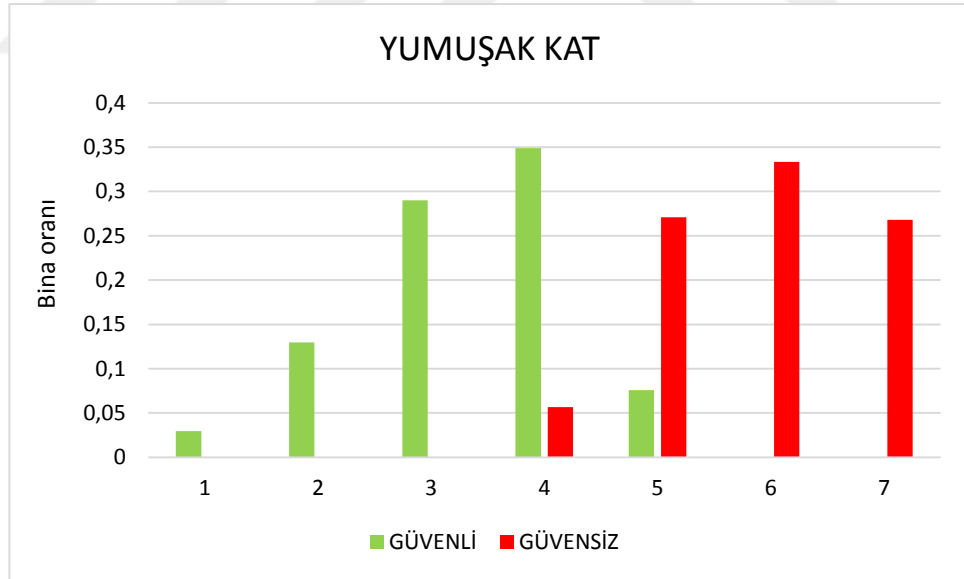
Şekil 7. 15. Ağır çıkmalı güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=50)



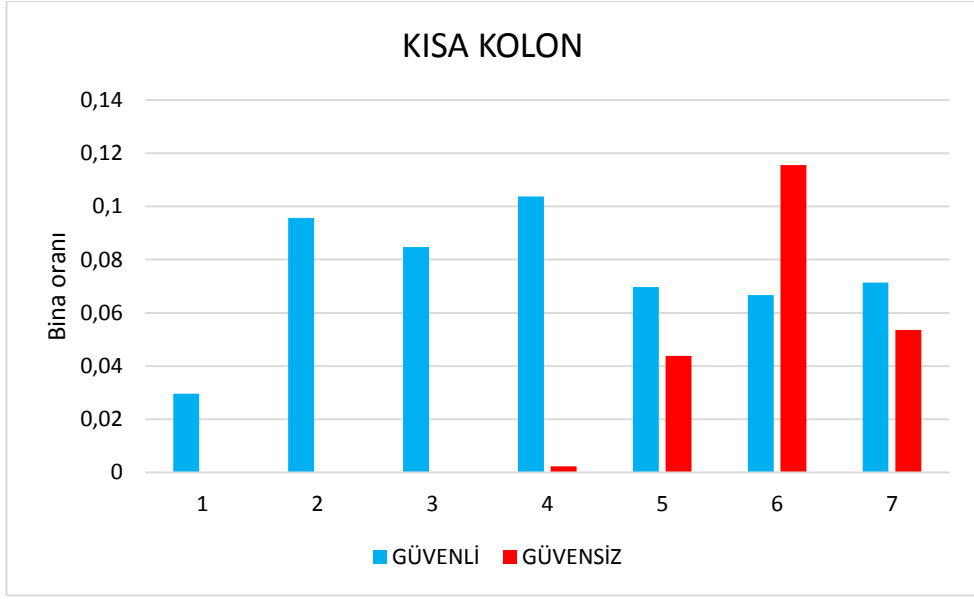
Şekil 7. 16. Ağır çıkmalı güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=60)



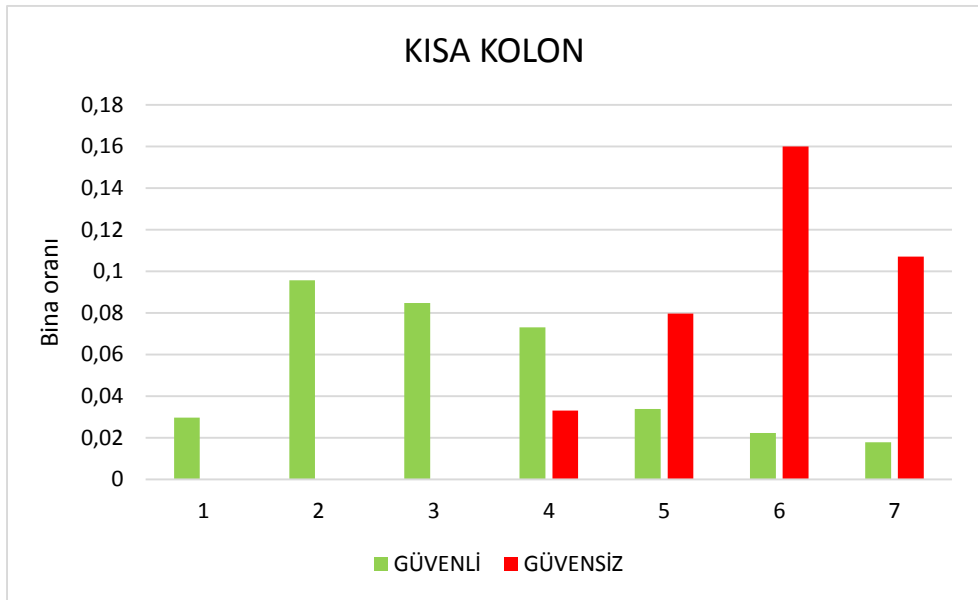
Şekil 7. 17. Yumuşak katlı, güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=50)



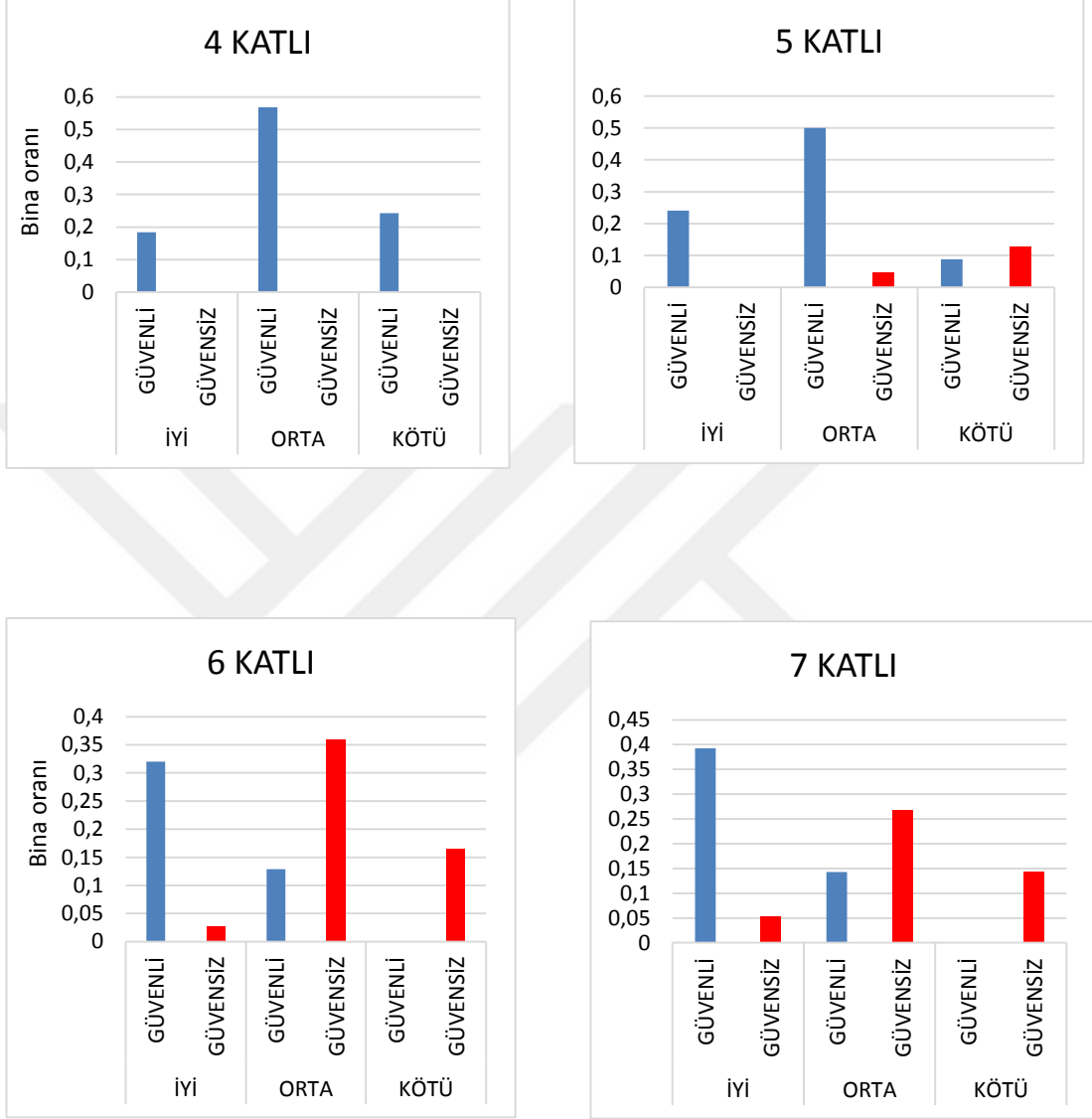
Şekil 7. 18. Yumuşak katlı, güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=60)



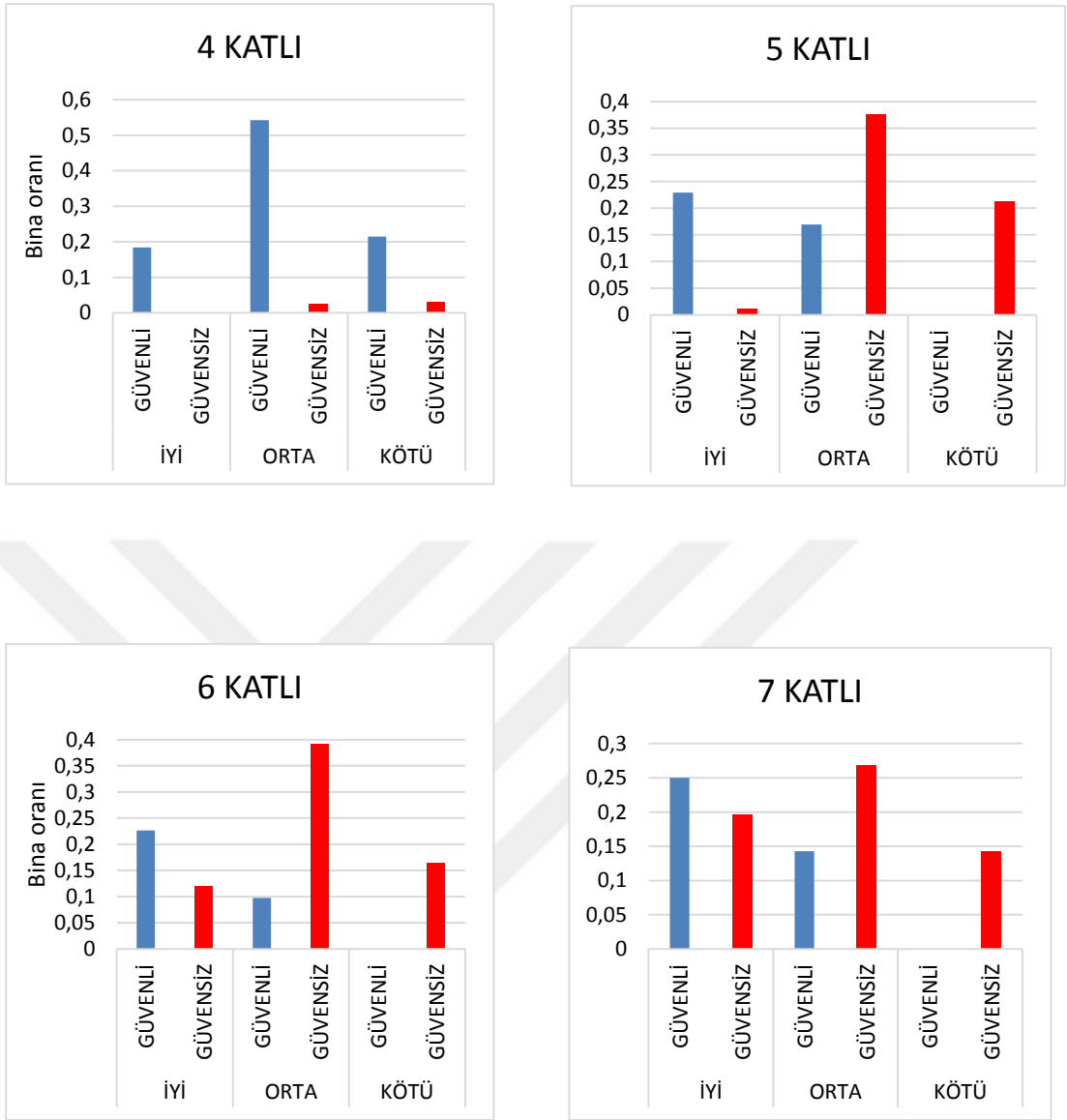
Şekil 7. 19. Kısa kolonlu, güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=50)



Şekil 7. 20. Kısa kolonlu, güvenli ve güvensiz bina oranları (SD=60)



Şekil 7. 21. Görünen kalitenin güvenli ve güvensiz binalar üzerindeki etkisi (SD=50)



Şekil 7. 22. Görünen kalitenin güvenli ve güvensiz binalar üzerindeki etkisi (SD=60)

Sokaktan tarama yöntemleri, kentsel yerleşim alanlarında deprem esnasında hasar görme riski yüksek olan binaların göreceli olarak tespit edilmesini ve daha detaylı inceleme yöntemleriyle araştırılmasını amaçlamaktadır. Bu çalışmada, sokaktan tarama yöntemine göre elde edilen sonuçlara bakıldığında, artan kat sayısı ile beraber yüksek riskli (güvensiz) bina oranlarının arttığı, düşük riskli (güvenli) bina oranlarının ise azaldığı, katsayısı-risk arasında yüksek bir korelasyonun olduğu görülmektedir.

Ağır ıkmalđ, yumuşak katlı ve kısa kolonlu binalarda da benzer şekilde kat sayısı arttıķa güvenli bina oranları azalırken güvensiz bina oranları artmaktadır. Ancak ağır ıkmalđ ve kısa kolonlu binalara göre yumuşak katlı binalarda, artan kat sayısı ile güvenli ve güvensiz bina oranları arasında daha yüksek korelasyonun olduğu görülmektedir. Kat adedi arttıķa görünen yapı kalitesinin hasar üzerindeki etkisi artmaktadır. Eğer bir bina yüksek katlı ve kötü kaliteli ise hasar görme riskinin yüksek olduğu görülmektedir.



8. KIRIKKALE YAPI STOĞUNDAKİ TİPİK BİNALARIN ZAMANA BAĞLI DOĞRUSAL ELASTİK ANALİZİ

Yapıların, deprem kuvvetleri altında zemin özelliklerini dikkate alarak, yapısal davranışlarının gerçeğe yakın olarak yansıtılması zor bir problemdir [199, 200]. Analizlerde yapılan kabuller ve dikkate alınmayan parametreler zemin yapı etkileşiminin doğru değerlendirilmesini güçleştirmektedir [201]. Ancak, günümüzde depremlerin yapılar üzerindeki etkilerini değerlendirmek için geliştirilmiş analiz yöntemleri bu hesaplamaları nispeten kolaylaştırmaktadır. Bu yöntemler dinamik ve statik esaslı hesap yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır. En sık kullanılan yöntemler;

- Eşdeğer deprem yükü yöntemi
- Mod birleştirme yöntemi
- Zaman tanım alanında
 - Doğrusal elastik yöntemler
 - Doğrusal elastik olmayan yöntemler

olarak söylenebilir. Yapıların deprem performansının değerlendirilmesinde, zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan dinamik yöntemler, en iyi analiz yöntemleri olarak kabul edilmesine rağmen, yöntemin karmaşıklığı analizlerin uzun sürmesi ve elde edilen sonuçların yorumlanmasındaki güçlükler nedeniyle, doğrusal olmayan yöntemlerin yerine doğrusal elastik yöntemler tercih edilebilmektedir. Doğrusal elastik değerlendirme yönteminde her yapısal eleman için dikkate alınan Etki/Kapasite oranı r katsayısı ile doğrusal olmayan davranış sonucu ortaya çıkacak yatay yük kapasite artışı dikkate alınmaktadır. Bir diğer ifade ile yöntemin matematiksel ifadesi doğrusal olmakla beraber, doğrusal elastik yöntemde de, yapısal sistemin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmaktadır [202]. Doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerin esasları ATC40 [203], FEMA273 [204], FEMA356 [205] ve FEMA440'da [206] tanımlanmıştır. ATC40 sadece betonarme binaların doğrusal olmayan değerlendirme yöntemlerinin esaslarını tanımlarken, FEMA356 hem

doğrusal hem de doğrusal olmayan değerlendirme yöntemlerinin esaslarını tanımlamaktadır.

DBYBHY (2007) [168]'de mevcut binaların doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan değerlendirme yöntemleri mevcuttur. Son yıllarda teknolojiye ve yapısal analizlerde sağlanan gelişmelerle beraber, zaman tanım alanında doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan analiz yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu analizlerin gerçekleştirilmesinde en önemli konu, kullanılacak uygun deprem kayıtlarının seçilmesi ve bunların ölçeklenmesidir.

Bu çalışma kapsamında, Kırıkkale ili'nde inşa edilmiş olan üç gerçek yapı üzerinde zaman tanım alanında doğrusal elastik analizler gerçekleştirilmiştir. SAP 2000 [207] yapı analizi programında gerçekleştirilen bu analizlerde, üç gerçek deprem kaydı kullanılmıştır. Analizlerden taban kesme kuvveti, tepe deplasmanı, devrilme momenti ve görel kat ötelemesi değerleri zamana bağlı olarak elde edilmiş ve sonuçları yorumlanmıştır. Çalışma alanı yapı stoğunda bulunan mevcut yapıların örnek resimleri Şekil 8.1-8.8 'de verilmiştir.



Şekil 8. 1. Kırıkkale'de mevcut yapılar



Şekil 8. 2. Kırıkkale’de mevcut yapılar



Şekil 8. 3. Kırıkkale’de mevcut yapılar



Şekil 8. 4. Kırıkkale’de mevcut yapılar



Şekil 8. 5. Kırıkkale’de mevcut yapılar



Şekil 8. 6. Kırıkkale’de mevcut yapılar



Şekil 8. 7. Kırıkkale’de mevcut yapılar

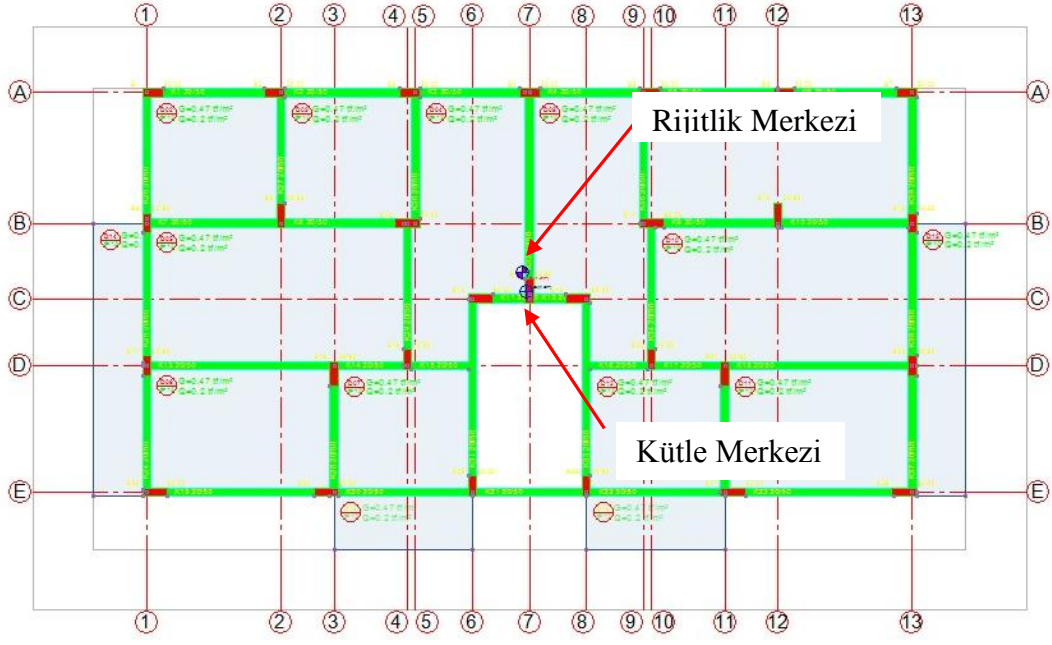


Şekil 8. 8. Kırıkkale’de mevcut yapılar

Analizi yapılacak 3 adet binanın tespitinde mümkün olduğu kadar yapı stoğunu temsil eden ve çalışma alanında yaygın olarak görülen binalar seçilmiştir. Model 1 19 m × 10 m kat planı ölçülerine sahip 5 katlı, Model 2 11 m × 11 m kat planı ölçülerine sahip 3 katlı ve Model 3 18 m × 12 m kat planı ölçülerine sahip 5 katlı binalardan oluşmaktadır. Seçilen binaların resimleri ve kat planları Şekil 8.9-8.15’de verilmiştir.



Şekil 8. 9. Model 1'in resimleri



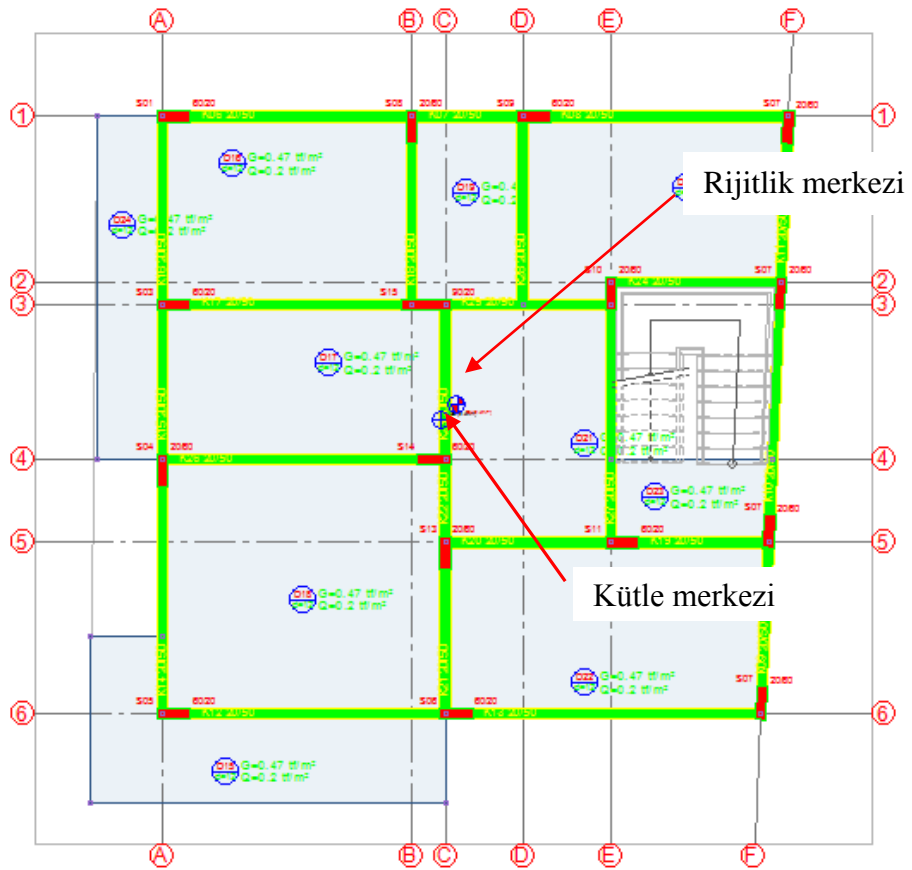
Şekil 8. 10. Model 1'in kat planı



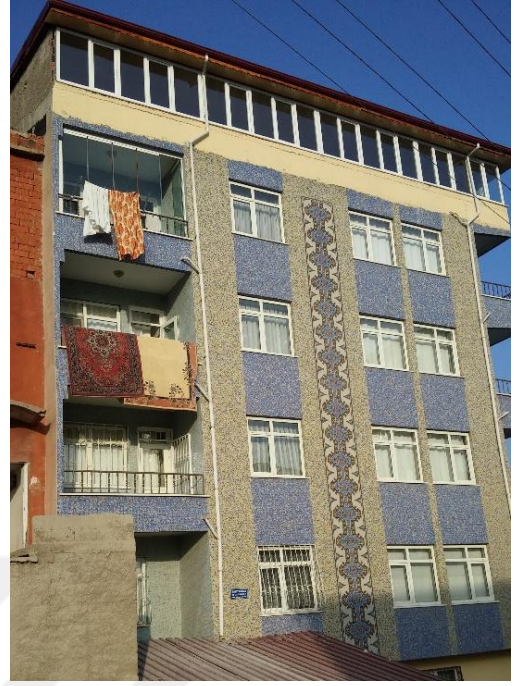
Şekil 8. 11. Model 2'nin resimleri



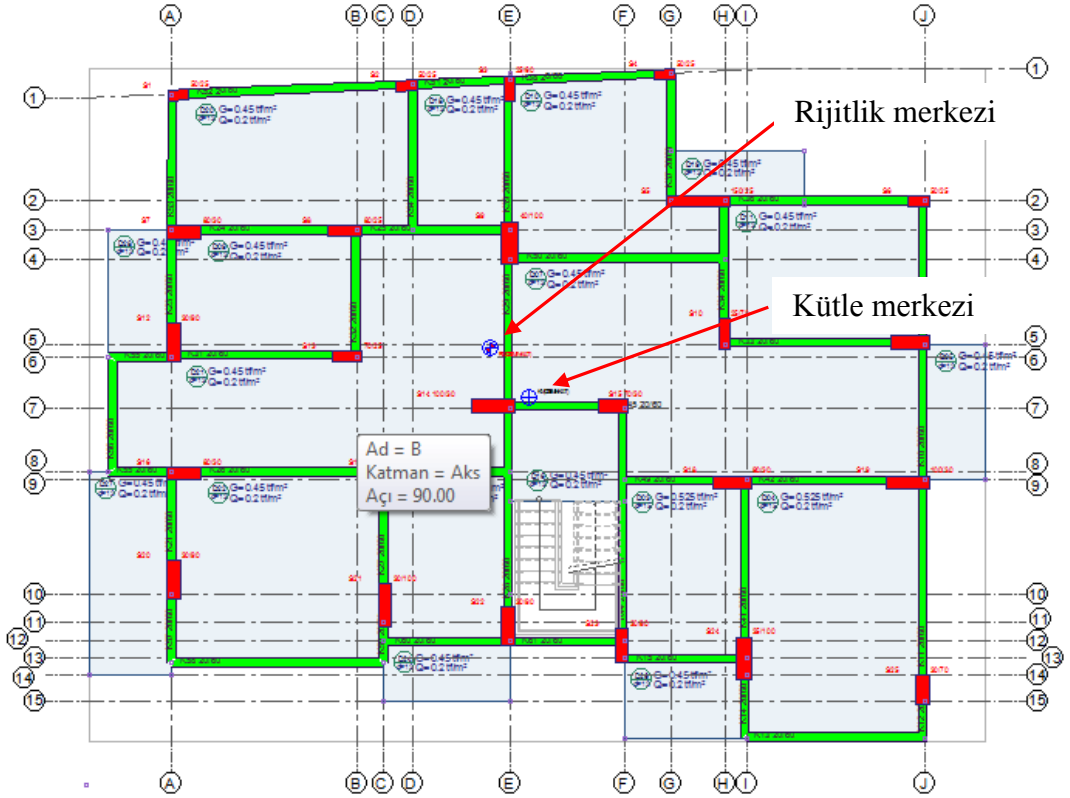
Şekil 8. 12. Model 2'nin resimleri



Şekil 8. 13. Model 2'nin kat planı



Şekil 8. 14. Model 3'ün resimleri



Şekil 8. 15. Model 3'ün kat planı

DBYBHY (2007) [168]'de zaman tanım alanında doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yapısal analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının taşınması gereken özellikler belirlenmiştir. Bunlar;

- Kullanılacak deprem kaydının kuvvetli yer hareketi kısmının süresi, binanın birinci doğal titreşim periyodunun 5 katından ve 15 saniyeden daha kısa olmayacaktır.
- Kullanılacak deprem yer hareketinin sıfır periyoda karşı gelen spektral ivme değerlerinin ortalaması A_0 g'den daha küçük olmayacaktır.
- Kullanılacak ivme kaydına göre % 5 sönüm oranı için yeniden bulunacak spektral ivme değerlerinin ortalaması, gözönüne alınan deprem doğrultusundaki birinci (hakim) periyot T_1 'e göre $0.2T_1$ ile $2T_1$ arasındaki

periyotlar için, yönetmelikte tanımlanan elastik spektral ivme değerlerinin %90'ından daha az olmayacaktır.

- Zaman tanım alanında doğrusal veya doğrusal olmayan hesapta, üç yer hareketi kullanılması durumunda sonuçların maksimumu, en az yedi yer hareketi kullanılması durumunda ise sonuçların ortalaması tasarım için esas alınacaktır.

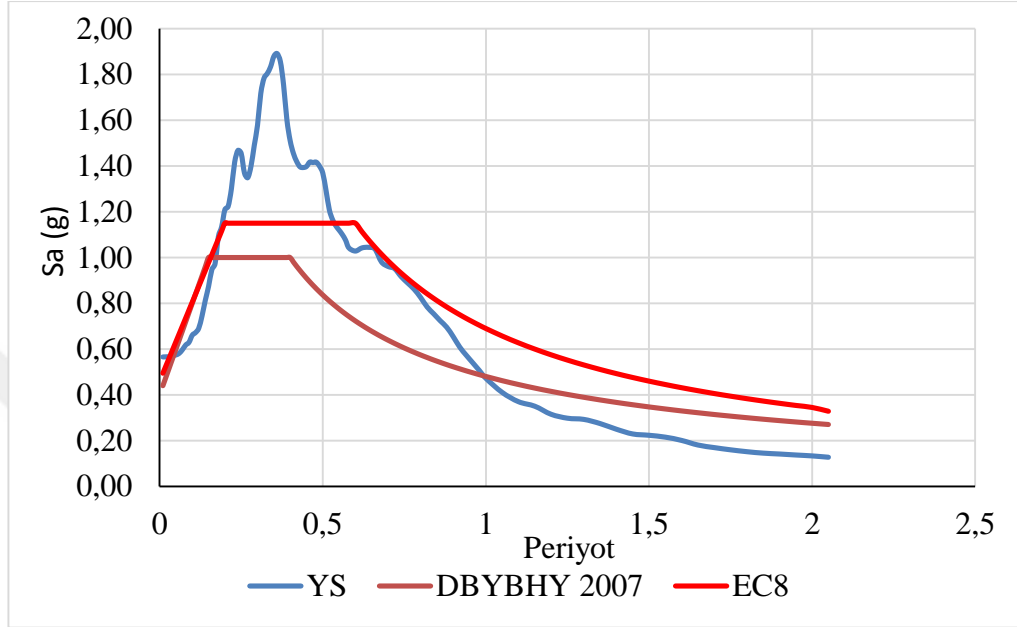
Yukarıdaki özellikleri taşıyan deprem kayıtları, zemin sınıflarına göre Fahjan [208] tarafından yapılan çalışmada belirlenmiştir. Kırıkkale'de zemin sınıfının yaygın olarak Z2 olması sebebiyle, Fahjan tarafından Z2 zemin sınıfı için belirlenen kayıtlardan üç tanesi kullanılarak SAP2000 programında zaman tanım alanında doğrusal elastik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8. 1. Yapısal analizlerde kullanılan deprem kayıtları

Deprem	İstasyon	Faya Mesafe (km)	Kayıt süresi (s)	Anlamlı süre (s)	Fay Mekanizması
Imperial Valley	El Centro Array	18,2	39	19,1	Doğrultu Atımlı
Imperial Valley	Brawley Airport	8,5	37,8	14	Doğrultu Atımlı
Imperial Valley	Calipatria Fire Sta.	23,8	39,5	23,3	Doğrultu Atımlı

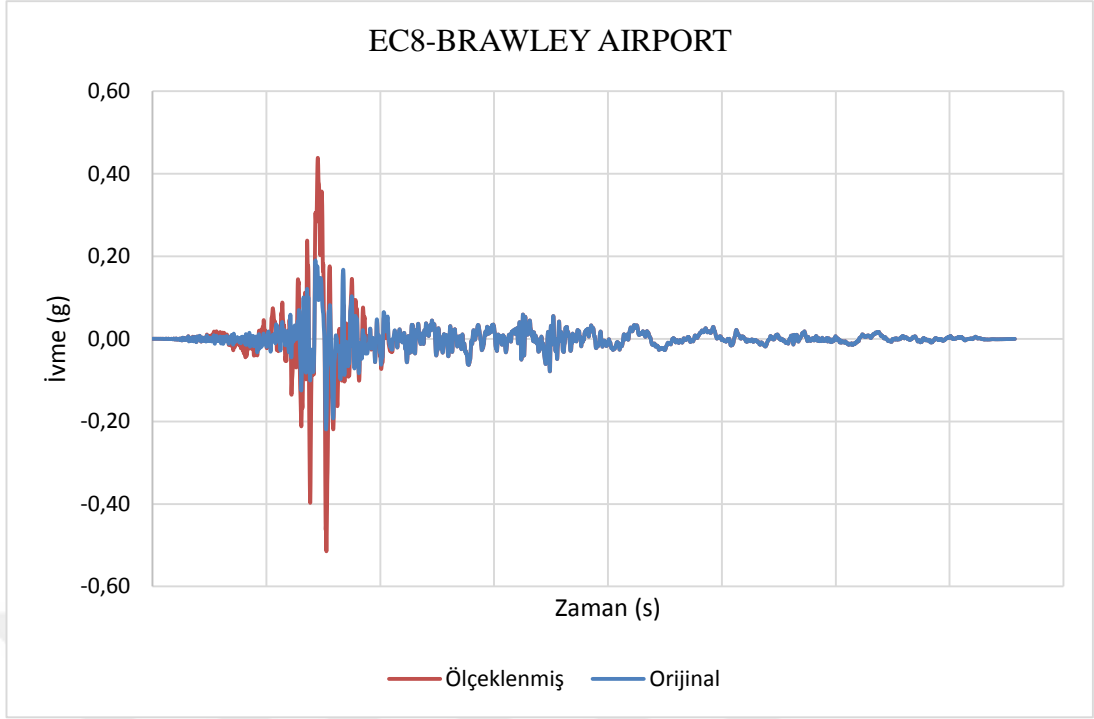
Yapısal analizlerde kullanılan deprem kayıtları, Şekil 8.16'da görülen Eurocode 8 (EC8), Türkiye deprem yönetmeliği (DBYBHY 2007) ve Kırıkkale için farklı deprem kayıtları kullanılarak yapılan zemin davranış analizlerinden sağlanan spektrumların ortalama spektrumuna (YS); zaman tanım alanında spektral eşleştirme yöntemi kullanılarak SEISMOMATCH [209] programında ölçeklenmiştir. Bu program,

Abrahamson (1992) ve Hancock vd. (2006) tarafından önerilen dalgacık algoritmasını kullanarak, deprem akselogramlarını, belirli bir hedef spektrumla eşleştirme özelliğine sahip olan bir uygulamadır.

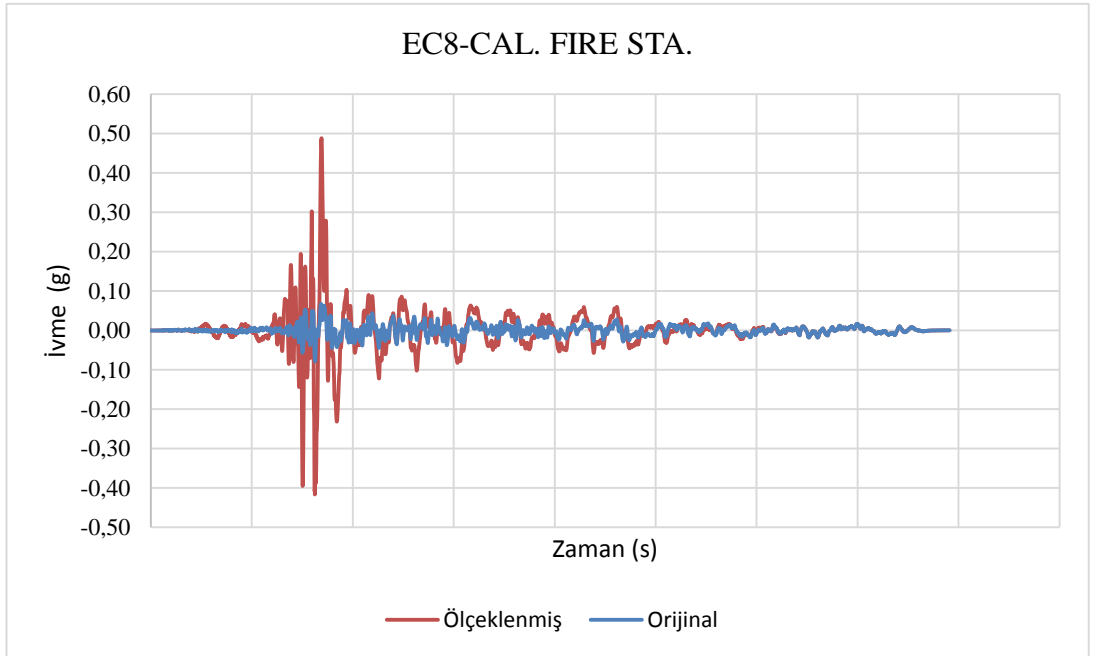


Şekil 8. 16. EC8, DBYBHY 2007 ve YS grafikleri

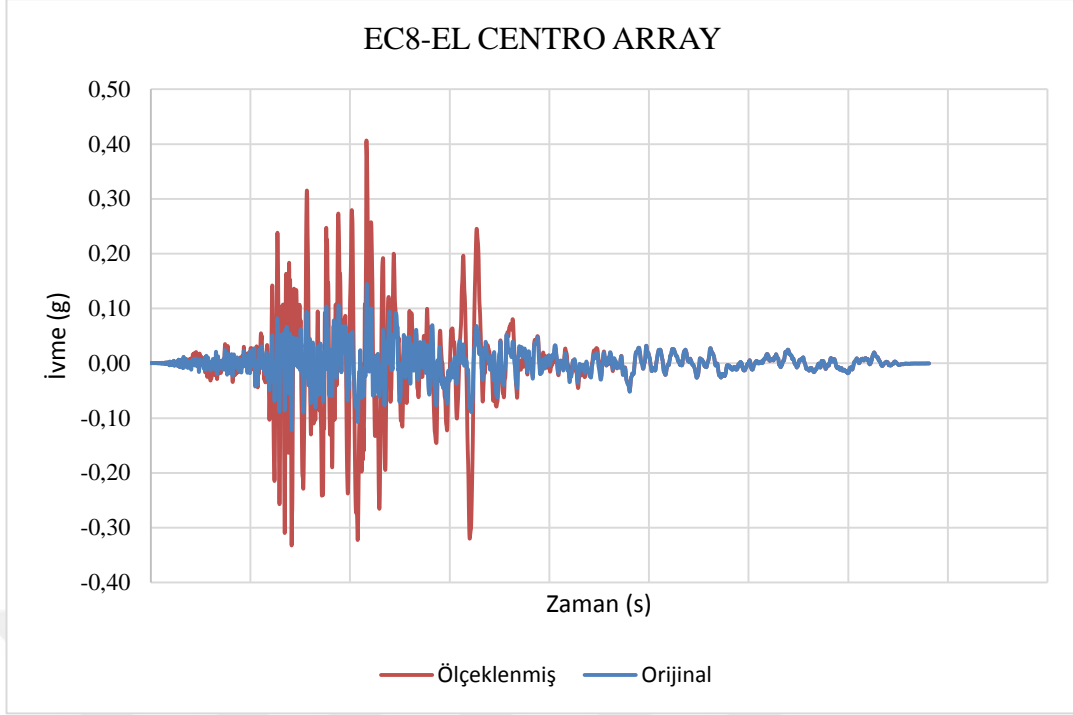
Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının orijinal ve EC 8, DBYBHY 2007 ve YS'a ölçeklenmiş ivme zaman grafikleri Şekil 8.17-8.25'de verilmiştir.



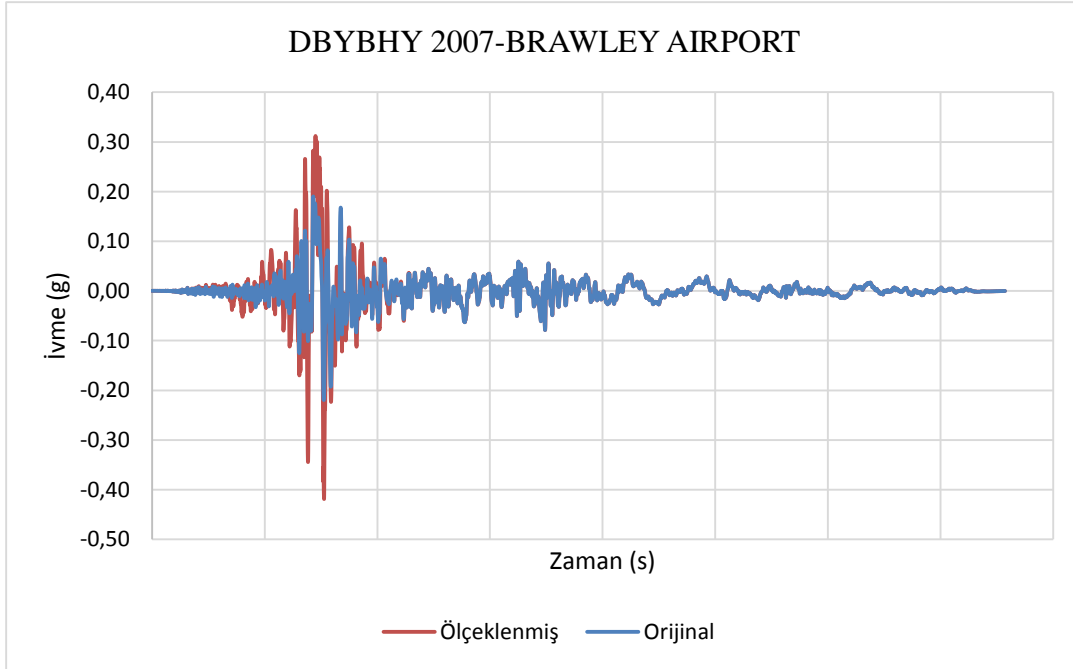
Şekil 8. 17. Brawley Airport istasyonu orijinal ve EC8'e ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği



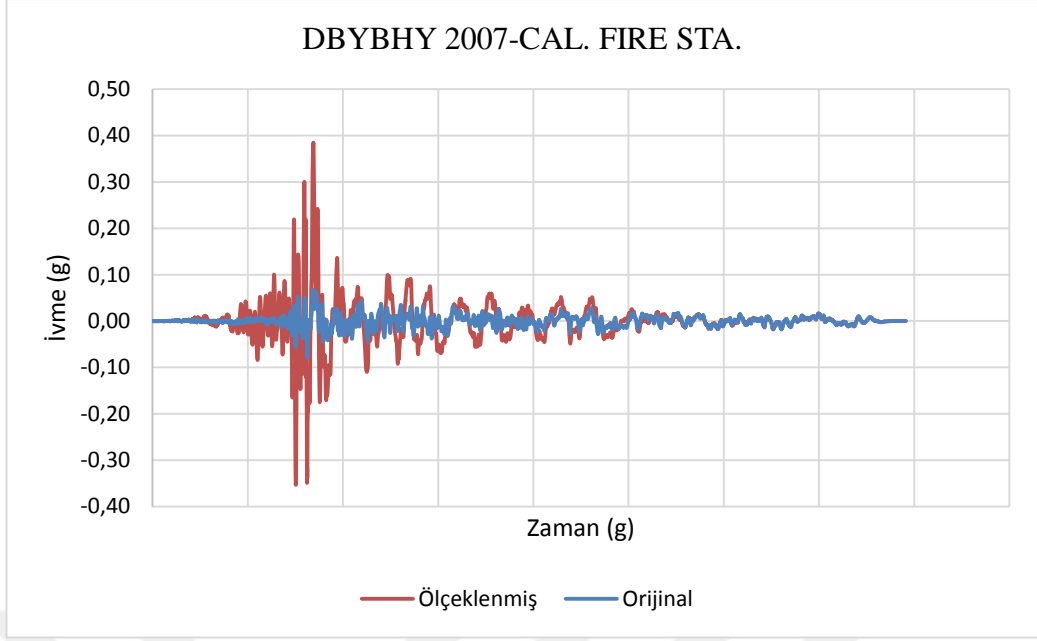
Şekil 8. 18. Calipatria Fire istasyonu orijinal ve EC8'e ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği



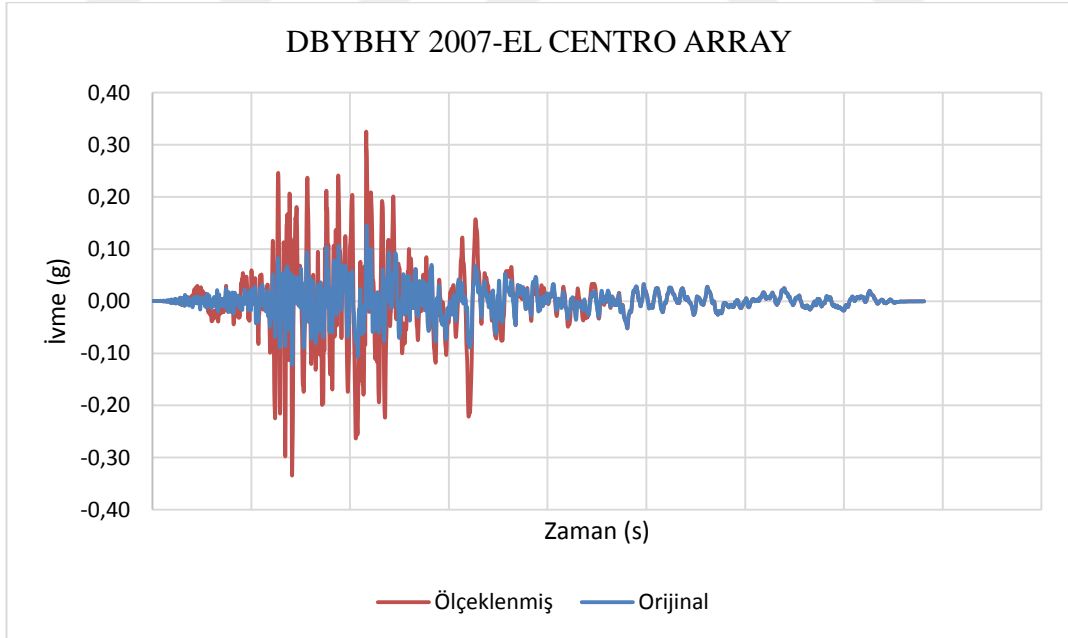
Şekil 8. 19. El Centro Array istasyonu orijinal ve EC8'e ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği



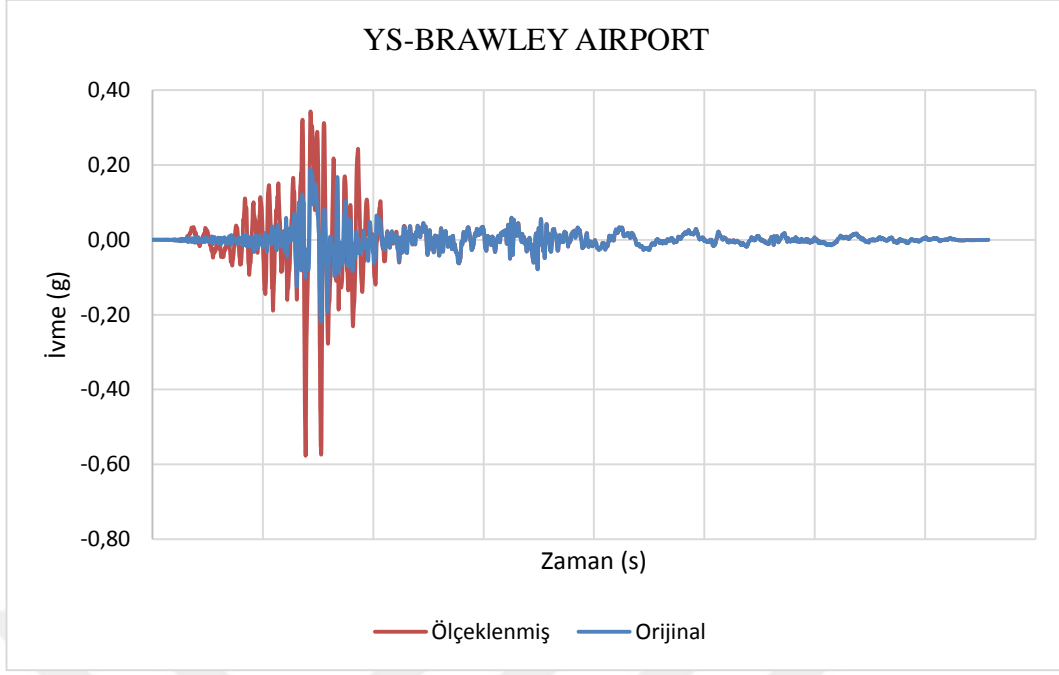
Şekil 8. 20. Brawley Airport istasyonu orijinal ve DBYBHY 2007'e ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği



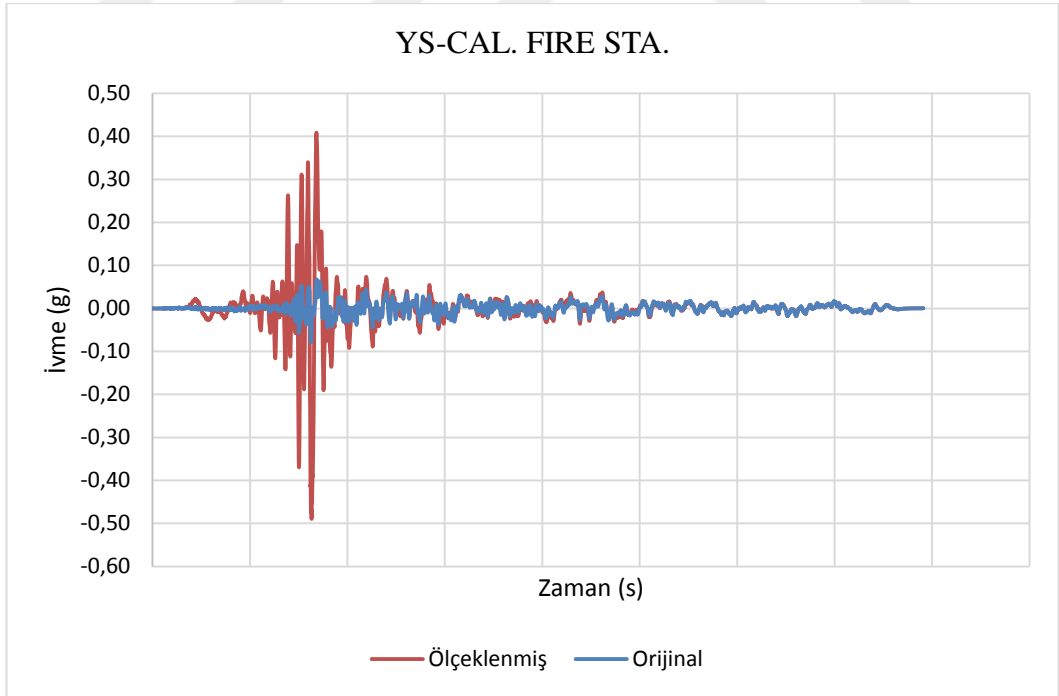
Şekil 8. 21. Calipatria Fire istasyonu istasyonu orijinal ve DBYBHY 2007'e ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği



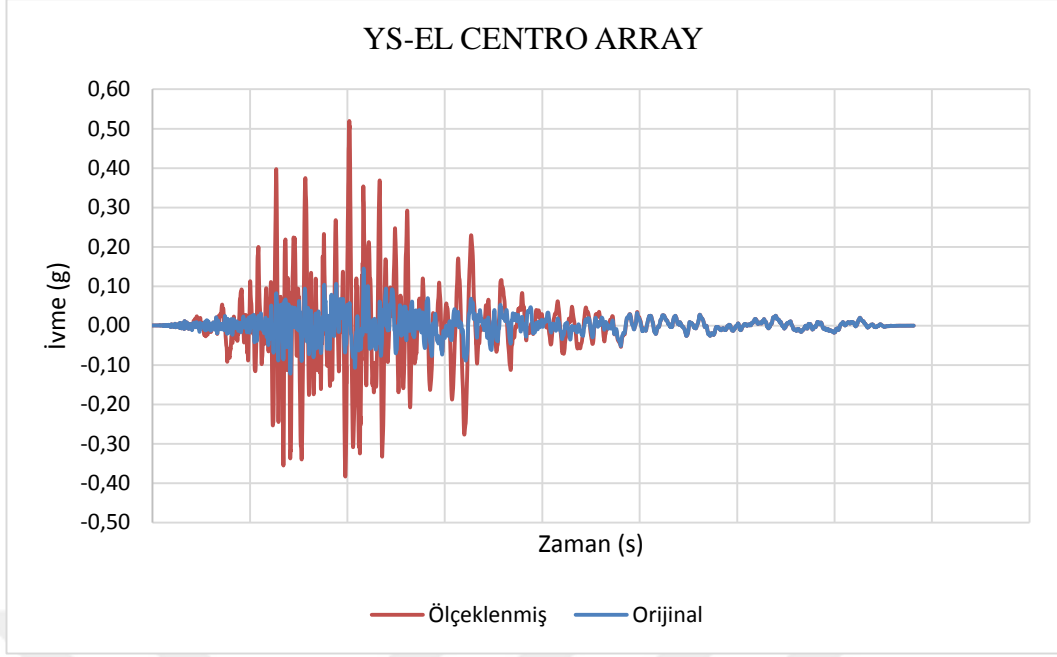
Şekil 8. 22. El Centro Array istasyonu orijinal ve DBYBHY 2007'ye ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği



Şekil 8. 23. Brawley Airport istasyonu orijinal ve YS'a ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği

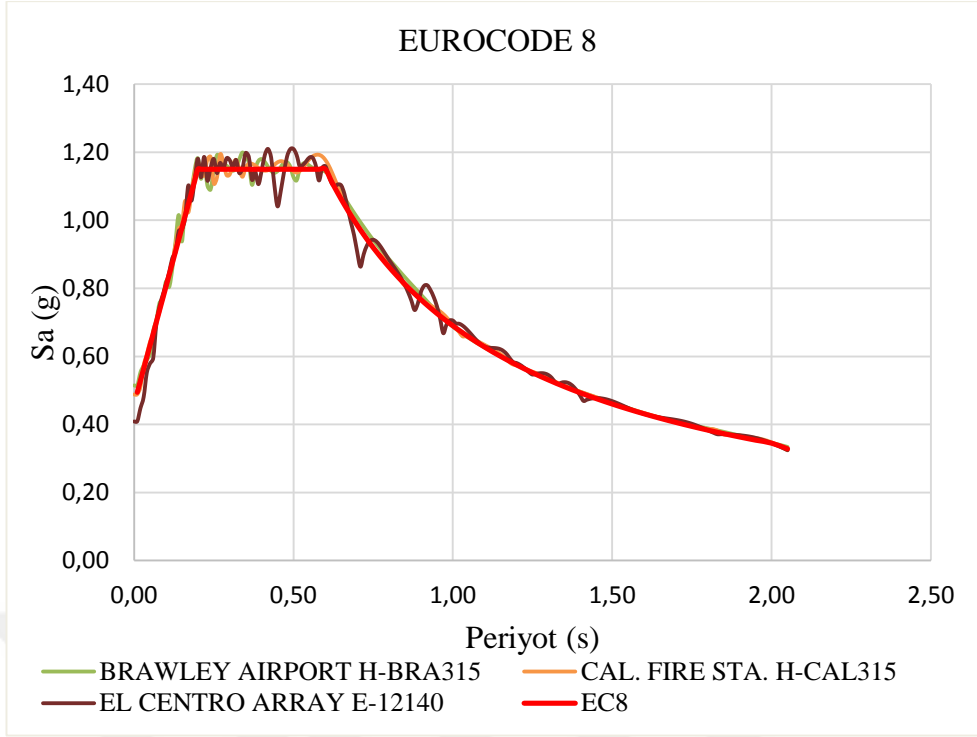


Şekil 8. 24. Calipatria Fire istasyonu orijinal ve YS'a ölçeklenmiş ivme-zaman grafiği

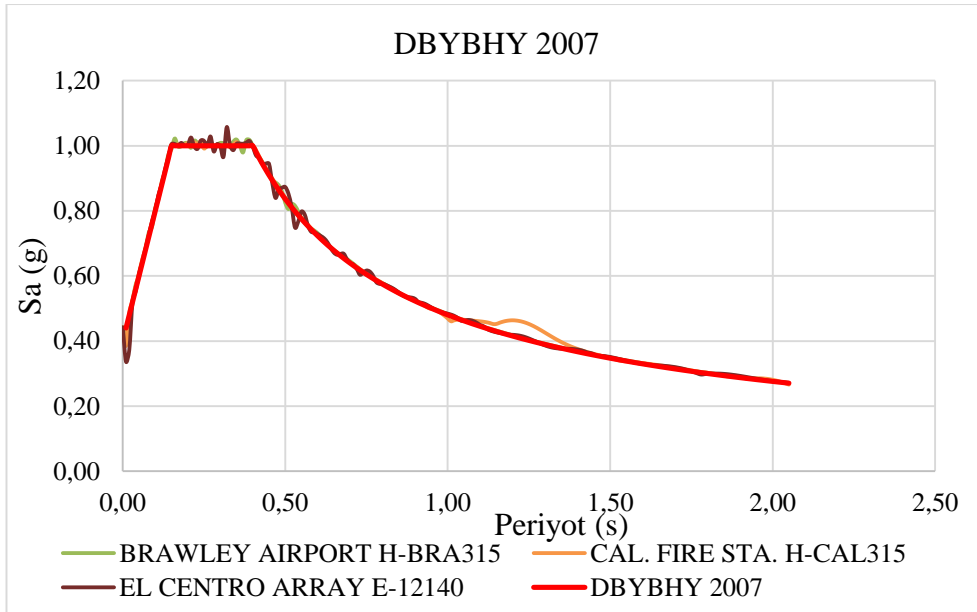


Şekil 8. 25. El Centro Array istasyonu orjinal ve YS'a ölçeklenmiş ivme- zaman grafiği

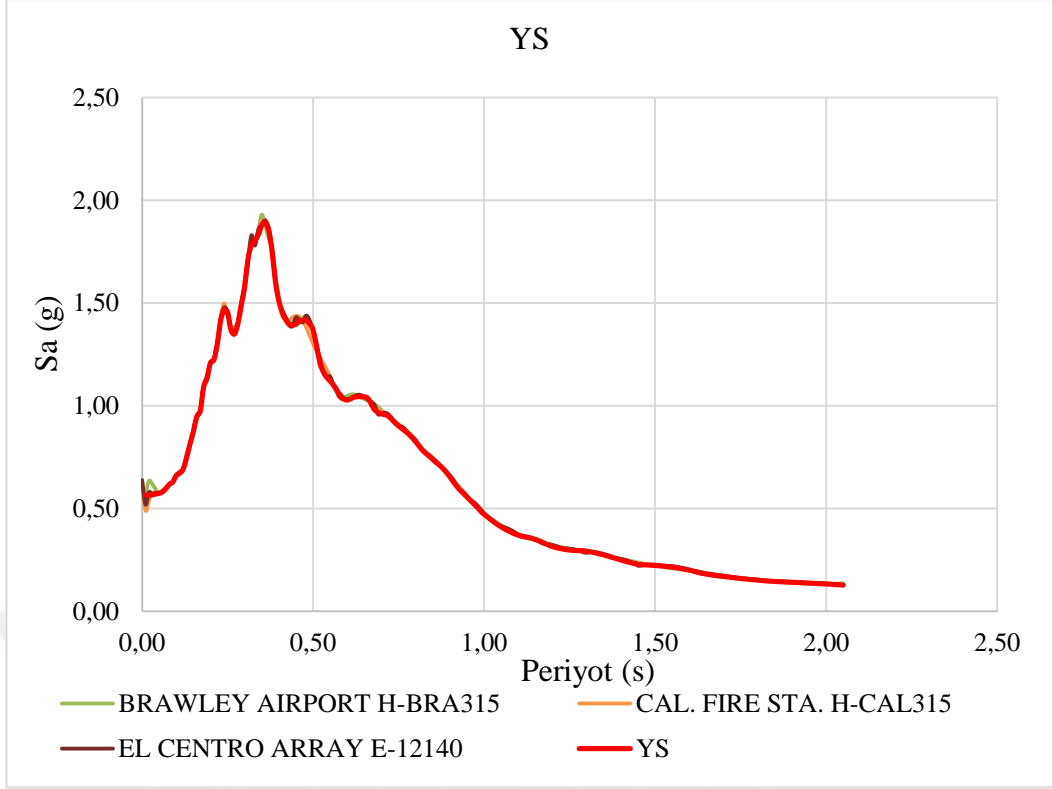
EC8, DBYBHY 2007 ve YS'a ölçeklenmiş kayıtların spektral ivme periyot grafikleri ise sırasıyla Şekil 8.26, 8.27 ve 8.28'de verilmiştir. Üç gerçek deprem kaydının her üç spektruma göre ölçeklendirilmesi sonucu elde edilmiş olan pik yer ivmesi değerleri Çizelge 8.2'de gösterilmektedir.



Şekil 8. 26. EC8 ve ölçülen kayıtların spektral ivme grafikleri



Şekil 8. 27. DBYBHY 2007 ve ölçülen kayıtların spektral ivme grafikleri



Şekil 8. 28. YS ve ölçeklenmiş kayıtların spektral ivme grafikleri

Çizelge 8. 2. Ölçeklenmiş kayıtların pik yer ivmesi (PGA) değerleri

	PGA (g)		
	BRAWLEY AIRPORT	CAL. FIRE STA.	EL CENTRO ARRAY
EC8	0,51	0,49	0,41
DBYBHY 2007	0,42	0,39	0,33
YS	0,58	0,49	0,52

Yapıların deprem kuvvetleri altında gösterdikleri deformasyonlar genellikle iki yatay doğrultudaki ötelenmeler ile kat burulma açıları cinsinden ifade edilir. Ayrıca, deprem kuvvetlerinin yapıda oluşturduğu kesit tesirlerinin sayısal olarak ifade edilmesinde iki yatay doğrultudaki taban kesme kuvvetleri ve bu eksenlere göre devrilme momentleri kullanılır. Bu çalışmada, yapıların deprem performanslarının değerlendirilmesinde bir doğrultuda taban kesme kuvveti ile aynı doğrultuya göre devrilme momenti ve bu doğrultudaki tepe yanal ötelenmesi ile görelî kat öteleme oranı kullanılmıştır. Kullanılan doğrultuya dik diğêr yatay doğrultuda elde edilen değerler de paralel sonuçlar ortaya çıkardığı için bu bölümde sunulmamıştır. Ayrıca, depremlerin yapı performanslarının değerlendirilmesinde çok önemli bir parametre olan kat burulma açıları da her üç yapısal modelde de önemli değerlere ulaşmadığı için analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde göz ardı edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında analiz edilen üç yapının resimleri ve bu yapıların kat planları Şekil 8.9-8.15’de gösterilmektedir. Bu üç yapının sokak taraması sonuçları da Çizelge 8.3-8.5’te gösterilmektedir.

Çizelge 8. 3. Model 1’in sokak taraması sonuçları

Kriter	Bina Özelliği	Puan
Hız Bölgesi	II	90
Kat Sayısı	5	
Yumuşak Kat	Yok	-
Ağır Çıkma	Yok	-
Görünen Kalite	Kötü	-30
Kısa Kolon	Yok	-
Çarpışma Etkisi	Var	-3
Topoğrafik Etki	Var	-2
Performans Puanı		90-30-3-2=55 (Güvensiz)

Çizelge 8. 4. Model 2'nin sokak taraması sonuçları

Kriter	Bina Özelliği	Puan
Hız Bölgesi	II	125
Kat Sayısı	3	
Yumuşak Kat	Yok	-
Ağır Çıkma	Yok	-
Görünen Kalite	İyi	-
Kısa Kolon	Yok	-
Çarpışma Etkisi	Yok	-
Topoğrafik Etki	Yok	-
Performans Puanu		125 (Güvenli)

Çizelge 8. 5. Model 3'ün sokak taraması sonuçları

Kriter	Bina Özelliği	Puan
Hız Bölgesi	II	90
Kat Sayısı	5	
Yumuşak Kat	Yok	-
Ağır Çıkma	Var	-15
Görünen Kalite	Orta	-15
Kısa Kolon	Yok	-
Çarpışma Etkisi	Var	-3
Topoğrafik Etki	Yok	-
Performans Puanu		90-15-15-3=57 (Güvensiz)

Yapı modellerinin her üç deprem kaydı altında her üç tasarım spektrumuna göre yapılan zaman tanım alanında analizlerinin sonuçları Çizelge 8.6-8.17 ve Şekil 8.29-8.40'da ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Ayrıca çizelgelerde, EC8 ve DBYBHY 2007 spektrumlarının kullanılması sonucu elde edilen değerlerin YS kullanılması sonucu elde edilen değerlerden ne kadar farklı olduğu da yüzde değerler cinsinden verilmektedir. Çizelgelerde sunulan yüzde farklar incelendiğinde, özellikle Model 1 ve Model 3'deki yapıların taban kesme kuvveti, devrilme momenti, tepe deplasmanı ve göreceli kat ötelemesi oranı değerlerinin YS kullanılmasıyla önemli derecede arttığı görülmektedir. Özellikle DBYBHY 2007'de verilen tasarım spektrumunun kullanılmasıyla elde edilen değerlerle YS kullanılması sonucu elde edilen değerler arasındaki farkların % 55'lere kadar çıktığı belirlenmiştir. EC8 spektrumunun kullanılması sonucu elde edilen değerler genellikle YS kullanılması sonucu elde edilen değerlerle daha yakın bir uyum içindedir. Buna göre EC8 tarafından verilen ivme spektrumunun kullanılmasının daha güvenli sonuçlar verdiği öngörülmektedir.

Çizelge 8. 6. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için taban kesme kuvvetleri ve YS'a göre % farkları

Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer (kN)	YS'ye göre % fark	Değer (kN)	YS'ye göre % fark	Değer (kN)	YS'ye göre % fark
EC8	948	-32	1244	-4	1162	14
TDY	721	-48	636	-51	710	-30
YS	1392	0	1293	0	1019	0

Çizelge 8. 7. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için taban kesme kuvvetleri ve YS'a göre % farkları

Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer (kN)	YS'ye göre % fark	Değer (kN)	YS'ye göre % fark	Değer (kN)	YS'ye göre % fark
EC8	473	-10	481	-6	618	19
TDY	431	-18	431	-16	618	19
YS	526	0	510	0	520	0

Çizelge 8. 8. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için taban kesme kuvvetleri ve YS'a göre % farkları

Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer (kN)	YS'ye göre % fark	Değer (kN)	YS'ye göre % fark	Değer (kN)	YS'ye göre % fark
EC8	890	-34	1088	-42	1728	-26
TDY	776	-43	1058	-44	1822	-22
YS	1355	0	1888	0	2326	0

Çizelge 8. 9. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için devrilme momentleri ve YS'a göre % farkları

Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer (kN.m)	YS'ye göre % fark	Değer (kN.m)	YS'ye göre % fark	Değer (kN.m)	YS'ye göre % fark
EC8	13305	13	15576	4	18158	31
TDY	9006	-23	11711	-22	14043	2
YS	11756	0	15001	0	13835	0

Çizelge 8. 10. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için devrilme momentleri ve YS'a göre % farkları

Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer (kN.m)	YS'ye göre % fark	Değer (kN.m)	YS'ye göre % fark	Değer (kN.m)	YS'ye göre % fark
EC8	4816	-8	5947	14	5040	7
TDY	4471	-15	5090	-3	4600	-2
YS	5258	0	5222	0	4700	0

Çizelge 8. 11. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için devrilme momentleri ve YS'a göre % farkları

Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer (kN)	YS'ye göre % fark	Değer (kN)	YS'ye göre % fark	Değer (kN)	YS'ye göre % fark
EC8	14409	-45	11560	-31	25935	-41
TDY	14482	-44	11230	-33	25096	-43
YS	26008	0	16709	0	43669	0

Çizelge 8. 12. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için tepe deplasmanı ve YS'a göre % farkları

Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer (m)	YS'ye göre % fark	Değer (m)	YS'ye göre % fark	Değer (m)	YS'ye göre % fark
EC8	0,0187	-37	0,0250	-7	0,0210	7
TDY	0,0167	-44	0,0122	-55	0,0132	-33
YS	0,0299	0	0,0270	0	0,0196	0

Çizelge 8. 13. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için tepe deplasmanı ve YS'a göre % farkları

Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer (m)	YS'ye göre % fark	Değer (m)	YS'ye göre % fark	Değer (m)	YS'ye göre % fark
EC8	0,0043	-16	0,0043	-1	0,0052	6
TDY	0,0040	-23	0,0037	-15	0,0043	-12
YS	0,0052	0	0,0044	0	0,0049	0

Çizelge 8. 14. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için tepe deplasmanı ve YS'a göre % farkları

Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer (m)	YS'ye göre % fark	Değer (m)	YS'ye göre % fark	Değer (m)	YS'ye göre % fark
EC8	0,0060	-42	0,0079	-40	0,0131	-27
TDY	0,0051	-50	0,0078	-41	0,0130	-27
YS	0,0102	0	0,0131	0	0,0179	0

Çizelge 8. 15. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için görelî kat ötelemesi oranları ve YS'a göre % farkları

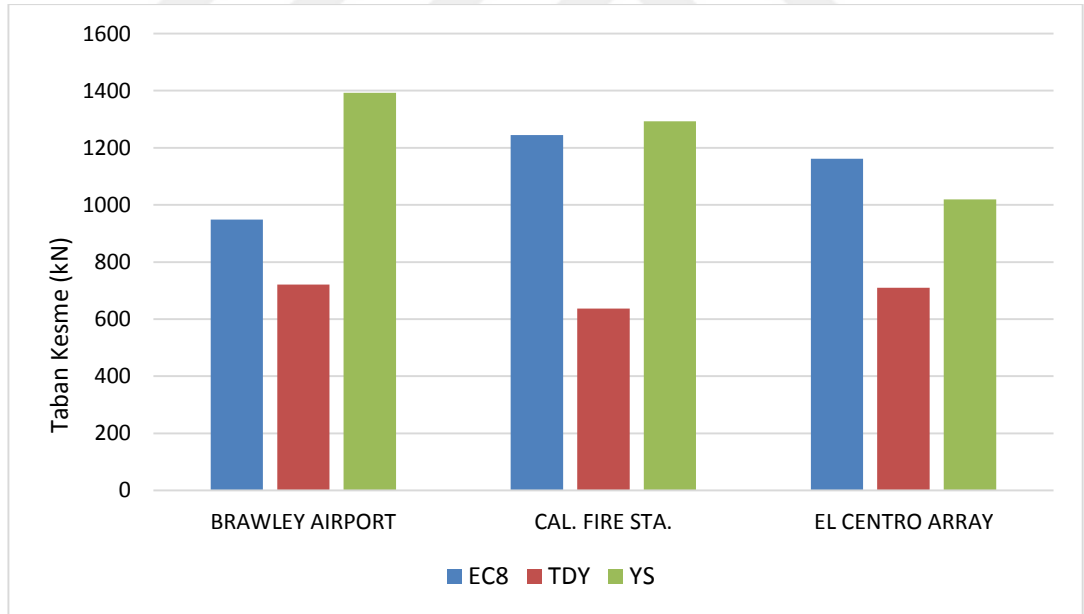
Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer	YS'ye göre % fark	Değer	YS'ye göre % fark	Değer	YS'ye göre % fark
EC8	0,000673	-26	0,000747	-5	0,000807	7
TDY	0,000620	-32	0,000410	-48	0,000560	-26
YS	0,000910	0	0,000787	0	0,000757	0

Çizelge 8. 16. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için görelî kat ötelemesi oranları ve YS'a göre % farkları

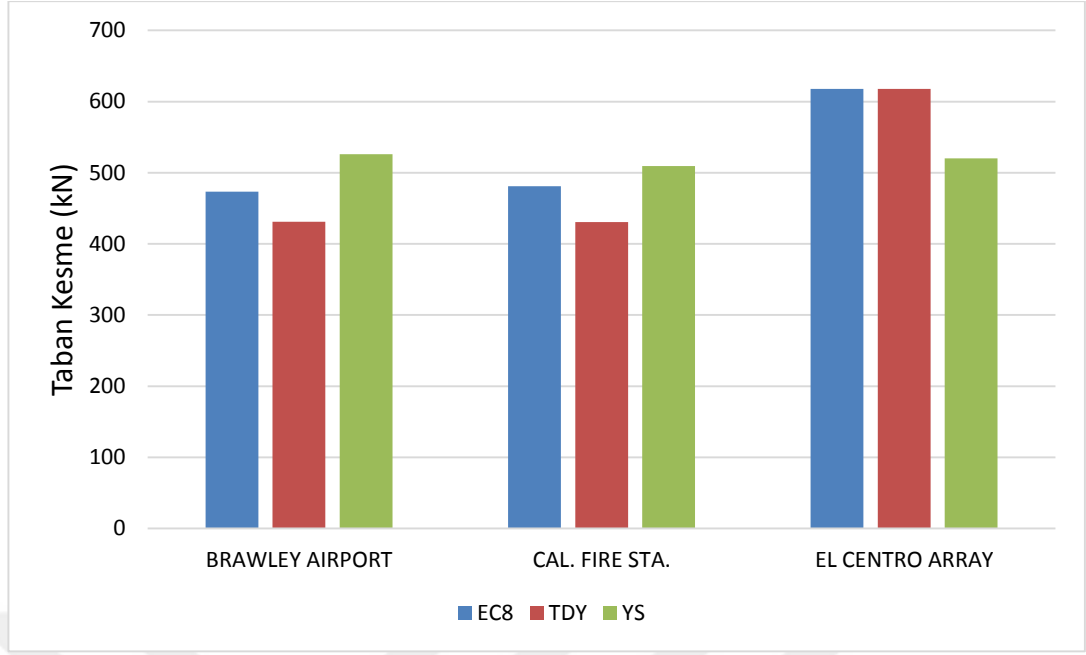
Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer	YS'ye göre % fark	Değer	YS'ye göre % fark	Değer	YS'ye göre % fark
EC8	0,000350	-16	0,000353	0	0,000430	12
TDY	0,000323	-22	0,000300	-15	0,000367	-4
YS	0,000417	0	0,000353	0	0,000383	0

Çizelge 8. 17. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için görel kat ötelemesi oranları ve YS'a göre % farkları

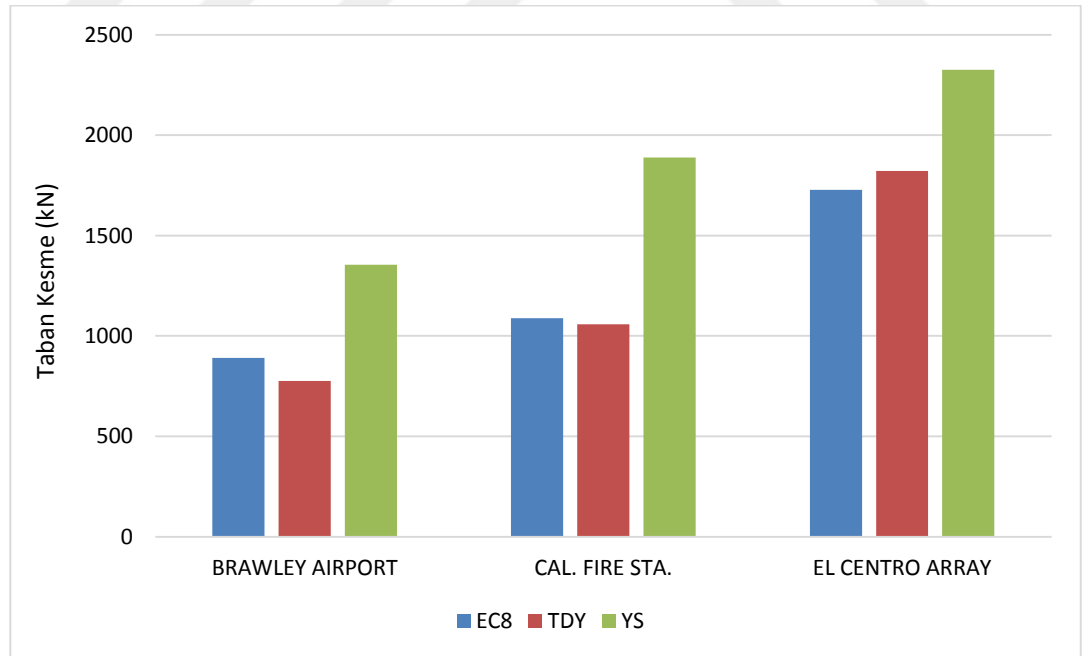
Tasarım Spektrumu	Brawley Airport		California Fire Station		El Centro Array	
	Değer	YS'ye göre % fark	Değer	YS'ye göre % fark	Değer	YS'ye göre % fark
EC8	0,000263	-43	0,000337	-41	0,000600	-34
TDY	0,000230	-50	0,000333	-42	0,000600	-34
YS	0,000460	0	0,000570	0	0,000907	0



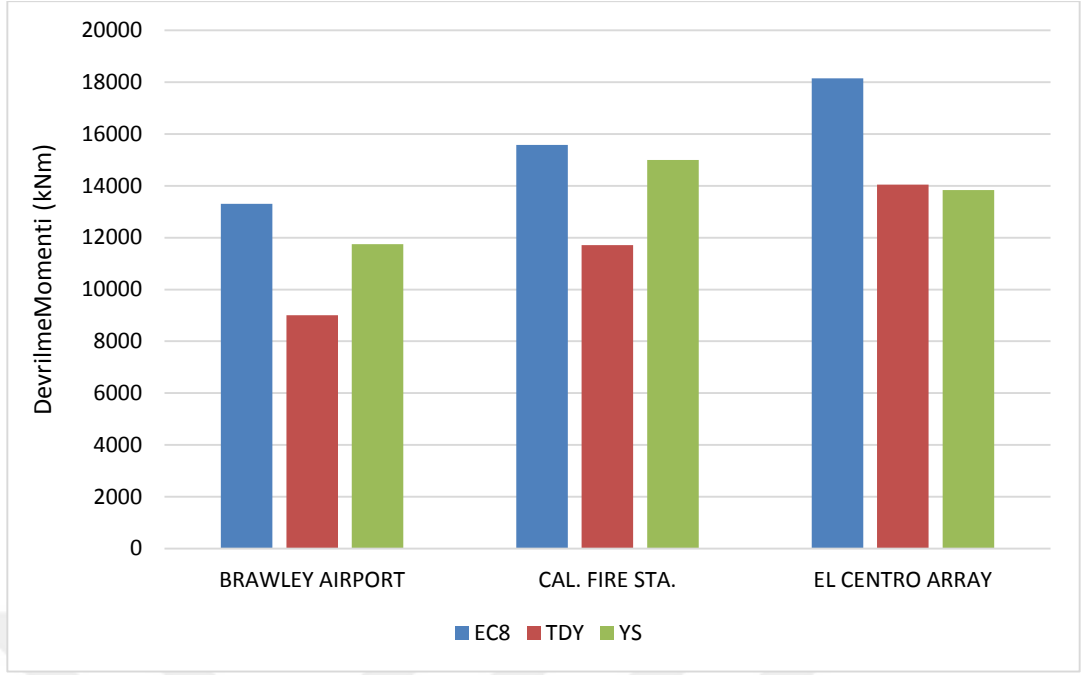
Şekil 8. 29. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için taban kesme kuvveti değerleri



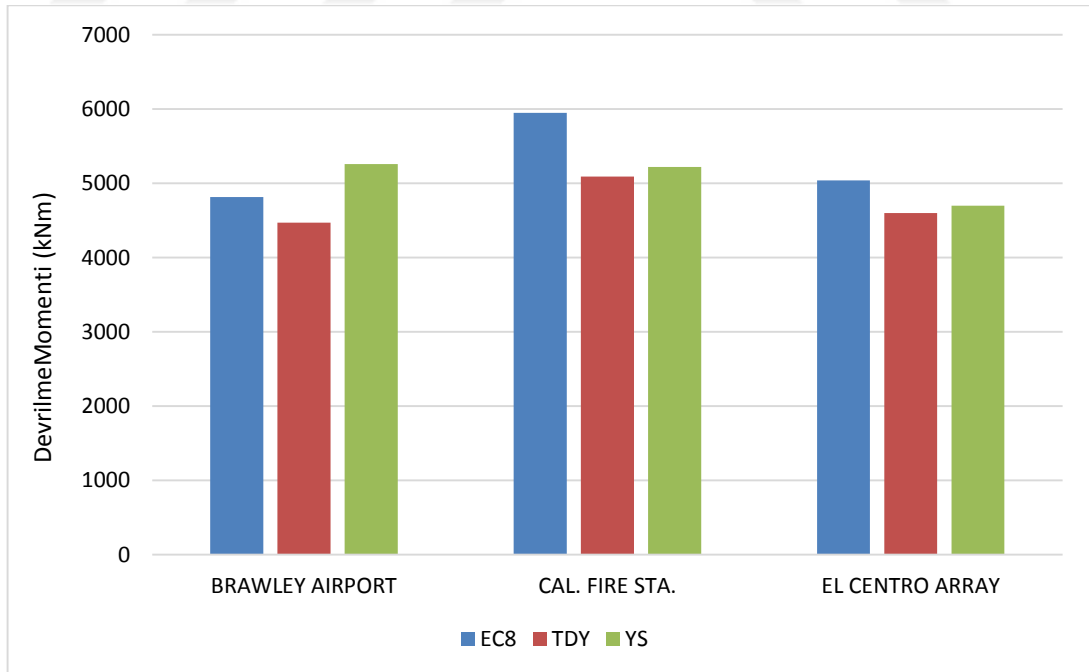
Şekil 8. 30. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için taban kesme kuvveti değerleri



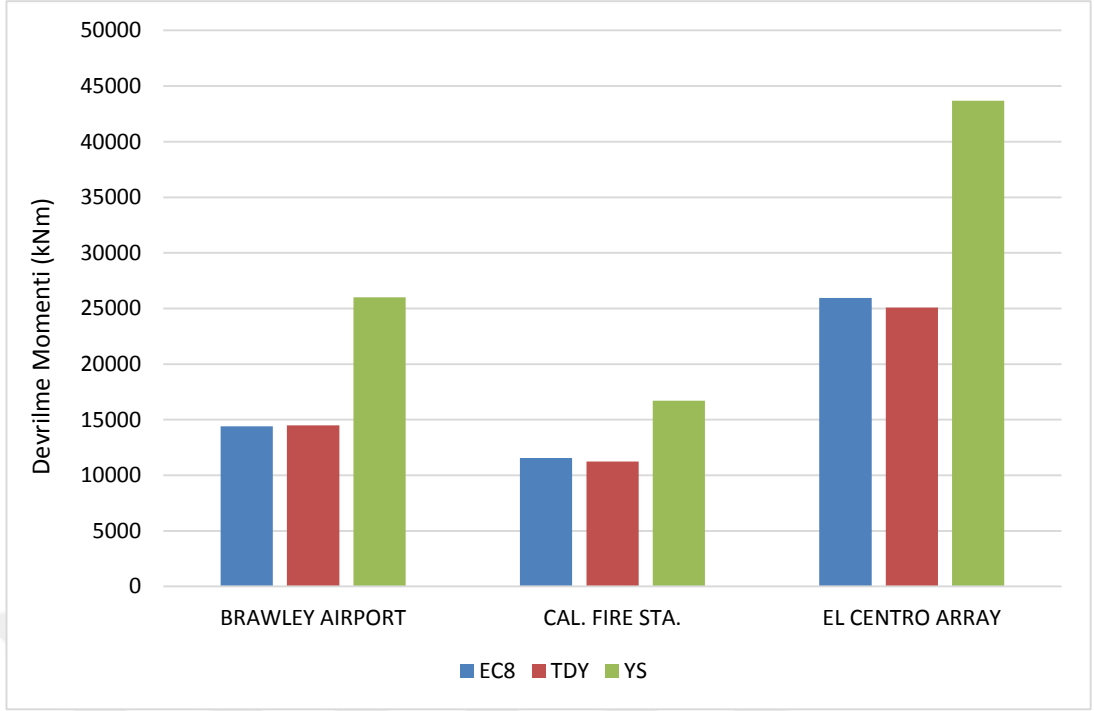
Şekil 8. 31. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için taban kesme kuvveti değerleri



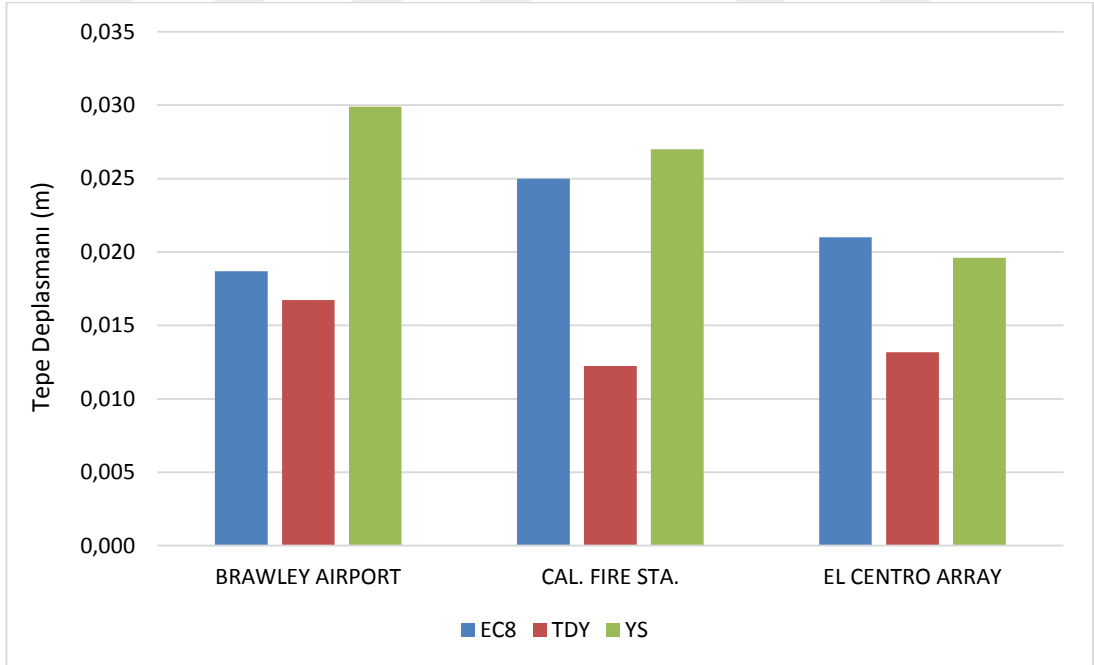
Şekil 8. 32. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için devrilme momenti değerleri



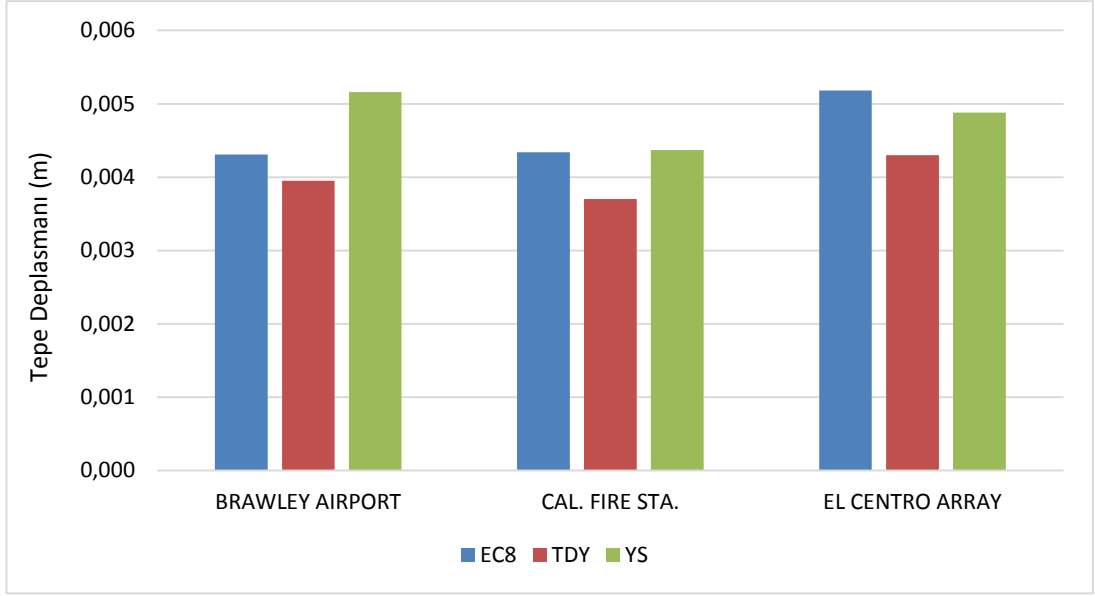
Şekil 8. 33. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için devrilme momenti değerleri



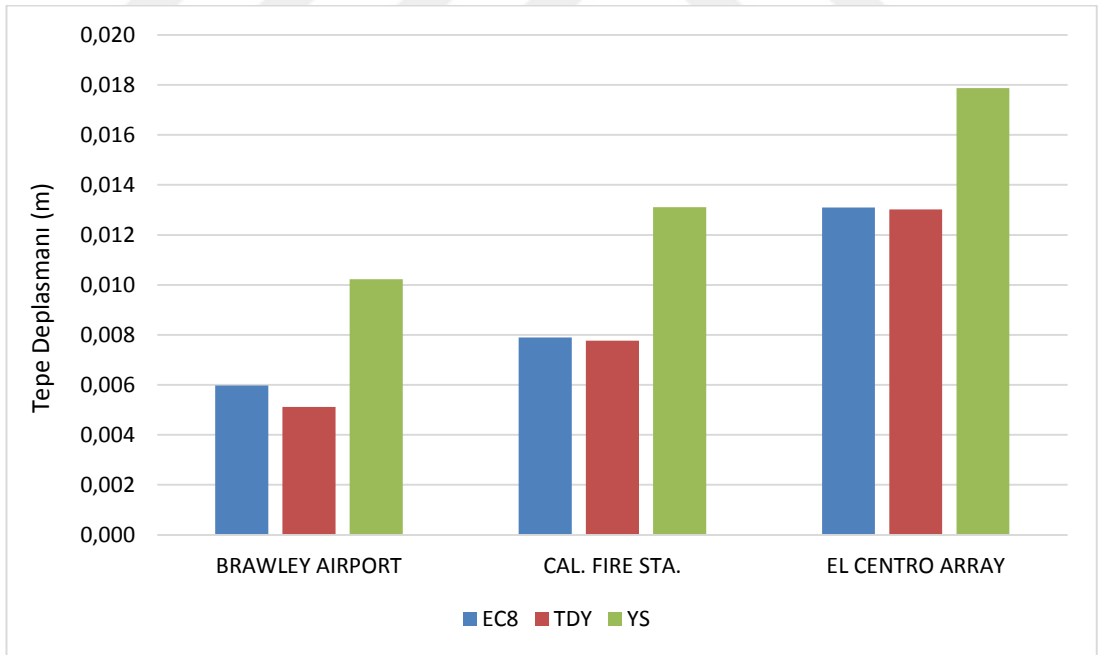
Şekil 8. 34. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için devrilme momenti değerleri



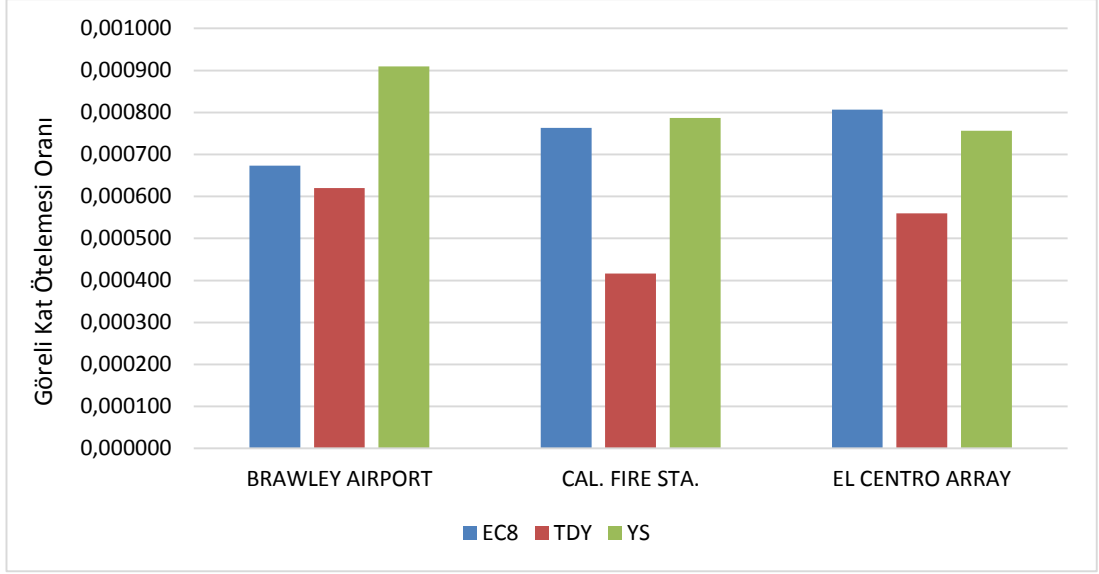
Şekil 8. 35. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için tepe deplasmanı değerleri



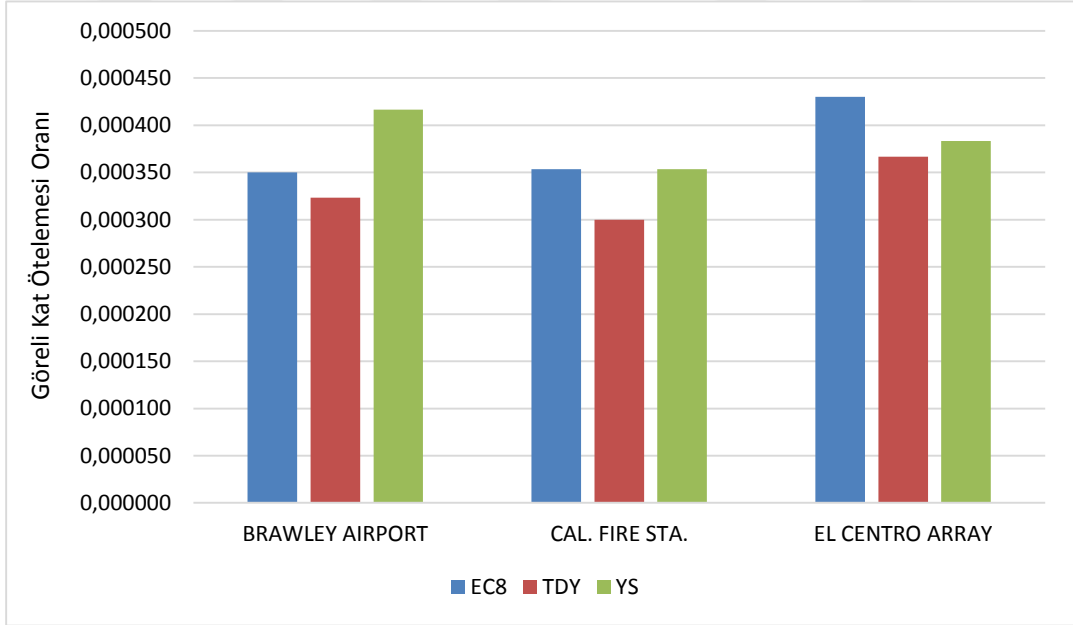
Şekil 8. 36. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için tepe deplasmanı değerleri



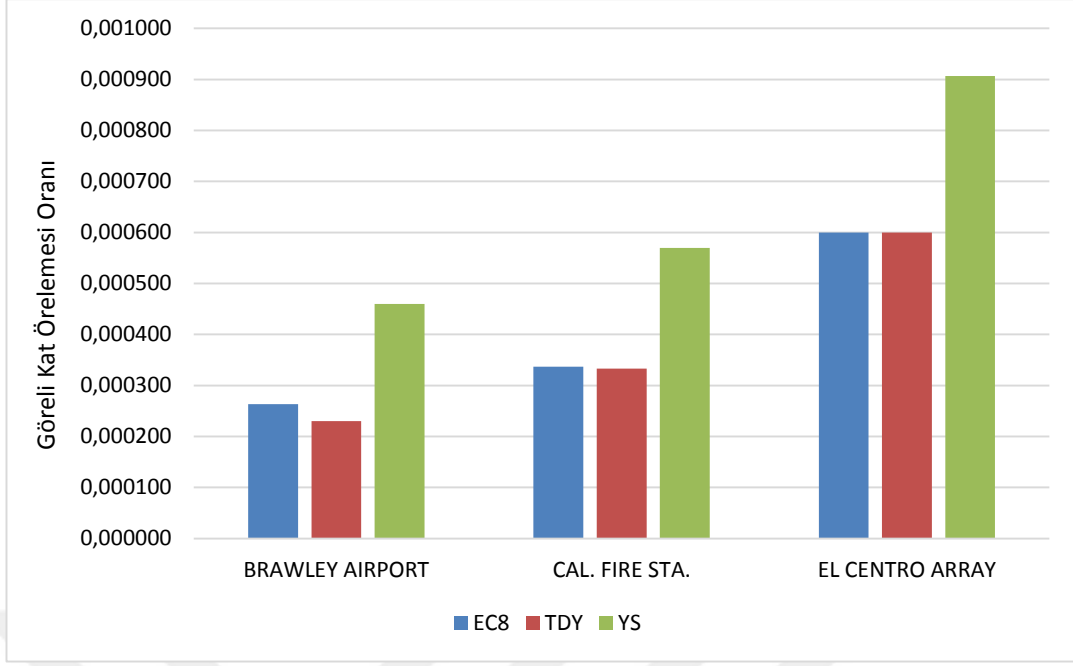
Şekil 8. 37. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için tepe deplasmanı değerleri



Şekil 8. 38. Model 1'in farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için görelî kat ötelemesi oranları



Şekil 8. 39. Model 2'nin farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için görelî kat ötelemesi oranları



Şekil 8. 40. Model 3'ün farklı spektrumlar ve deprem kayıtları için görece kat ötelenmesi oranları

Model 2'de farklı spektrumlar kullanılması sonucu elde edilen değerlerin, birinci ve üçüncü yapılara göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Model 2, daha düzenli bir kat planına sahiptir (Şekil 8.13). Bu yapıda düşey taşıyıcı elemanlar her iki yatay doğrultuda da daha simetrik bir düzende yerleştirildiği için kat rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasındaki dış merkezlik daha sınırlı bir düzeydedir. Bu durum, deprem kuvvetleri altında rijitlik merkezinde oluşacak kat burulma momentlerini ve dolayısıyla düşey taşıyıcılara bu burulma momentlerinin etkisiyle gelen ilave kesme kuvvetlerini sınırlandırarak, taban kesme kuvvetleri, devrilme momentleri, tepe deplasmanları ve görece kat ötelenmesi oranlarının daha sınırlı olmasını ve bu değerlerin tasarım spektrumundan daha az etkilenmesini sağlamıştır. Bu yapıda, EC8 ve DBYBHY 2007 kullanılması sonucu elde edilen değerlerle YS kullanılması sonucu elde edilen değerler arasındaki fark % 20'nin altında kalmıştır. Model 3'ün (Şekil 8.15) kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki dış merkezliğin diğer yapılardan büyük olduğu görülmektedir. Bu dış merkezlik değerine bağlı olarak, Model 3'ün YS kullanılması sonucu elde edilen taban kesme kuvveti, devrilme momenti, tepe

deplasmanı değerlerinin ve göreli kat ötelenmesi oranlarının yönetmelik tasarım spektrumları kullanılması sonucu elde edilen değerlerin çok üstünde olduğu görülmektedir (Şekil 8.31, 8.34, 8.37 ve 8.40). Model 3'n YS kullanılması sonucu elde edilen taban kesme kuvveti, devrilme momenti, tepe deplasmanı ve göreli kat ötelemesi oranı değerlerinin yönetmelik spektrumları kullanılması sonucu elde edilen değerleri sırasıyla % 22-44, % 31-45, % 27-50 ve % 34-50 arasında değişen oranlarda aştığı görülmektedir.

Yönetmeliklerde ngrlen tasarım ivme spektrumları yerine, zemin şartlarına bağlı olarak davranış analizlerinden elde edilen yüzey ivme spektrumunun analiz sonuçları üzerindeki etkisinin, yapıların sokak taraması sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Çizelge 8.3-8.5'te de görüleceği üzere, Model 2 sokak taramasına göre güvenli tarafta kalırken, diğer iki yapının güvensiz olduğu belirlenmiştir. Sokak taramasına göre güvenli olduğu belirlenen ve ayrıca diğer iki yapıya göre düzenli bir kat planına sahip olan Model 2'nin davranışı ve deprem etkisiyle ortaya çıkan taban kesme kuvveti, devrilme momenti, tepe deplasmanı ve göreli kat ötelemesi oranı değerleri, yönetmeliklerde öngörülen tasarım ivme spektrumları kullanılarak da gerçeğe yakın bir şekilde belirlenebilmektedir. Diğer iki yapının planda ve düşey doğrultudaki düzensizlikleri ise yapıların deprem davranışının düzensiz olmasına ve deprem hareketinde ortaya çıkacak değişikliklerden önemli derecede etkilenmesine sebep olmuştur (Şekil 8.29-8.40).

9. SONUÇLAR

Bu çalışmada; jeolojik, jeofizik ve geoteknik veriler birlikte kullanılarak Kırıkkale şehir merkezi çalışma alanının sismik mikrobölgelemesi yapılmış ayrıca Kırıkkale yapı stoğu sokaktan hızlı tarama yöntemi kullanılarak incelenmiş ve tipik binalar üzerinde zaman tanım alanında doğrusal elastik analizler yapılarak, çalışma alanının deprem riski ortaya konulmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. İnceleme alanında, yapılan sondajlardan elde edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda bölge çoğunlukla CL, CH ve SC türü zeminlerin ardalanmalı olarak oluşturduğu homojen bir yapıya sahiptir. Ancak çalışma alanını doğu batı yönünde ikiye bölen Çoruhözü deresi ve Kızılırmak nehri boyunca killi, kumlu ve çakıllı zeminlerden oluşan Alüvyon birimler de gözlenmektedir.
2. Kırıkkale'nin etrafında 100 km yarıçaplı dairesel bir alan içerisinde aletsel ve tarihi deprem verileri kullanılarak olasılıksal deprem tehlike analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda 50 yılda % 10 aşılma ihtimaline göre meydana gelmesi muhtemel depremin 7 büyüklüğünde olduğu tespit edilmiştir. Abrahamson, Silva ve Kamai (ASK13) Boore, Stewart, Seyhan ve Atkinson (BSSA13) ve Campbell ve Bozorgnia (CB13) azalım ilişkilerinden elde edilen spektrumların geometrik ortalamasına göre anakaya seviyesi için hedef spektrum belirlenmiştir. Elde edilen spektrumlarda ASK13 ve BSSA13 ile kıyaslandığında, CB13 modelinde düşük periyotlarda daha yüksek ivme değerleri gözlenmiştir.
3. Çalışma alanı 500 m × 500 m boyutlarında hücelere bölünmüştür. Çalışma alanında 2 derin sondaj, 108 zemin etüt sondajı, 16 sismik kırılma ve 6 MASW ve ReMi testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler dikkate alınarak inceleme alanında zemin sınıfının NEHRP'e göre C, DBYBHY (2007)'e göre ağırlıklı

olarak Z2 ancak yer yer bazı lokasyonlarda Z3 zemin sınıfında olduğu belirlenmiştir.

4. İnceleme alanında; sondaj, sismik kırılma, MASW ve ReMi testi sonuçlarına göre modellenen zemin profilleri üzerinde, SHAKE2000 programı kullanılarak zemin davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlara göre çalışma alanında, zemin hakim periyodu 0,14 ile 0,99 s arasında değişmektedir. MKE alanları, Kızılırmak, Karşıyaka, Yaylacık, Osmangazi, Yuva ve Kimeski mahallelerinde periyotlar 0,65 ile 0,9 s arasında değişirken, diğer yerlerde ise 0,2 ile 0,6 s arasında değişmektedir. Zemin davranış analizlerinden elde edilen büyütme oranları 1,69 ile 2,93 arasında ve ortalamaları 2,2 iken, Midorikawa (1987) amprik bağıntısından elde edilen zemin büyütme oranları 1,67 ile 2,45 arasında ve ortalamaları 2'dir. Hem zemin davranış analizlerinde hem de Midorikawa metodunda, Kızılırmak mahallesinde ve çalışma alanını doğu-batı yönünde ikiye bölen alüvyon zeminlerin yaygın olarak gözleendiği bölgelerde, büyütme oranlarının daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Her iki metotdan sağlanan sonuçlara bakıldığında, Kırıkkale zeminleri için ortalama büyütme oranlarının 2 civarında olduğu söylenebilir. Uzun periyot (1 s) değerlerine karşılık gelen yüksek büyütme değerleri Kızılırmak nehri boyunca gözlenmektedir.
5. Çalışma alanında pik yer ivmesi (PGA) değerleri 0,34 ile 0,56 g arasında değişmekle beraber, yüksek pik yer ivmeleri (PGA), çalışma alanını doğu-batı yönünde bölen alüvyon zeminler üzerinde, MKE alanlarında ve Kızılırmak mahallesinde görülmektedir. Kısa periyot (0,2 s) spektral ivmeler alüvyon zeminlerde 0,65g seviyesinde iken Kızılırmak, Yenimahalle, Bağlarbaşı ve Çalılıöz mahallelerinde 1,60 g seviyesindedir. Uzun periyot (1 s) spektral ivme değerleri Bahçelievler, Yuva, Kimeski ve Kızılırmak mahallerinde 1,09 g seviyesinde iken diğer bölgelerde 0,33 g seviyesindedir.
6. Sucuoğlu ve Yazgan tarafından geliştirilen sokaktan hızlı tarama yöntemi kullanılarak Kırıkkale yapı stoğundaki 2074 adet bina sokaktan eğitimli gözlemciler tarafından incelenmiştir. Kırıkkale'de sismik tehlike

analizlerinden belirlenen 50 yılda %10 aşılma ihtimaline göre meydana gelmesi muhtemel 7 büyüklüğündeki depremde, yapısal hasar durumu, sınır değer (SD) 50 olması durumunda % 11 güvensiz (yüksek riskli), % 89 güvenli (düşük riskli), SD'nin 60 olması durumunda % 25 güvensiz, % 75 güvenli olarak belirlenmiştir. Sokaktan tarama yöntemine göre elde edilen sonuçlara bakıldığında, artan kat sayısı ile beraber yüksek riskli (güvensiz) bina oranlarının arttığı, düşük riskli (güvenli) bina oranlarının ise azaldığı, aralarında yüksek bir korelasyonun olduğu görülmüştür. Ağır çıkmalı, yumuşak katlı ve kısa kolonlu binalarda da benzer şekilde katsayısı arttıkça güvenli bina oranları azalırken güvensiz bina oranları artmaktadır. Ancak ağır çıkmalı ve kısa kolonlu binalara göre yumuşak katlı binalarda, artan katsayısı ile güvenli ve güvensiz bina oranları arasında daha yüksek korelasyonun olduğu görülmektedir.

7. Tipik binalar üzerinde gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal elastik analizlerde taban kesme kuvveti, tepe deplasmanı, devrilme momenti ve görelî kat ötelemesi oranı değerleri elde edilmiştir. Yüzey ivme spektrumuna (YS), Eurocode 8'e (EC8) ve Türkiye deprem yönetmeliğine (DBYBHY 2007) göre ölçeklenen deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, EC8 ve DBYBHY 2007'e göre YS sonuçlarının Model 1 ve Model 3 tipi binalarda daha yüksek sonuçlar verdiği, daha düzenli bir kat planına sahip olan Model 2'de ise sonuçların daha uyumlu olduğu görülmüştür. EC8 spektrumunun kullanılması sonucu elde edilen değerler genellikle YS kullanılması sonucu elde edilen değerlerle daha yakın bir uyum içindedir. Buna göre EC8 tarafından verilen ivme spektrumunun kullanılmasının daha güvenli sonuçlar verdiği öngörülmektedir.
8. Yönetmeliklerde öngörülen tasarım ivme spektrumları yerine, zemin şartlarına bağlı olarak elde edilen yüzey ivme spektrumunun analiz sonuçları üzerindeki etkisinin, yapıların sokak taraması sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ansal, A., Biro, Y., Erken, A., Gülerce, Ü., Özçimen, N., Seismic zonation in İstanbul: A case study Geotechnical Earthquake Engineering and Microzonation Seminar, İstanbul, 2001.
- [2] Allen, C.R., Active Faulting in Northern Turkey, Division of Geological Science, California Institute of Technology, Contr. No. 1577, 32s., 1969.
- [3] Bozkurt E, Late Alpine evolution of the central Menderes Massif, western Turkey. International Journal of Earth Sciences, 89 (4): 728-744, 2001a.
- [4] Şengör, A. M. C., Görür, N. and Şaroğlu, F., Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation, Soc. Econ. Paleont. Min. Spec. Pub. 37, 1985.
- [5] T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Bakanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara. <http://www.deprem.gov.tr/tr/kategori/deprem-bolgeleri-haritasi-28841> (Erişim tarihi: 15.02.2016).
- [6] Nigg, J., Microzonation And Public Preparedness: A Viable Approach, Proceedings Of The 3th International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, 1982.

- [7] Wang, J.G.Z.Q., Law, K.T., Siting in Earthquake Zones. A.A.Balkema, Rotterdam, Hollanda, s.114, 1994.
- [8] Finn, W.D.L., Ventura, C.E., Challenging issues in local microzonation. 5th International Conference on Seismic Zonation, Nice, Fransa, 1995.
- [9] Lee, W., Kanamori, H., Jennings, P. (Eds.), International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. IASPEI, Part B, 2003.
- [10] ISSMFE, Manual for zonation on seismic geotechnical hazards, published by Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1993.
- [11] ISSMGE-TC4. Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards, The Technical Committee No. 4 for Earthquake Geotechnical Engineering of the ISSMGE, Japanese Geotechnical Society of SMGE, s. 83-99, Tokyo, 1999.
- [12] Fah, D., Rüttener, E., Noack, T., Kruspan, P., Microzonation of the city of Basel. Journal of Seismology, 1 (1): 87-102, 1997.
- [13] Finn, W. D. L., Geotechnical Engineering Aspect of Microzonation, Proc. 4th International Conferance on Seismic Zonation, 1991.
- [14] Afet Risk Yönetimi Dünya Enstitüsü (DRM), Belediyeler için Sismik Mikrobölgeleme El Kitabı, 2004.

- [15] Dan, M.B., Multidisciplinary co-operation in building design according to urbanistic zoning and seismic microzonation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 397-411, 2005.
- [16] Pitilakis, K., Site effects. In: Ansal, A. (Ed.), *Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hollanda, s. 139-197, 2004.
- [17] Panza, G. F., Romanelli, F., Vaccari, F., Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: theory and application to seismic zonation, edited by: Dmowska, R., and Saltzman, B., *Advances in Geophysics*, Academic Press, San Diego, USA, 43, 1-95, 2001.
- [18] Faccioli, E., Pessina, V., The Catania Project: earthquake damage scenarios for a high risk area in the Mediterranean. *CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, Roma, 225s., 2001.
- [19] Ansal, A., Seismic microzonation methodology. *Proc. of 12th European Conf. On Earthquake Engineering*, Paper No: 830, London, UK, 2002.
- [20] Parvez, I.A., Vaccari, F., Panza, G.F., Site-specific Microzonation Study in Delhi Metropolitan City by 2-D Modelling of SH and P-SV Waves. *Pure and Applied Geophysics*, 161 (5): 1165-1184, 2004.
- [21] Kılıç, H., Özener, P.T., Ansal, A., Yıldırım, M., Özyayın, K., Adatepe, S., Microzonation of Zeytinburnu region with respect to soil amplification: a case study. *Engineering Geology*, 86 (4): 238-255, 2006.

- [22] Ansal, A., Biro, Y., Erken, A., Gülerce, Ü., Seismic microzonation: a case study. In: Ansal, A. (Ed.), Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hollanda, s. 253-266, 2004.
- [23] Studer, J. and Ansal, A., Seismic Microzonation for Municipalities, Manual Research Report for Republic of Turkey, Ministry of Public Works and Settlement, General Directorate of Disaster Affairs prepared by World Institute for Disaster Risk Mana, 2003.
- [24] 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, 13 (6): 413-423, 1994.
- [25] 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, 2000.
- [26] A. Gündüz, İstanbul Büyükçekmece-Küçükçekmece Göller arası bölgede yerleşime uygunluk, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [27] Gaull, B.A., Kagami, H., M.EERI, Taniguchi, H., The microzonation of Perth, Western Australia, using microtremor spectral ratios. Earthquake Spectra, 11 (2): s.173-191, 1995.

- [28] Dikmen, U., Mirzaoglu, M., The seismic microzonation map of Yenisehir-Bursa NW of Turkey by means of ambient noise measurements. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 8 (2): 53-62, 2005.
- [29] Ansal, A., İyisan, R., Güllü, H., Microtremor measurements for the microzonation of Dinar. *Pure and Applied Geophysics*, 158 (12): 2525-2541, 2001b.
- [30] Topal, T., Doyuran, V., Karahanoglu, N., Toprak, V., Suzen, M.L., Yesilnacar, E., Microzonation for earthquake hazards: Yenisehir settlement, Bursa, Turkey, *Engineering Geology* 70 (1-2): 93-108, 2003.
- [31] Hasançebi, N., Ulusay, R., Evaluation of site amplification and site period using different methods for an earthquake-prone settlement in Western Turkey. *Engineering Geology*, 87 (1-2): 85-104, 2006.
- [32] Motamed, R., Ghalandarzadeh, A., Tawhata, I., Tabatabaei, S.H., Seismic microzonation and damage assessment of Bam city, Southeastern Iran. *Journal of Earthquake Engineering*, 11 (1): 110-132. 2007.
- [33] Grasso, M., Maugeri, M., The seismic microzonation of the city of Catania (Italy) for the maximum expected scenario earthquake of January 11, 1693, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29 (6): 953–962, 2009.
- [34] Ansal, A., Kurtuluş, A., Tönük G., Seismic microzonation and earthquake damage scenarios for urban areas, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (11): 1319-1328, 2010.

- [35] Eskişar, T., Kuruoğlu, M., Altun, S., Özyalın, Ş., Yılmaz, H.R., Site response of deep alluvial deposits in the northern coast of İzmir Bay (Turkey) and a microzonation study based on geotechnical aspects. *Engineering Geology* 172, 95–116, 2014.
- [36] Kırıkkale Valiliği Çevre Ve Şehircilik İl Müdürlüğü İl Çevre Durum Raporu, Kırıkkale, 2011.
- [37] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 2015.
- [38] Seymen, İ., Kaman dolayında Kırşehir masifinin jeolojisi: İstanbul Tek. Üniv. Maden Fak., Doçentlik Tezi, 164 (yayımlanmamış). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1982.
- [39] Dönmez, M., Akçay, A.E., Kara H., Yergök. A.F., Esentürk, K., Türkiye Jeoloji Haritaları Kırşehir İ-30 Paftası, MTA, Ankara, 2008.
- [40] Rigo de Righi, M., Cortesini, A., Regional studies central Anatolian basin, progress report Turkish Gulf oil Comp. Petrol işleri Gen. Müd. (yayımlanmamış), Ankara, 1959.
- [41] Birgili, Ş., Yoldaş, R., Ünalın, R., Çankırı-Çorum havzasının jeolojisi ve petrol olanakları, MTA RAP. No:5621 (yayımlanmamış), Ankara.
- [42] Dönmez, M., Akçay, A.E., Kara H., Yergök. A.F., Esentürk, K., Türkiye Jeoloji Haritaları Kırşehir İ-31 Paftası, MTA, Ankara, 2008.

- [43] Koçyiğit, A., “Ankara ve Çevresinin Deprem Kaynakları”, Ankara’nın Deprem Tehlikesi ve Riskleri Çalıştayı, Ankara, s. 33-53, 2008.
- [44] Seyitoğlu, G., Kazancı, N., Karakuş, K., Fodor, L., Araz, H, Karadenizli, L., Does Continuous Compressive Tectonic Regime Exist During Late Palaeogene to Late Neogene in NW Central Anatolia, Turkey? Preliminary Observations, Turkish Journal of Earth, 6, 77-83, 1997.
- [45] Seyitoğlu, G., Kazancı, N., Karadenizli, L., Şen, Ş., Varol, B., Saraç, G., Neogene Tectono-Sedimentary Development of the Western Margin of the Çankırı Basin, Central Turkey: Reply to the Comment of Kaymakçı 2003, Terra Nova, 16 (3): 163-165, 2004.
- [46] Seyitoğlu, G., Işık, V., Kırman, E., İleri, İ., Gölbaşı – Elmadağ Güneyinin Neotektonik Özellikleri, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Kesin Raporu, 23, Ankara, 2006.
- [47] Seyitoğlu, G., Ecevitoglu, B., Işık, V., Esat, K., Akkaya, İ., Sağol, Ö., Yuvaköy (Ankara) Kuzeyinde Üst Kretase Ofiyolitik Melanj ile Miyosen Birimler Arasındaki Tektonik Sınırın Niteliği Hakkında Jeolojik ve Jeofizik Veriler, Hacettepe Üniversitesi, 2006.
- [48] Koçyiğit, A., 2008. Ankara’nın depremselliği ve 2005-2007 Afşar (Bala-Ankara) Depremlerinin kaynağı, MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 1-7, 2008.

- [49] A. Karaca, "Post-Miocene Deformation of the Area Between Alibey (Kızılcahamam) and Karalar (Kazan) Villages, NW Ankara (Turkey)", Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2004.
- [50] Şengör, A. M. C., Görür, N. and Şaroğlu, F., Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation, Soc. Econ. Paleont. Min. Spec. Pub. 37, 1985.
- [51] Şengör, A.M.C., The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. Journal of Geological Society of London, 136 (3): 269-282, 1979.
- [52] Dirik, K. ve Erol, O. Tuzgözü ve Civarının Tektonomorfolojik Evrimi, Orta Anadolu-Türkiye. Türkiye Petrol Jeologları Derneği, Özel Sayı 5, 27-46, 2000.
- [53] Dirik, K. and Göncüoğlu, M.C. Neotectonic Characteristics of Central Anatolia. International Geology Review, 38 (9): 807-817, 1996.
- [54] Şaroğlu, F., Emre, Ö., Boray, A., Türkiye Diri Fayları ve Depremsellikleri, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etüdüleri Dairesi Rapor No: 8174, Ankara, 1987.
- [55] Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Kuşçu, İ. Türkiye Diri Fay Haritası. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 1992.

- [56] Koçbulut, F., Kavak, K.S. and Tatar, O. Structural and lithological features around the Göynücek (Amasya) region and highlighting Ezinepazarı-Sungurlu splay of NAFZ using Landsat TM imagery. International Workshop on the North Anatolian, East Anatol, ODTÜ, Ankara, 2003.
- [57] Şengör, A.M.C., Tüysüz, O., İmren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X. and Rangin, C. The North Anatolian Fault: A New Look. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 33, 37-112, 2005.
- [58] Bozkurt, E., Neotectonics of Turkey – A synthesis. Geodinamica Acta, 14 (1-3): 3-30, 2001.
- [59] Gökten, E., Varol, B., Bölgenin Genel Jeolojisi ve Sismik Kaynakları, Ankara Kenti Batısındaki Zeminlerin Jeolojik-Jeofizik-Jeoteknik Özellikleri ve Dinamik Davranışı, Ankara Üniversitesi Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi, Ankara, 2010.
- [60] Seyitoğlu, G., Ankara Civarındaki Neotektonik Yapılar: Eldivan- Elmadağ Tektonik Kaması ve Kırıkkale – Erbaa Fayı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Teknik Geziler Serisi – 4, 2007.
- [61] Meydan, M., Gökten, E., Delice – Çerikli – Salmanlı (Kırıkkale) Arasındaki Bölgenin Neotektoniği ve Depremselliği, ATAG-9: Aktif Tektonik Araştırma Grubu 9. Toplantısı, Bildiri Özleri Kitabı, 49, 2005.

- [62] Koçyiğit, A. Orta Anadolu'nun genel Neotektonik Özellikleri ve Depremselliği. Haymana-Tuzgözü-Ulukışla Basenleri Uygulamalı Çalışma, TPJD, Özel sayı:5, s.1-26, 2003.
- [63] Dirik, K., Kırşehir Yöresinin Jeolojisi ve Neotektoniği, Kırşehir'in Depremselliği ve Alınabilecek Önlemler Paneli Kitabı, s. 28-37, 1998.
- [64] Seyitoğlu, G., Kaypak, B., Işık, V., Esat, K., Çıvgın B., Ankara Civarında Anadolu Levhasının İç Deformasyonunun Jeolojik ve Sismolojik Yöntemlerle Araştırılması, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Kesin Raporu, 2011.
- [65] Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D., Altınok, Y., Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Kataloğu, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, Proje no: TBAG 341s. 1981.
- [66] Ambraseys, N.N., Jackson, J.A., Melville, C.P., Historical Seismicity and Tectonics: The Case of the Eastern Mediterranean and the Middle East, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A. Academic Press, Amsterdam, s. 747-763, 2002.
- [67] Ambraseys, N.N., Jackson, J.A., Faulting Associated with Historical and Recent Earthquakes in the Eastern Mediterranean Region, Geophys. J.Int., 133, 390-406, 1998.
- [68] Ambraseys, N.N., Finkel, C.F., The Anatolian Earthquake of 17 August 1668, Historical Seismograms and Earthquakes of the World, Academic Press, 173-180, 1998.

- [69] Ambraseys, N.N., Finkel, N.N., Türkiye’de ve Komşu Bölgelerde Sismik Etkinlikler Bir Tarihsel İnceleme 1500 – 1800, TUBİTAK Akademik Dizi 4, 252s, 2006.
- [70] Öcal, N., “Türkiye’nin Sismisitesi ve Zelzele Coğrafyası 1850 – 1960 Yılları İçin Türkiye Zelzele Kataloğu”, Milli Eğitim Bakanlığı İstanbul Kandilli Rasathanesi Sismoloji Yayınları, 8, 119s., 1968.
- [71] Ergin, K., Güçlü, U., Uz, Z., Türkiye ve Civarının Deprem Kataloğu, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Arz Fiziği Enstitüsü Yayınları No:24., 1967.
- [72] Parejas, E., Pamir, H. N., 19 Nisan 1938 Orta Anadolu yer depremi İst. Üniv, Fen. Fak. Yayınları, seri B., 4 (3/4): 1939.
- [73] Özmen, B. ve Kocaefe, S., The Seismicity and Earthquake Hazard of Ankara, International Workshop on Recent Earthquakes and Disaster Prevention Management, 10-12 Mart, ODTÜ, Ankara, 1999.
- [74] Pamir, H., Dinamik Jeoloji, Cilt II, İstanbul Üniversitesi Yayınları, 1948.
- [75] Salomon – Calvi, W., Kleinsorge, H., 19 Nisan 1938 Tarihli Kırşehir Zelzelesi ve Zelzele Mıntıklarında İnşaat ile İskan Hususunda Jeolojik Teklifler, Türkiye’deki Zelzelelere Müteallik Etüdler, Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü yayınlarından, B (5): 5-33, 1940.

- [76] Pınar, N., Lahn, E., Türkiye Depremleri İzahlı Kataloğu, Bayındırlık Bakanlığı Yapı ve İmar İşleri Reisiği Yayınlarından, 6 (36): 153, 1952.
- [77] Ambraseys, N.N., Engineering Seismology, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Special Issue, 17(1), 1-105, 1988.
- [78] Gençoğlu, S., Deprem Katalogu (Yayımlanmamış), 1986.
- [79] Ketin, İ., Kuzey Anadolu Fayı Hakkında, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 7, 1-27, 1969.
- [80] Pınar, N., 13 Ağustos 1951 Kurşunlu Depreminin Jeolojik ve Makrosismik Etüdü, Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 4824-1, Ankara, 1951.
- [81] Koçyiğit, A., Rojay, B., Cihan, M., Özacar, A., The June 6, 2000 Orta (Çankırı, Turkey) Earthquake: Sourced from a New Antithetic Sinistral Strike Slip Structure of the North Anatolian Fault System, the Dodurga Fault Zone, Turkish Journal of Earth, 2001.
- [82] AFAD (Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı), 2010 Deprem Yıllığı, (Editörler: Kenan Yanık, Bengi Eravcı), Deprem Dairesi Başkanlığı, s. 40-45, 2011.
- [83] Özmen, T.Ö., Kuru, T., Doğan, İ., Alkan, A.M, Apak, A., Denizlioğlu, Z.A., İravul, Y., Tüzel, B., Yaşar, A., Şahin, C., Tengilimoğlu, E., 20 Aralık 2007

ML = 5.6 Bala (Ankara) Depremi Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları ve Deprem Acil Gözlem (DEPAR) Çalışmaları, 61. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara, 82 s 2008.

[84] Zünbül, S., Kadirioğlu, T.F., Deprem Araştırma Dairesi Rapor No: 6052-1, 25s., 2008.

[85] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

[86] ASTM D 5777-00, Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

[87] Stam, J.C., Modern developments in shallow seismic refraction techniques. *Geophysics*, 272, 198-212, 1962.

[88] Redpath, B.B., Seismic refraction exploration for engineering site investigations. Technical Report E-73-4, U.S. Army Waterways Experimentation Station, California 60s., 1973.

[89] Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D., *Vibrations of soils and foundations*, Prentice Hall, 1970.

[90] Kramer, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*. PrenticeHall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.

- [91] McGillivray, A.V., Enhanced integration of shear wave velocity profiling in directpush site characterization systems. Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, 2007.
- [92] Park, C.B., Miller, R.D. ve Xia, J. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64, 800-808, 1999.
- [93] M.Ö. Arısoy, İ. Akkaya ve Ü. Dikmen “Aktif Kaynaklı Yüzey Dalgası (Masw) Yönteminde Farklı Doğrusal Dizilimlerin Spektral Çözünürlülüğü” 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim Ankara, 2011.
- [94] Louie, J.N., Faster, Better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 347-364, 2001.
- [95] Chen, W.F., Scawthorn, C., *Earthquake Engineering Handbook*, CRC Press, 2002.
- [96] Kramer, S.L., CEE 526 Geotechnical Earthquake Engineering lecture notes, University of Washington, Seattle, WA-USA., 2009.
- [97] Ansal, A., Biro, Y., Erken, A., Gülerce, Ü., Seismic microzonation: a case study, *Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 253-266, 2004.

- [98] Sitharam, T.G., Anbazhagan, P., Seismic hazard analysis for Bangalore Region, *Journal of Natural Hazards*, 40, 261-278, 2007.
- [99] Gülkan, P., Koçyiğit, A., Yücemem, S.Y., Doyuran, V., Başöz, N., En son verilere dayanan Türkiye deprem bölgeleri haritası, ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Rapor No. 93-01. 156s., 1993.
- [100] Kayabalı, K., Akin, M., Seismic hazard map of Turkey using the deterministic approach. *Engineering Geology*, 69 (1/2), 127-137, 2002.
- [101] Genç, G., Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Eskisehir. M.Sc. Dissertation, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2004.
- [102] Das, S., Gupta, I. D., and Gupta, V. K., A Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Northeast India. *Earthquake Spectra*, 22, 1-27, 2006.
- [103] Kalkan, E., Gülkan, P., Öztürk, N.Y., Çelebi, M., Re-examination of probabilistic seismic hazard in the Marmara Sea Region. *Bulletin of Seismological Society of America*, 994, 2127-2146, 2009.
- [104] Sitharam, T.G., Anbazhagan, P., Seismic hazard analysis for Bangalore Region, *Journal of Natural Hazards*, 40, 261-278, 2007.
- [105] Cornell, C.A., Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606, 1968.

- [106] Özçep, F., Mikrobölgeleme: İlkeler ve Uygulamalar, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası, 211 s., ISBN No: 978-9944-89-231-5, Ankara, 2007.
- [107] European-Mediterranean Seismological Center, <http://www.emsc-csem.org> (Erişim Tarihi: 15.01.2016).
- [108] Deniz, A., Yüçemen, M.S., Magnitude conversion problem for the Turkish earthquake data, *Nat. Hazards*, 55, 333–352, 2010.
- [109] Yüçemen M.S., Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi: Genel Bakış ve Yeni Nesil Deprem Tehlike Haritaları, 7. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 2011.
- [110] J. F. M. Van Dyck, *Statistical Analysis of Earthquake Catalogs*, Ph.D. Thesis, Civil Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1985.
- [111] Utsu, T., Ogata, Y., Matsu'ura, R. S. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *Journal of Physics of the Earth* 43, 1-33, 1995.
- [112] Savage, M. K. ve Rupp, S. H. Foreshock probabilities in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 43, 461-469, 2000.
- [113] A. Deniz, *Estimation of Earthquake Insurance Premium Rates for Turkey*. Yüksek Lisans Tezi. ODTÜ, Ankara, 2006.

- [114] Gutenberg, B., Richter, C.F., Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration, Bulletin Seismological Society of America, 323, 163-191, 1942.
- [115] Gutenberg, B., Richter, C.F., Frequency of Earthquakes in California, Bulletin of the Seismological Society of America, 34, 185–188, 1944.
- [116] Gutenberg, B., Richter, C.F., Magnitude and Energy of Earthquakes, Ann.Geofis., 9, 1-15, 1956.
- [117] Richter, C. F. Elementary Seismology, W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1958.
- [118] M. Akin, Seismic Microzonation Of Erbaa (Tokat-Turkey) Located Along Eastern Segment Of The North Anatolian Fault Zone Nafz, Doktora Tezi, ODTÜ, Ankara, 2010.
- [119] Elnashai, A., Sarno L.D., Fundamentals of Earthquake Engineering. John Wiley & Sons Inc, 2008.
- [120] Naeim, F., The Seismic Design Handbook. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001.
- [121] Joyner, W.B., Boore, D.M., Peak horizontal acceleration and velocity from strongmotion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 71(6): 2011-2038, 1981.

- [122] Campbell, K.W., The dependence of peak horizontal acceleration on magnitude, distance, and site effects for small-magnitude earthquakes in California and eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 795, 1311-1346, 1989.
- [123] Ambraseys, N.N., Bommer, J.J., The attenuation of ground accelerations in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20 (12): 1179-1202, 1991.
- [124] Ohno, S., Takemura, M., Niwa, M., Takahashi, K., Intensity of strong ground motion on prequaternary stratum and surface soil amplifications during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan. *Journal of Physics of the Earth*, 445, 623-648, 1996.
- [125] Aydan, Ö., Sezaki, M., Yarar, R., The seismic characteristics of Turkish earthquakes. 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico. 1996.
- [126] Aydan, Ö., The seismic characteristics and the occurrence pattern of Turkish earthquakes. Turkish Earthquake Foundation Report No.TDV/TR 97-007, 41s., 1997.
- [127] Sadigh, R.K., Egan, J.A., Updated relationships for horizontal peak ground velocity and peak ground displacement for shallow crustal earthquakes. In: *Proceedings of the Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 1998.

- [128] Kalkan, E., Gulkan, P., Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey. *Earthquake Spectra* 20 (4): 1111-1138, 2004.
- [129] Ulusay, R., Kuru, T., 1998 Adana-Ceyhan (Turkey) earthquake and a preliminary microzonation based on liquefaction potential for Ceyhan town. *Natural Hazards*, 32 (1): 59-88, 2004.
- [130] Özbey, C., Sari, A., Manuel, L., Erdik, M., Fahjan, Y., An empirical attenuation relationship for Northwestern Turkey ground motion using a random effects approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 115-125, 2004.
- [131] Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K., Smit, P.M., Equation for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3 (1): 55-73, 2005.
- [132] Akkar, S., Bommer, J.J., Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (2): 511-530, 2007.
- [133] Güllü, H., Erçelebi, E., A neural network approach for attenuation relationships: An application using strong ground motion data from Turkey. *Engineering Geology*, 93 (3-4): 65-81, 2007.
- [134] Kayabalı K, Beyaz T., Strong motion attenuation relationship for Turkey-a different perspective. *Bull Eng Geol Environ*, 70: 467–481, 2011.

- [135] Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set, , Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, PEER Report No: 2013/04, 137s., 2013.
- [136] NGA-West2 Equations for Predicting Response Spectral Accelerations for Shallow Crustal Earthquakes. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, PEER Report No: 2013/05, 93s., 2013.
- [137] NGA-West2 Campbell-Bozorgnia Ground Motion Model for the Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-Damped Elastic Pseudo-Acceleration Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 sec. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, PEER Report No: 2013/06, 102s., 2013.
- [138] Update of the Chiou and Youngs NGA Ground Motion Model for Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report No: 2013/07, University of California, 75s. 2013.
- [139] NGA-West2 Model for Estimating Average Horizontal Values of Pseudo-Absolute Spectral Accelerations Generated by Crustal Earthquakes. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report No. 2013/08, University of California, 27s. 2013.
- [140] Convertito, V., Iervolino, I., Zolloc, A., Manfredi, G., Prediction of response spectra via real-time earthquake measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28 (6): 492–505, 2008.

- [141] Mohraz, B., Recent studies of earthquake ground motion and amplification. Proc. 10th World Conf. Earthquake Eng., Madrid, Spain, s. 6695-6704, 1992.
- [142] Campbell, K.W., Bozorgnia, Y., NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD, and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24 (1): 139-171, 2008.
- [143] Ansal, A., Tonuk, G., Source and site factors in microzonation. In: Pitilakis, K.D.(ed.), *Earthquake Geotechnical Engineering, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering-Invited Lectures*, s 73-92, 2007.
- [144] Iervolino, I., Cornell, C.A. Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra*, 21 (3): 685-713, 2005.
- [145] PEER Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu>, 01.10.2015, 2015.
- [146] Fahjan, Y., Ozdemir , Z., Scaling of earthquake accelerograms for non-linear dynamic analyses to match the earthquake design spectra. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Ekim 2008, Beijing-Çin, 2008.
- [147] Technical Report for the PEER Ground Motion Database Web Application Beta Version – Ekim, 2010.
- [148] Abrahamson, N.A., Non-Stationary Spectral Matching Program RSPMATCH, User Manual, Temmuz 1993.

- [149] Unutmaz, B., Siyahi, B., Fahjan, Y., Akbaş, B., Derin alüvyon dolgunun doğrusal olmayan davranışının eşdeğer lineer ve doğrusal olmayan yöntemlerle karşılaştırılması. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim 2011, Ankara, 2011.
- [150] Stewart, J.P., Liu, A.H., Choi, Y., Amplification factors for spectral acceleration in tectonically active regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93 (1), 332-352, 2003.
- [151] Burland, J.B., Small is beautiful: the stiffness of soils at small strains. *Canadian Geotechnical Journal*, 26 (4), 499-516, 1989.
- [152] Mayne, P.W., Schneider, J.A., Martin, G.K., Small- and large strain soil properties from seismic flat dilatometer tests. *Proceedings of 2nd Int. Symp. on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Torino, s. 419-427, 1999.
- [153] Dobry, R., Borcherdt, R.D., Crouse, C.B., Idriss, I.M., Joyner, W.B., Martin, G.R., Power, M.S., Rinne, E.E., Seed, R.B., New site coefficient and site classification system used in recent building code provisions. *Earthquake Spectra* 16 (1): 41-67, 2000.
- [154] McGillivray, A.V., Mayne, P.W., Seismic piezocone and seismic flat dilatometer tests at Treporti. *Proceedings of 2nd Int. Conf. on Site Characterization*, Porto, s. 1695-1700, 2004.

- [155] Hanumantharao, C., Ramana, G.V., Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India. *J. Earth Syst. Sci.*, 117 (2): 719-730, 2008.
- [156] Vucetic, M., Dobry, R., Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 117 (1): 89-107, 1991.
- [157] Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., Tokimatsu, K., Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 112 (11): 1016-1032, 1986.
- [158] Ohta, Y., Goto, N., Estimation of s-wave velocity in terms of characteristics indices of soil. *Butsuri-Tanku*, 29 (4): 34-41, 1976.
- [159] Vucetic, M., Dobry, R., Degradation of marine clays under cyclic loading. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 114 (2): 133-149, 1988.
- [160] M.B. Darendeli, Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Ph.D. dissertation, University of Texas at Austin, Austin, 2001.
- [161] Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., Tokimatsu, K., Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 112 (11): 1016-1032, 1986.

- [162] Sun, J.I., Golesorkhi, R., Seed, H.B., Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils. Earthquake Engineering Research Center, Report No: UCB/EERC-88/15, 45s., 1988.
- [163] Luna, R., Jadi, H., Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods. Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, Aralık 2000, Saint Louis, 2000.
- [164] Dobry, R., Vucetic, M., Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits. Proceedings International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Ağustos 1987, Mexico City, s. 51-87, 1987.
- [165] İyisan, R., Zeminlerde kayma dalgası hızı ile penetrasyon deney sonuçları arasındaki bağıntılar, İMO Teknik Dergi, 7(2): 1187-1199, 1996.
- [166] BSSC, NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 368), 2000 Edition, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, Washington D.C. 2001.
- [167] BSSC, NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA 450), 2003 Edition, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C. 2003.
- [168] DBYBHY (2007) Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.

- [169] Phillips, C., Hashash, Y.M.A., Damping formulation for nonlinear 1-D site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29: 1143-1158, 2009.
- [170] Arduino, P., Kramer, S.L., Site response. In: CEE 526 Geotechnical Earthquake Engineering lecture notes, University of Washington, Seattle, WA-USA, 2009.
- [171] Roca, A., Oliveira, C.S., Ansal, A., Figueras, S., Local site effects and microzonation. In: Oliveira, C.S., Roca, A., Goula, X. (eds.), *Assessing and Managing Earthquake Risk*, s.67-89, 2006.
- [172] Schnabel PB, Lysmer J, Seed HB SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. UCB/EERC-72/12, University of California, Berkeley, USA, 1972.
- [173] Ordonez, G.A., Shake2000 A computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems. GeoMotions, LLC; Lacey, Washington, USA, 2012.
- [174] EPRI, Guidelines for determining design basis ground motions. Vol. 1: Method and guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America, Rpt. No. EPRI TR-102293, Palo Alto, California, 1993.
- [175] Belediyeler için Sismik Mikrobölgeleme El Kitabı, Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 2004.

- [176] Kramer, S.L., Oral communication. University of Washington, Department of Civil and Environmental Engineering, 2009.
- [177] Pitilakis, K., Site effects. In: Ansal, A. (Ed.), Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, s.139-197, 2004.
- [178] Kramer, S.L., Stewart, J.P., Geotechnical aspects of seismic hazards. In: Bozorgnia, Y, and Bertero, V.V. (eds.), Earthquake engineering from engineering seismology to performance-based engineering, CRC Press, 85 s 2004.
- [179] Midorikawa, S., Prediction of isoseismal map in the Kanto plain due to hypothetical earthquake. Journal of Structural Engineering, 33B, s. 43-48, 1987.
- [180] Joyner, W.B., Fumal, T.E., Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion. In: Proceedings of Eighth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, s. 777-783, 1984.
- [181] Borchardt, R.D., Wentworth, C.M., Janssen, A., Fumal, T., Gibbs, J., Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground shaking in the San Francisco Bay Region. Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation, 3, s. 545-552, Stanford, 1991.
- [182] TCEGE, Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. Publication of the Japanese Geotechnical Society, Revised Version. 209 s., 1999.

- [183] Sözen, M. A., and A. F. Hassan, Seismic Vulnerability Assessment of Low Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes, *ACI Structural Journal*, 94 (1): 31-39, 1997.
- [184] Gülkan, P., and M. A. Sözen, Procedure for Determining Seismic Vulnerability of Building Structures, *ACI Structural Journal*, 96 (3): 336-342, 1999.
- [185] Sucuoglu, H., and U. Yazgan, Simple Survey Procedures for Seismic Risk Assessment in: Urban Building Stocks, *Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings*, NATO Science Series IV, 29: 97-118, 2003.
- [186] Federal Emergency Management Agency, FEMA 154: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards - A Handbook, Washington D.C., 1988.
- [187] Federal Emergency Management Agency, FEMA 310: Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings -A Prestandard, Washington D.C., 1998.
- [188] Özcebe, G., Yüçemen, M. S., Aydoğan, V., and A. Yakut, Preliminary Seismic Vulnerability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings in Turkey- Part I: Statistical Model Based on Structural Characteristics. *Nato Science Series*, 29: 29-42, 2003.
- [189] Yakut, A., Aydoğan, V., Özcebe, G., and M. S. Yüçemen, Preliminary Seismic Vulnerability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings in Turkey –Part II: Inclusion of Site Characteristics, *Nato Science Series*, 29: 43-58, 2003.

- [190] G. Özcebe, H. Sucuoglu, M. S. Yüçemen, A. Yakut, and J. Kubin, Seismic Risk Assessment of Existing Building Stock in İstanbul A Pilot Application in Zeytinburnu District, "8NCEE", s. 1737, 2006.
- [191] Applied Technology Council, ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Washington D.C., 1996.
- [192] Federal Emergency Management Agency, FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington D.C., 2000.
- [193] European Committee for Standardization, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 3: Strengthening and repair of buildings - Draft No:7, Brussels, 2004.
- [194] Sucuoglu, H., Gur, T., and M. S. Gunay, Performance-based seismic rehabilitation of damaged reinforced concrete buildings, Journal of Structural Engineering-ASCE, 130 (10): 1475-1486, 2004.
- [195] Sucuoğlu, H., Kentsel Yapı Stoklarında Deprem Risklerinin Sokaktan Tarama Yöntemi ile Belirlenmesi” Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul, 2007.
- [196] Çağatay, İ. H., Binalarda Kısa Kolona Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul, 2007.

- [197] Çağatay İ.H., Failure Of An Industrial Building During A Recent Earthquake In Turkey, *Engineering Failure Analysis*, 12: 497-507, 2004.
- [198] Wald, D. J., Quiriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H., Scrivner C. W. and Worden, C. B., Trinet Shake Maps: rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in Southern California, *Earthquake Spectra*, 15 (3): 537-555, 1999.
- [199] Saez E, Caballero F.L., Razavi, A.M.F., Inelastic dynamic soil-structure interaction effects on moment-resisting frame buildings. *Engineering Structures*, 51: 166-177, 2013.
- [200] M. Kutanis, Yapı Zemin Dinamik Etkileşimi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya 2001.
- [201] Saez, E., Caballero F. L., Razavi A. M. F., Effects of non-linear soil behavior on the seismic performance evaluation of structures. *Rivista Italiana Di Geotecnica*, Bucharest, 2: 63-76, 2008.
- [202] Sezer, F., Gençoğlu M., Celep Z., A Comparative study of seismic safety evaluation of concrete buildings according to Turkish Seismic Code (2007) Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 ekim 2007, İstanbul, 2007.
- [203] ATC40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Applied Technology Council, California, 1996.

- [204] FEMA273 Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, 1997.
- [205] FEMA356 Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, 2000.
- [206] FEMA440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington, 2005.
- [207] SAP2000, CSI., Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Berkeley, USA.
- [208] Fahjan, Y.M., Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi, İMO Teknik Dergi, 4423-4444, 2008.
- [209] Seismomatch Software, <http://www.seismosoft.com/seismomatch>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Yetiş Bülent SÖNMEZER

Doğum Tarihi :05.02.1974

Yabancı Dil :İngilizce

Eğitim Durumu :

Lisans :Fırat Üniversitesi, Jeoloji Müh. 1996

Yüksek Lisans :Kırıkkale Üniversitesi, İnşaat Müh. 2009

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar : Kırıkkale Belediyesi 1999-2000