

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YEREL ARAZİ ETKİLERİNİN BİR VE İKİ BOYUTLU
ANALİZLERLE İNCELENMESİ

İnşaat Mühendisi Pelin KALE

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 İnceleme Alanında Daha Önce Yapılan Çalışmalar	2
1.3 Bölgenin Yeraltı Suyu Durumu ve Depremsellliği	5
2. YEREL ZEMİN KOŞULLARININ DEPREM ÜZERİNDEKİ ETKİSİ VE ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ	11
2.1 Giriş	11
2.2 Yerel Zemin Şartlarının Yer Hareketi Üzerindeki Etkileri	11
2.3 Mexico City, 1985	13
2.4 San Francisco Körfez Bölgesi, 1989	17
2.5 Zemin Davranış Analizleri	19
2.5.1 Bir Boyutlu Yer Tepki Analizi	20
2.5.1.1 Bir Boyutlu Yer Tepki Analizi İçin Nümerik Formülasyonlar	20
2.5.2 İki Boyutlu Yer Tepki Analizi.....	23
2.5.3 Üç Boyutlu Yer Tepki Analizi	24
2.6 Yüzey Topoğrafya'sının Yer Hareketi Üzerindeki Etkisi.....	24
2.7 1966 Duvall Depreminde Fraser Deltasındaki Yer Hareket Verilerinin Bir ve İki Boyutlu Analizleri	26
2.7.1 Delta'nın Jeolojisi.....	27
2.7.2 Kuvvetli Hareket Verileri.....	29
2.7.3 Bir Boyutlu Analiz Sonuçları	30
2.7.4 İki Boyutlu Tepki Analizleri	34
2.7.4.1 İki Boyutlu Analiz Sonuçları.....	34
2.7.5 Sonuçlar	36
3. İNCELEME ALANINDA YAPILAN DİNAMİK ANALİZLER.....	37
3.1 EERA (2000) Programı.....	37
3.2 Sönüm	40
3.3 DEEPSOIL Programı.....	43

3.3.1	Tekrarlı Yüklemede Zemin Tepkisi.....	43
3.3.2	Deepsoil Programını Kullanarak Modelleme Yapmak.....	46
3.4	PLAXIS Programı	54
3.4.1	Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model)	54
3.4.2	Küçük Şekil Değişirme Rijitliğini İçeren Sertleşen Zemin Modeli (HSsmall)....	55
3.4.2.1	Küçük Şekil Değişirme Rijitliğinin Tanımlanması	56
3.4.2.2	HSsmall Model Parametreleri	57
3.4.3	Plaxis Programını Kullanarak Modelleme Yapmak.....	59
4.	İNCELEME ALANININ JEOLJİSİ	70
4.1	Genel Jeoloji.....	70
4.2	İnceleme Alanındaki Formasyonların Geoteknik Özellikleri	73
5.	ANALİZLERDE KULLANILAN MALZEME PARAMETRELERİ.....	78
5.1	Kayma Dalgası Hız Profilleri	78
5.2	Anakaya Seviyesinde girilen Yer Hareketi.....	89
6.	ANALİZLERİN KALİBRASYONU	90
7.	ANALİZLER VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	95
8.	SONUÇLAR	142
	KAYNAKLAR.....	145
	ÖZGEÇMİŞ.....	147

SİMGE LİSTESİ

V_s	Kayma dalgası hızı
ρ	Zemin yoğunluğu
γ	Birim hacim ağırlık
ζ	Sönüm oranı
T_s	Karakteristik zemin periyodu
τ	Kayma gerilmesi
η	Viskozite
G	Kayma modülü
c	Viskoz sönümleme
u	Yer değiştirme
f	Frekans
T	Periyot
$S(T)$	Spektral ivme
G_s	Sekant kayma modülü
τ_c	Kayma gerilmesi genliği
γ_c	Şekil değiştirme genliği
W_D	Yutulan enerji
W_S	Maksimum birim kayma enerjisi
$[M]$	Kütle matrisi
$[C]$	Sönüm matrisi
$[K]$	Rijitlik matrisi
α, β	Rayleigh sönüm katsayıları
ω	Açısal frekans
E_{50}^{ref}	Standart üç eksenli deneydeki sekant modülü
E_{oed}^{ref}	Birincil ödometre yüklemesi için tanjant modülü
E_{ur}^{ref}	$\varepsilon \approx 10^{-3}$ ve 10^{-2} arasındaki yükleme-boşaltma modülü
ν_{ur}^{ref}	Yükleme-boşaltma için Poisson oranı
G_o^{ref}	Çok küçük şekil değiştirmelerdeki referans kayma modülü
$SPT(N)$	Standart Penetrasyon deneyi darbe sayısı

KISALTIMA LİSTESİ

UNAM	Universidad Nacional de Mexico
SCT	Secretary of Communications and Transportation
GSC	Kanada Jeolojik Araştırma Kurumu
1D	Bir Boyutlu
2D	İki Boyutlu
3D	Üç Boyutlu
DSİ	Devlet Su İşleri
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
JICA	Japan International Cooperation Agency
EERA	Equivalent Linear Earthquake Response Analyses
MC	Mohr-Coulomb
SSC	Soft Soil Creep Model
HSsmall	Küçük Şekil Değiştirme Rijitliğini içeren Pekleşen Zemin Modeli
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
CORSSA	Corinth Soft Soil Array
PGA	Peak Ground Acceleration

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 İnceleme alanı ana kaya derinlik haritası (Özaydın vd., 2004)	3
Şekil 1.2 İnceleme alanında değerlendirilen sondajların coğrafi konumları ve hücreler (Özaydın vd., 2004).....	4
Şekil 1.3 İnceleme alanı eğim haritası (Özaydın vd., 2004)	6
Şekil 1.4 İnceleme alanı için anakaya seviyesinde belirlenen en büyük ivme (PGA) değerleri (Özaydın vd.,2004).....	7
Şekil 1.5 Türkiye Deprem Yönetmeliği'ne göre yerel zemin sınıfları (Özaydın vd., 2004)	8
Şekil 1.6 Yerel Zemin Sınıflarının NEHRP'e göre bölgenmesi (Özaydın vd., 2004).....	9
Şekil 1.7 Eşdeğer kayma dalgası hızına göre inceleme alanının bölgenmesi (Özaydın vd., 2004).....	10
Şekil 2.1 Rijit anakaya üzerindeki iki kuramsal zemin çökeli: (a) A sahası; (b) B sahası (Kramer, 1996).....	12
Şekil 2.2 A ve B sahaları için büyütme faktörleri (Joyner vd., 1976'dan).	12
Şekil 2.3 1957 San Francisco depreminde San Francisco'da 4 mil'lik hat boyunca spektral hız, spektral ivme ve spektral yerdeğiştirmenin değişimi (Idriss ve Seed, 1968'den).....	13
Şekil 2.4 Mexico City'de kuvvetli hareketi cihazları ve jeoteknik şartlar: (a) kuvvetli hareket cihazlarının Foothill, Geçiş ve Göl kuşaklarına göre konumu; (b) yumuşak zeminin kalınlık konturları (Stone vd., 1987'den).....	15
Şekil 2.5 UNAM ve SCT sahalarındaki kuvvetli yer hareketi cihazları ile kaydedilmiş ivmenin zamana göre değişimi (Stone vd.,1987'den).....	15
Şekil 2.6 UNAM ve SCT sahalarda kaydedilen hareketlerden hesaplanan tepki spektrumları (Romo ve Seed, 1986'dan)	16
Şekil 2.7 1989 Loma Prieta depremi sırasında San Francisco Körfez bölgesinde ölçülen pik yatay ivmeler (g cinsinden) (Değişik saha şartlarında pik ivmedeki değişime dikkat ediniz.) (Seed vd., 1990'dan).	17
Şekil 2.8 1989 Loma Prieta depreminde Yerba Buena ve Treasure adalarında zemin yüzeyi hareketleri: (a) zamana göre değişimleri; (b) tepki spektrumları (Seed vd., 1990'dan).....	18
Şekil 2.9 Yer yüzeyine yakın kesimde yaklaşık olarak düşey dalga yayılması oluşturan kırılma süreci	20
Şekil 2.10 Yatay katmanlanmış zeminde çok serbestlik dereceli model.	21
Şekil 2.11 Tipik olarak iki boyutlu düzlemsel birim deformasyon dinamik tepki analizleri ile	

çözülen yaygın problemler (a) konsol palplanş perde;(b) toprak dolgu baraj;(c) tünel.....	23
Şekil 2.12 Üç boyutlu dinamik tepki veya zemin yapı etkileşim analizi gerektiren üç durum: (a) zemin şartlarının üç boyutta önemli olarak değiştiği saha; (b) dar vadideki toprak dolgu baraj; (c) zemin tepkisinin yapıların tepkisinden etkilendiği saha.	24
Şekil 2.13 (a) Zemin modeli, (b) 2D analizlerde oluşturulan model	25
Şekil 2.15 a,d,e modelleri için kesit boyunca maksimum yatay ve düşey ivmeler.	26
Şekil 2.16 a,d,c,b modelleri için kesit boyunca maksimum yatay ve düşey ivmeler.	26
Şekil 2.17 Tersiyer ana kayanın derinliği	28
Şekil 2.18 Holosen çökellerinin kalınlıkları.....	28
Şekil 2.19 A-A' Enkesiti	29
Şekil 2.20 180° Bileşeni için Hesaplanmış İvme Spektrumu ile Kaydedilen İvme Spektrumunun Karşılaştırılması	31
Şekil 2.21 270° Bileşeni için Hesaplanmış İvme Spektrumu ile Kaydedilen İvme Spektrumunun Karşılaştırılması	31
Şekil 2.22 RHA istasyonunda hesaplanan ve kaydedilen ivme spektrumlarının karşılaştırılması (a) RHA 0°, (b) RHA 270°	32
Şekil 2.23 0° Bileşeni için Hesaplanmış İvme Spektrumu ile Kaydedilen İvme Spektrumunun Karşılaştırılması	33
Şekil 2.24 270° Bileşeni için Hesaplanmış İvme Spektrumu ile Kaydedilen İvme Spektrumunun Karşılaştırılması	34
Şekil 2.25 MNY istasyonundaki ivme spektrumunun karşılaştırılması.....	35
Şekil 2.26 KID istasyonundaki ivme spektrumunun karşılaştırılması.....	35
Şekil 3.1 Eşdeğer lineer metotta kullanılan gerilme-şekil değiştirme modeli (Bardet vd., 2000).....	37
Şekil 3.2 Eşdeğer lineer model (a) Histerisis eğrisi, (b) Sekant kayma modülü ve sönüm oranının şekil değiştirme seviyesi ile değişimi	39
Şekil 3.3 Zeminlerde G/G_{max} ve sönüm oranının kayma şekil değiştirmesi ile değişimi	39
Şekil 3.4 Histerisis Eğrisi	41
Şekil 3.6 Yükleme ve boşaltma davranışını tanımlayan hiperbolik, non lineer zemin modeli	45
Şekil 3.7 Deepsoil giriş menüsü	46
Şekil 3.8 Deepsoil'de modellemenin ikinci adımı.....	47
Şekil 3.9 Maksimum frekansların kontrolü.....	48
Şekil 3.10 Deepsoil'de modellemenin üçüncü adımı	48
Şekil 3.11 Deepsoil'de modellemenin dördüncü adımı	49

Şekil 3.12 Deepsoil’de modellemenin beşinci adımı.....	50
Şekil 3.13 Deepsoil’de modellemenin altıncı adımı.....	51
Şekil 3.14 Deepsoil’de modellemenin yedinci adımı	52
Şekil 3.15 Deepsoil’de modellemenin sekizinci adımı.....	53
Şekil 3.16 Laboratuvar deneyleri ve yapılar için tipik şekil değiştirme aralıklarında zeminin karakteristik rijitlik-şekil değiştirme davranışı	55
Şekil 3.17 Hardin-Drnevich bağıntısı sonuçlarının Santos ve Correia deney verileri ile karşılaştırılması	57
Şekil 3.18 HSsmall modelin 3 eksenli deneyde rijitlik parametreleri E_{50} , E_{ur} ve $E_0=2G_0(1+\nu_{ur})$	58
Şekil 3.19 Plaxis’te model geometrik sınırlarının ayarlandığı pencere	59
Şekil 3.20 Plaxis’te girilmiş örnek model	60
Şekil 3.21 Plaxis programında malzeme parametrelerinin girilmesi.....	61
Şekil 3.22 Plaxis programında Rayleigh α ve Rayleigh β değerlerinin girilmesi	61
Şekil 3.23 Plaxis programında rijitlik parametrelerinin girilmesi	62
Şekil 3.24 Plaxis programında formasyonların oluşturulması	63
Şekil 3.25 “Standard fixities” ve “Standart earthquake boundaries” in tanımlanması.....	64
Şekil 3.26 Plaxis programı analiz noktaları ağı.....	65
Şekil 3.27 Plaxis programında analiz öncesi son adım olan “başlangıç koşullarının” belirlenmesi.....	66
Şekil 5.28 Analiz tipinin seçilmesi	67
Şekil 3.29 Deprem kaydının süresinin girilmesi	67
3.30 Deprem kaydının girilmesi	68
Şekil 3.31 Analiz sonucu alınması istenen noktaların seçimi	69
Şekil 4.1 İnceleme alanının mühendislik jeolojisi haritası (Özaydın vd.,2004).....	71
Şekil 4.2 İstanbul ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesiti (Yıldırım, 2003)	72
Şekil 4.3 A-A’ Kesiti	75
Şekil 4.4 B-B’ Kesiti.....	76
Şekil 4.5 C-C’ Kesiti.....	77
Şekil 5.1 PS Logging ölçümleri ile İyisan (1996)’dan belirlenen V_s değerlerinin karşılaştırılması (Özaydın vd.,2004).....	79
Şekil 5.2 Alüvyon için G/G_{max} , kayma birim şekil değiştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değiştirmesi ilişkileri.....	80
Şekil 5.3 Bakırköy Kili için G/G_{max} , kayma birim şekil değiştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değiştirmesi ilişkileri	81
Şekil 5.4 Bakırköy Kireçtaşı için G/G_{max} , kayma birim şekil değiştirmesi ve sönüm oranı,	

kayma birim şekil değiştirmesi ilişkileri	81
şekil 5.5 Gürpınar Kili için G/G_{max} , kayma birim şekil değiştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değiştirmesi ilişkileri	82
şekil 5.6 Gürpınar Tabanı (kum+çakıl) için G/G_{max} , kayma birim şekil değiştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değiştirmesi ilişkileri Sönüm Oranı ilişkisi.....	82
şekil 5.7 Dolgu için G/G_{max} , kayma birim şekil değiştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değiştirmesi ilişkileri.....	83
şekil 5.8 İki boyutlu analizlerde kullanılan ivme-zaman davranışı	89
şekil 5.9 İki boyutlu analizlerde kullanılan deprem hareketinin ivme spektrumu.....	89
şekil 6.1 Plaxis'te modellenen 100 m kalınlığında örnek kesit	90
şekil 6.2 100 m'lik kesitin derinlik – ivme değişimi.....	91
şekil 6.3 Yüzey ve malzeme sınırlarının düz alındığı B-B' kesiti	92
şekil 6.4 Yüzey topografyasının etkisini incelemek amacıyla yapılan analiz sonuçları	93
şekil 6.5 HSsmall ve HS modellerinin karşılaştırılması.....	94
şekil 7.2 B-B' Kesiti.....	98
şekil 7.3 C-C' Kesiti.....	99
şekil 7.4 A-A' Kesitinde yüzey topografyası ve hesaplanan maksimum yüzey ivmelerinin yatay mesafe ile değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması.....	103
şekil 7.5 B-B' Kesitinde yüzey topografyası ve hesaplanan maksimum yüzey ivmelerinin yatay mesafe ile değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması.....	104
şekil 7.6 C-C' Kesitinde yüzey topografyası ve hesaplanan maksimum yüzey ivmelerinin yatay mesafe ile değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması.....	105
şekil 7.7 A-A' Kesitinde yüzey topografyası ve maksimum spektral ivmelerin yatay mesafe ile değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması.....	106
şekil 7.8 B-B' Kesitinde yüzey topografyası ve spektral ivmelerin yatay mesafeye göre değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin	

karşılaştırılması.....	107
Şekil 7.9 C-C' Kesitinde yüzey topografyası ve spektral ivmelerin yatay mesafeye göre değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-lineer analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması.....	108
Şekil 7.10 A-A' Kesiti 5 Noktası için belirlenen analiz sonuçları	110
Şekil 7.11 A-A' Kesiti 8 Noktası için belirlenen analiz sonuçları	111
Şekil 7.12 A-A' Kesiti 9 Noktası için belirlenen analiz sonuçları	112
Şekil 7.13 A-A' Kesiti 10 Noktası için belirlenen analiz sonuçları	113
Şekil 7.14 A-A' Kesiti 11 Noktası için belirlenen analiz sonuçları	114
Şekil 7.15 A-A' kesiti 12 Noktası için belirlenen analiz sonuçları	115
Şekil 7.16 A-A' Kesiti 13 Noktası için belirlenen analiz sonuçları	116
Şekil 7.18 B-B' Kesiti 6 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	119
Şekil 7.19 B-B' Kesiti 8 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	120
Şekil 7.20 B-B' Kesiti 9 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	121
Şekil 7.21 B-B' Kesiti 10 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	122
Şekil 7.22 B-B' Kesiti 11 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	123
Şekil 7.23 B-B' Kesiti 12 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	124
Şekil 7.24 B-B' Kesiti 13 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	125
Şekil 7.25 B-B' Kesiti 14 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	126
Şekil 7.26 B-B' Kesiti 16 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	127
Şekil 7.27 C-C' Kesiti 5 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	129
Şekil 7.28 C-C' Kesiti 6 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	130
Şekil 7.29 C-C' Kesiti 10 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	131
Şekil 7.30 C-C' Kesiti 11 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	132
Şekil 7.31 C-C' Kesiti 12 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	133
Şekil 7.32 C-C' Kesiti 16 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	134
Şekil 7.34 C-C' Kesiti 23 Noktası için belirlenen analiz sonuçları.....	136
Şekil 7.35 A-A' kesiti mühendislik jeolojisi haritası üzerinde maksimum yüzey ivmelerinin gösterimi.....	137
Şekil 7.36 B-B' kesiti mühendislik jeolojisi haritası üzerinde maksimum yüzey ivmelerinin gösterimi.....	138
Şekil 7.37 C-C' kesiti mühendislik jeolojisi haritası üzerinde maksimum yüzey ivmelerinin gösterimi.....	139

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Çalışmada kullanılan kayıt istasyonları ile ilgili bazı detaylar ve kaydedilen maksimum ivmeler (cm/sn ²).....	29
Çizelge 2.2 Çeşitli doğrultularda alınan filtre edilmiş maksimum ivmeler (cm/sn ²)	30
Çizelge 4.2 Formasyonlar için doğal su muhtevası,kıvam limit değerleri ve birim hacim ağırlıkları (Kılıç vd., 2006).....	74
Çizelge 4.3 Dane çapı dağılımı (Kılıç vd., 2006).....	74
Çizelge 5.1 Her bir formasyona ait seçilen G/Gmax – γ ve sönüm – γ ilişkileri	80
Çizelge 5.2 EERA ve Deepsoil’de kullanılan kayma dalgası hızları	84
Çizelge 5.3 Her bir formasyona için Plaxis’te kullanılan malzeme parametreleri.....	85
Çizelge 5.4 A-A’ Kesiti α ve β Değişimi	86
Çizelge 5.5 B-B’ Kesiti α ve β Değişimi.....	87
Çizelge 5.6 C-C’ Kesiti α ve β Değişimi.....	88
Çizelge 7.1 A-A’ Kesiti Nokta Koordinatları	100
Çizelge 7.2 B-B’ Kesiti Nokta Koordinatları.....	101
Çizelge 7.3 C-C’ Kesiti Nokta Koordinatları.....	102
Çizelge 7.4 A-A’ Kesiti için elde edilen maksimum yüzey ivmeleri (m/sn ²).....	140
Çizelge 7.5 B-B’ Kesiti için elde edilen maksimum yüzey ivmeleri (m/sn ²)	140
Çizelge 7.6 C-C’ Kesiti için elde edilen maksimum yüzey ivmeleri (m/sn ²)	141

ÖNSÖZ

Tez çalışmasını birinci bölümünde çalışmanın amacı açıklanmış ve inceleme alanında daha önce yapılan çalışmalardan bahsedilmiş olup bölge ile ilgili ana kaya derinlik haritası, eğim haritası ve bölgede yapılan sondajların coğrafi konumları bu bölümde verilmiştir. İkinci bölümde ise yerel zemin şartlarının yer hareketi üzerindeki etkisi işlenmiş ve daha önce Meksico City ve San Francisco Körfezi'nde yapılan çalışmalar açıklanmıştır. Ayrıca bu bölümde yer tepki analizleri tanımlanmış, bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması daha önce yapılan bir çalışma ile örneklendirilmiştir. Üçüncü bölümde analizlerde kullanılan EERA, Deepsoil ve Plaxis programları anlatılmış ve Deepsoil ve Plaxis programları ile nasıl modelleme yapılacağı şekillerle açıklanmıştır. Dördüncü bölümde inceleme alanı jeolojisi ve inceleme alanında yer alan formasyonların geoteknik özellikleri verilmiştir. Beşinci bölümde ise analizlerde kullanılan malzeme parametreleri verilmiştir. Altıncı bölümde analizlere geçmeden önce küçük bir kesitte bir ve iki boyutlu analizlerin kalibrasyonu yapılmış olup yedinci bölümde ise kesitler üzerinde seçilen noktalarda analizler sonucu elde edilen derinlik-ivme, ivme-zaman ve S_a -period karşılaştırılmaları verilmiştir. Son bölüm olan sekizinci bölümde ise karşılaştırmalar neticesinde varılan sonuçlara yer verilmiştir.

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamın başlangıcından son gününe her aşamada yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Havvanur KILIÇ'a şükranlarımı sunarım.

Ayrıca çalışmamın oluşmasında çeşitli aşamalarında katkı yapan Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM'a, Yrd. Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN'e, Arş. Gör. Çiğdem Özçelik'e, ve Arş. Gör. Murat Ergenekon SELÇUK'a teşekkür ederim.

Ocak, 2008

İnş. Müh. Pelin KALE

ÖZET

11.16 km²'lik bir yerleşim alanına sahip Zeytinburnu İlçesi, “İstanbul Deprem Master Planı, Zeytinburnu Pilot Projesi” kapsamında gerçekleştirilen sismik mikrobölgeleme çalışması Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği/Geoteknik Anabilim Dalı tarafından yapılmıştır. (Özaydın vd.,2004). Bu tez çalışması kapsamında, daha önce inceleme bölgesinde yapılan çalışmalardan elde edilen bulguların bir bölümü kullanılarak, inceleme alanında yer alan üç adet enkesit üzerinde deprem sırasında oluşacak yüzey hareketlerinin değişimini belirlemek için bir ve iki boyutlu dinamik davranış analizleri yapılmıştır. Böylece yerel zemin koşullarının deprem hareketi üzerindeki etkisi incelenmiş olup, bir ve iki boyutlu dinamik davranış analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bir boyutlu analizler için eşdeğer lineer analiz prensibine dayalı olarak çalışan EERA programı ile eşdeğer lineer ve nonlinear çözüm yapabilen Deepsoil programı kullanılmıştır. İki boyutlu analizler ise Plaxis 8.5'in dinamik versiyonu kullanılarak yapılmıştır. Plaxis 8.5 ile yapılan dinamik davranış analizlerinde kullanılan viskoz sönüm parametreleri Deepsoil programından elde edilmiştir. Dinamik analizlerde anakaya yer hareketi olarak olası İstanbul depremini temsil eden 475 yıllık tekrarlama periyotlu sentetik ivme kayıtları kullanılmıştır.

Topografyanın ve tabaka sınırlarının analiz sonuçları üzerindeki etkisini inceleyebilmek için B-B' kesitinde yüzey topografyası ve malzeme sınırları düz olarak alınmış ve analizler tekrarlanmıştır. Analiz sonuçları zemin yüzü yer hareketi özelliklerinin değişen yerel zemin koşulları ve arazi topografyası ile farklılaştığını göstermiştir.

Her üç kesit için yapılan bir ve iki boyutlu analizler sonucu elde edilen maksimum yüzey ivmeleri ve spektral ivme değerleri yüzey topografyası da gözönünde bulundurularak karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zeytinburnu, dinamik davranış analizleri, Plaxis, EERA, Deepsoil.

ABSTRACT

Geological and geotechnical features of Zeytinburnu District with 11.16 km² residential area has been studied by Yildiz Technical University Department of Civil Engineering/Geotechnics Division (Ozaydın et al.,2004) during the seismic microzonation study, which was part of the “Istanbul Earthquake Master Plan, Zeytinburnu Pilot Project”. In this thesis, one and two dimensional dynamic behaviour analyses are made on three cross-sections in the district by using the data obtained from this project to evaluate the expected surface ground movements during the earthquakes. Thus the effect of local topography and soil conditions could be examined and the comparison between one and two dimensional dynamic analyses results could be performed.

One dimensional analyses are made with both the program EERA which is utilizes an equivalent linear analysis method and the program Deepsoil which can both run equivalent linear and nonlinear analyses. For two dimensional analyses Plaxis 8.5 dynamic pack is used. Viscous damping parameters used in the Plaxis 8.5 dynamic analyses are obtained from the Deepsoil analysis. In dynamic analyses, synthetic acceleration records representing possible İstanbul earthquake for 475 years return period are used as bedrock input motion. Analyses are repeated for the purpose of examining the effect of topography and layer boundaries for one of the sections with boundaries being modelled as horizontal.

The analyses results showed that the properties of surface ground motion differs according to the land topography and local soil conditions.

Peak ground acceleration and maximum spectral acceleration values derived from 1D and 2D analyses are compared with each other considering the changes in the topography.

Key Words: Zeytinburnu, dynamic behaviour analyses, Plaxis, EERA, Deepsoil

1. GİRİŞ

Günümüzde, dünyanın bir çok yerinde insanların canları ve malları büyük bir deprem tehdidi ile karşı karşıyadır. Depremler milyonlarca yıldır olmaktadır ve gelecekte de olmaya devam edecektir. Depremin oluşmasını önlemek mümkün değildir fakat depremin etkilerini hafifletmek, can ve mal kaybını en aza indirmek mümkündür.

Depremler ile ilgili olan afetler çoğu zaman sismik tehlike olarak adlandırılır. Sismik tehlikelerin başlıcaları; yer sarsıntısı, yapısal hasarlar, sıvılaşma, heyelanlar, istinat yapısı yenilmeleri, nakil hatlarındaki tehlikeler ve tsunami tehlikeleridir. Bunlar insanlık için büyük tehlikeler olmaları yanında ülke ekonomilerini de etkileyecek büyüklükte tehdit oluşturmaktadırlar.

Bir deprem sırasında yapılarda oluşan hasarlar sadece üst yapı ile ilgili değildir. Yapının depreme dayanıklı tasarımı önemlidir fakat bir deprem sırasında yapılara gelecek deprem kuvvetleri iki önemli faktörden etkilenir. Bunlar; deprem özellikleri ve yerel zemin koşullarıdır. Deprem dalgalarının özellikleri zemin tabakalarının içinden geçerken değişebilmekte ve zemin yüzeyinde yer alan yapılara gelecek olan deprem kuvvetleri artabilmektedir. Aynı şekilde deprem dalgaları da zemin içinden geçerken zemin tabakalarının özelliklerini değiştirebilmektedir.

Zemin tabakalarının dinamik analizi için geliştirilen hesap yöntemleri genellikle karşılaşılan problemin gereksinimine göre, bir, iki ve üç boyutlu olarak tanımlanır. Zemin tabakalarının bir boyutlu dinamik analizinde yüzey topoğrafyası ihmal edilmektedir. Fakat gerçekte dar vadilerde, geniş vadilerin kenarlarında ve tepelerin yamaçlarında ikinci ve hatta üçüncü boyutun etkileri ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada amaç bu iki boyutlu etkilerin yüzey hareketi şiddeti üzerindeki etkisini araştırmaktır.

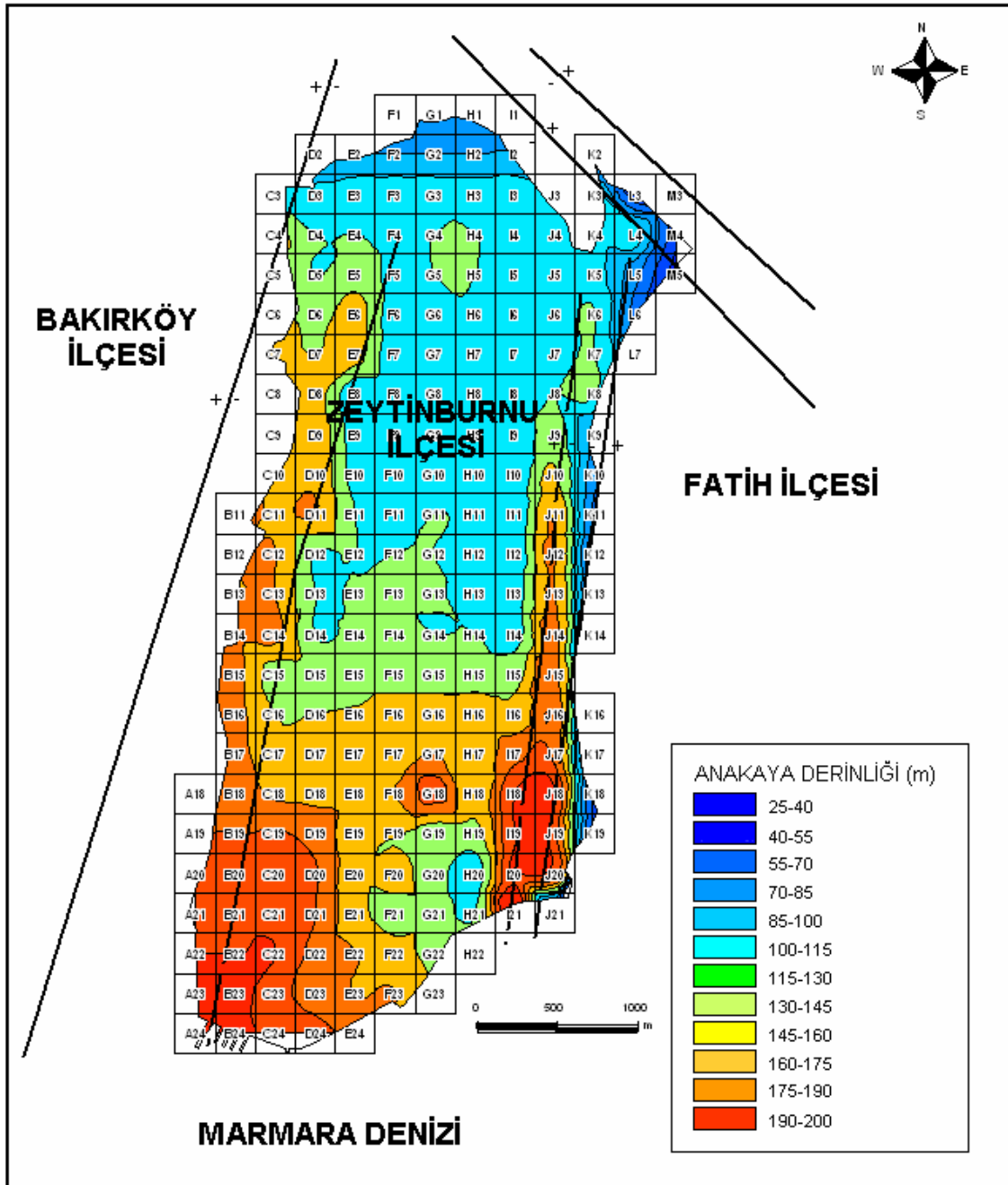
1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, yerel zemin koşullarının deprem sırasında oluşan yüzey yer hareketi üzerindeki etkisi bir ve iki boyutlu dinamik davranış analizleri ile incelenmiştir. İnceleme alanında yer alan üç adet enkesit üzerinde bir ve iki boyutlu analizler yapılmıştır. Bir boyutlu analizler eşdeğer lineer analiz prensibine dayalı olarak çalışan EERA programı ve hem eşdeğer lineer hem de nonlineer çözüm yapabilen Deepsoil programı ile, iki boyutlu analizler ise Plaxis programı ile yapılmıştır. Bir boyutlu dinamik davranış analizleri, her bir kesit üzerinde arazi topoğrafyası ve formasyonlar göz önünde bulundurularak seçilen noktalarda yapılmıştır.

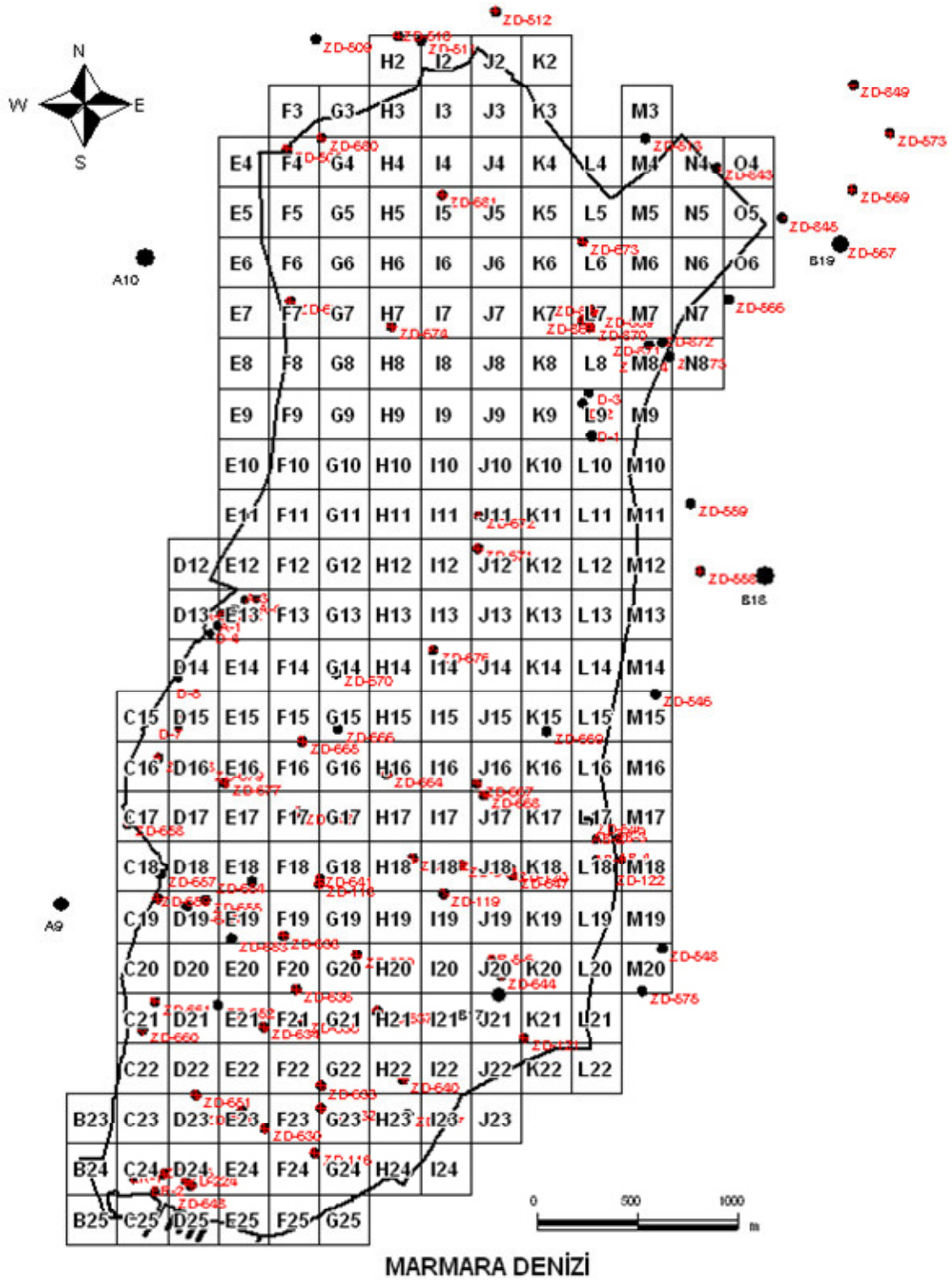
Bu noktalarda zemin profili, tabaka kalınlıkları ve geoteknik ve dinamik malzeme parametreleri ile tanımlanmıştır. Anakaya seviyesinde deprem riski analizi ile belirlenen sentetik deprem kayıtları girilmiş ve tek boyutlu dinamik davranış analizleri yapılmıştır. Analizlerden, zemin yüzündeki ivme değerleri, spektral ivmeler ve zemin büyütmesi değerleri belirlenmiştir. İki boyutlu dinamik davranış analizleri, sonlu elmanlar analiz yöntemi ile çözüm yapan Plaxis 8.5 programı ile yapılmıştır. Bir boyutlu analizlerde kullanılan sentetik deprem kaydı anakaya ivme kaydı olarak kullanılarak, her bir kesit için dinamik analizler yapılmış ve bu kesitler üzerinde arazi topoğrafyası ve formasyonlar gözönünde bulundurularak seçilen noktalarda, yüzey ivmesi, spektral ivme değerleri ve büyütme belirlenmiştir. Plaxis programı ile yapılan dinamik analizlerden söz ederken değinilmesi gereken en önemli kavram, analiz sonuçlarını en çok etkilemesi nedeniyle sönüm katsayılarıdır. Rayleigh α ve Rayleigh β katsayıları olarak anılan ve programa hesap aşamasında girilen bu katsayılar, yer hareketinden dolayı anakayada ortaya çıkan enerjinin, zemin tabakalarından geçerken ne oranda sönümleneceğinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. İki boyutlu analizlerde, bir boyutlu analizlerden elde edilen doğal titreşim periyotları, zeminin titreşim frekansı ve sönüm oranı ile ilişkilendirilmiş bağıntılarda yerine konularak hesaplanan Rayleigh α ve Rayleigh β değerleri kullanılmıştır.

1.2 İnceleme Alanında Daha Önce Yapılan Çalışmalar

İstanbul İli, Zeytinburnu İlçesi'nde "İstanbul Deprem Master Planı, Zeytinburnu Pilot Projesi" kapsamında, ilçenin sismik mikrobölgelemesi Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği/Geoteknik Anabilim Dalı ve Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı tarafından yapılmıştır (Özaydın vd., 2004). Bu çalışmada, yerel zemin koşullarının binalara etkiyecek deprem kuvvetlerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlçede yapılmış tüm jeolojik ve geoteknik araştırma sonuçlarının değerlendirilmesiyle, yörenin jeolojik yapısını açıklayıcı bir jeoloji/mühendislik jeolojisi haritası hazırlanmış, sondajlardan elde edilen verilerle zemin yüzünden itibaren değişen derinliklerde yer alan formasyonların değişen litolojileri ve ana kaya derinlikleri belirlenmiş ve deprem davranışı açısından zemin sınıflandırılması yapılmıştır. Bunun için inceleme alanı 250 m x 250 m'lik hücrelere ayrılmış ve mevcut sondaj verilerinden yararlanılarak bu hücreler için temsili bir zemin profili ve kayma dalgası hız profili oluşturulmuştur. Şekil 1.1'de inceleme alanının ana kaya derinlik haritası verilmiştir. İnceleme alanında değerlendirilen sondajların coğrafi konumları ve hücreler ise Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 İnceleme alanı ana kaya derinlik haritası (Özaydın vd., 2004)

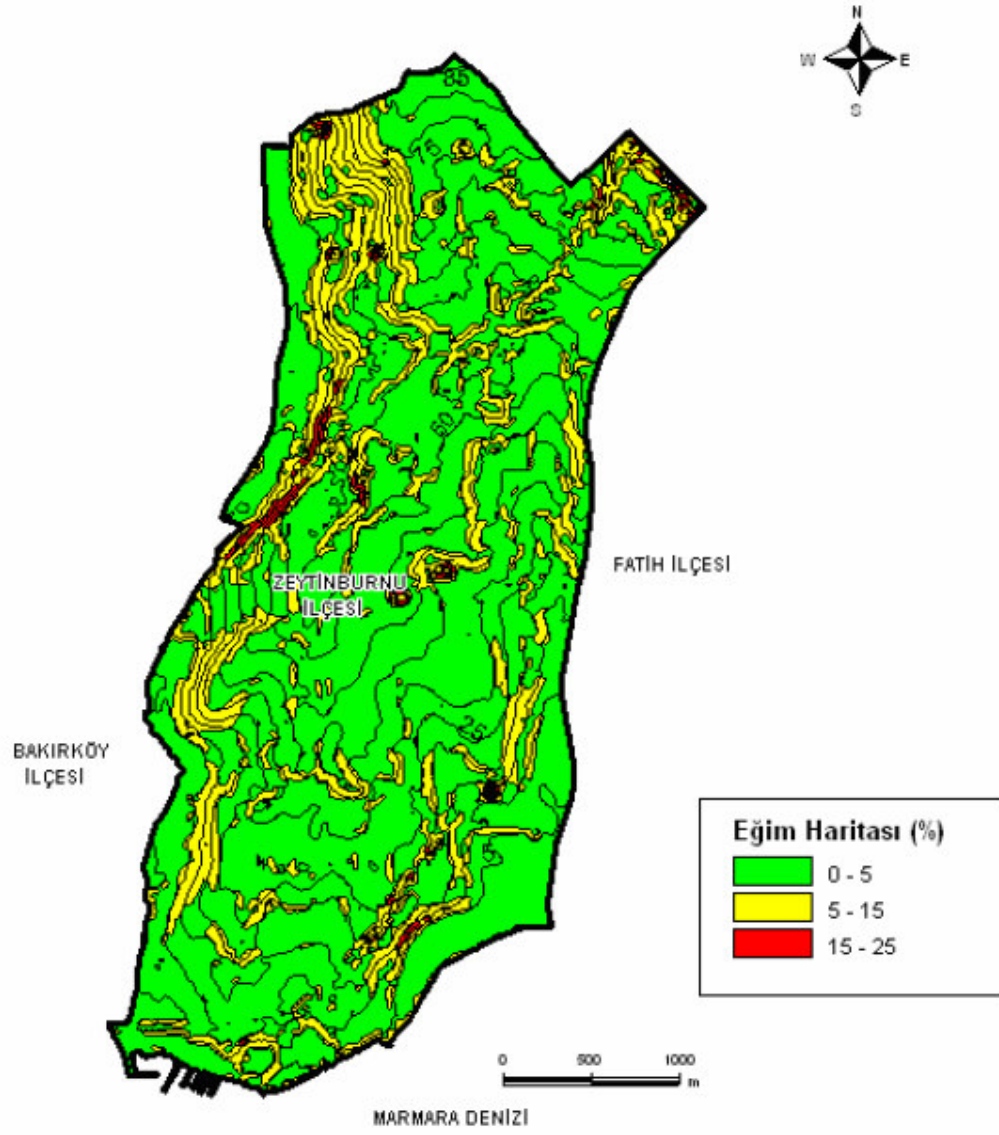


Şekil 1.2 İnceleme alanında değerlendirilen sondajların coğrafi konumları ve hücreler (Özaydın vd., 2004)

1.3 Bölgenin Yeraltı Suyu Durumu ve Depremselliği

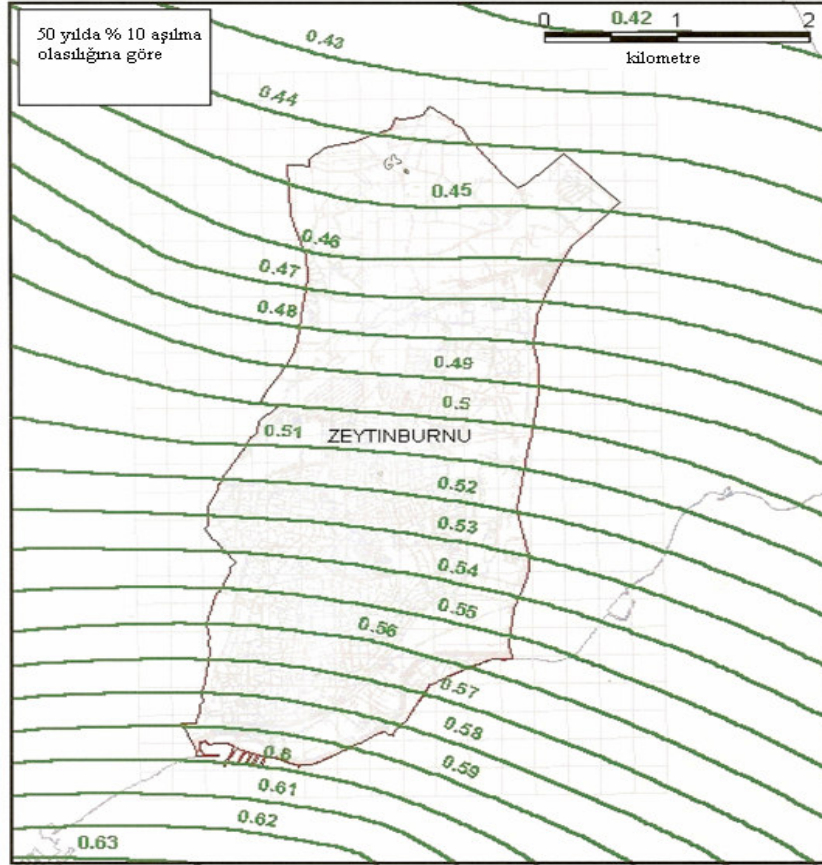
Zeytinburnu İlçesi, yayvan bir tepe düzlüğü ile batıya ve doğuya eğimli yamaçlar üzerinde olup, yüzey sularının oluşturabileceği bir sellenme alanı dışında kalmaktadır. Aşırı yağışlarda veya yağmurlu mevsimlerde yamaçlardan gelebilecek yağmur suları, kuzeyden güneye Marmara Denizi'ne birleşen kuru ve ıslah edilmiş sulu dere (Çırpıcı Deresi) yataklarıyla drene olmaktadır.

Zeytinburnu İlçesi'nin kuzey kesimlerini oluşturan tepe ve tepe düzlükleri, asılı su bölgesinde yer alması nedeniyle, yer altı suyu içermemektedir. Güney kesimlerde sahile doğru, bilhassa dere yataklarını oluşturan ve kalınlığı 15 m'yi bulan alüvyal çökeller ile altlarında yer alan kalınlıkları yer yer 30m'ye varan Bakırköy formasyonu kireçtaşı ve kum mercekleri akifer niteliğinde olup, yer altı suyu içermektedirler. Vadi tabanını oluşturan bu kesimlerde, yer altı su seviyesi zemin yüzeyinin birkaç metre altında yer almaktadır. Daha alt seviyelere doğru inildikçe, DSİ'nin Zeytinburnu İlçesi güneyi sahil kesimlerinde 150 m ile 250 m arasında değişen derinliklerde yaptığı 8 adet sondajdan anlaşıldığı üzere, yörede zemin yüzeyinden itibaren killenle ardalanen ve yer altı suyu içeren beslenmesi çok az kum mercekleri görülmektedir. Aşırı konsolide killerin geçirimi düşük olup yer altı suyu içermemektedirler. Gürpınar formasyonu altında yer alan Trakya formasyonu grovıkları, çatlak sularını içermekte ancak, verimli bir akifer özelliği taşımamaktadırlar. Zeytinburnu İlçesi güney kesimlerinde, Gürpınar formasyonu altında görülen Eosen yaşlı Kırklareli formasyonunun karstik kireçtaşları yer altı suyu açısından verimlidirler. Zeytinburnu İlçesi yayvan bir sırt düzlüğü ile, bu sırtın doğu ve batısında eğimleri % 5-15 arasında değişen yamaçlardan oluşmaktadır (Şekil 1.3). Bu yamaçlarda yapılan incelemelerde herhangi bir kitle hareketine rastlanmamıştır.

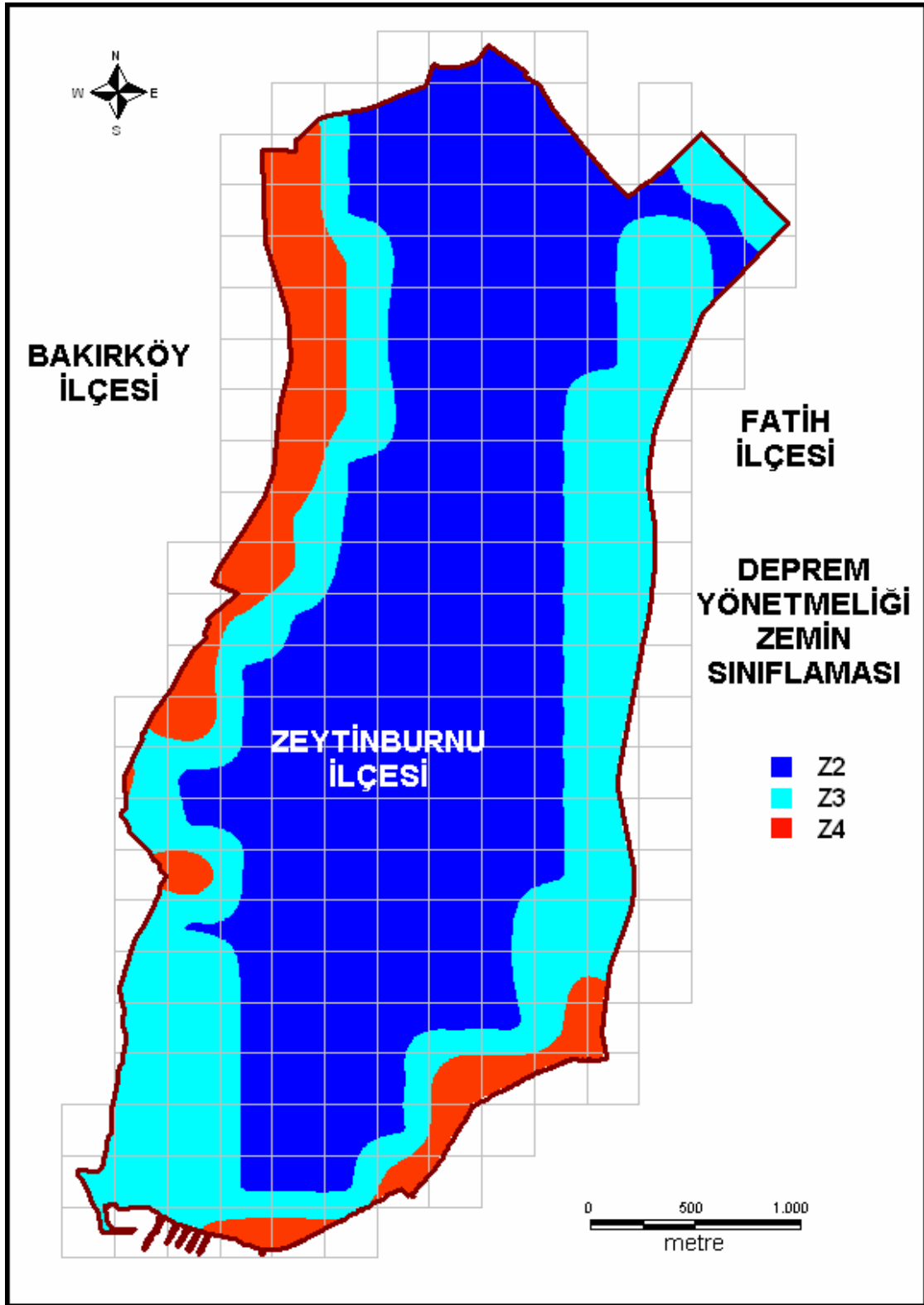


Şekil 1.3 İnceleme alanı eğim haritası (Özaydın vd., 2004)

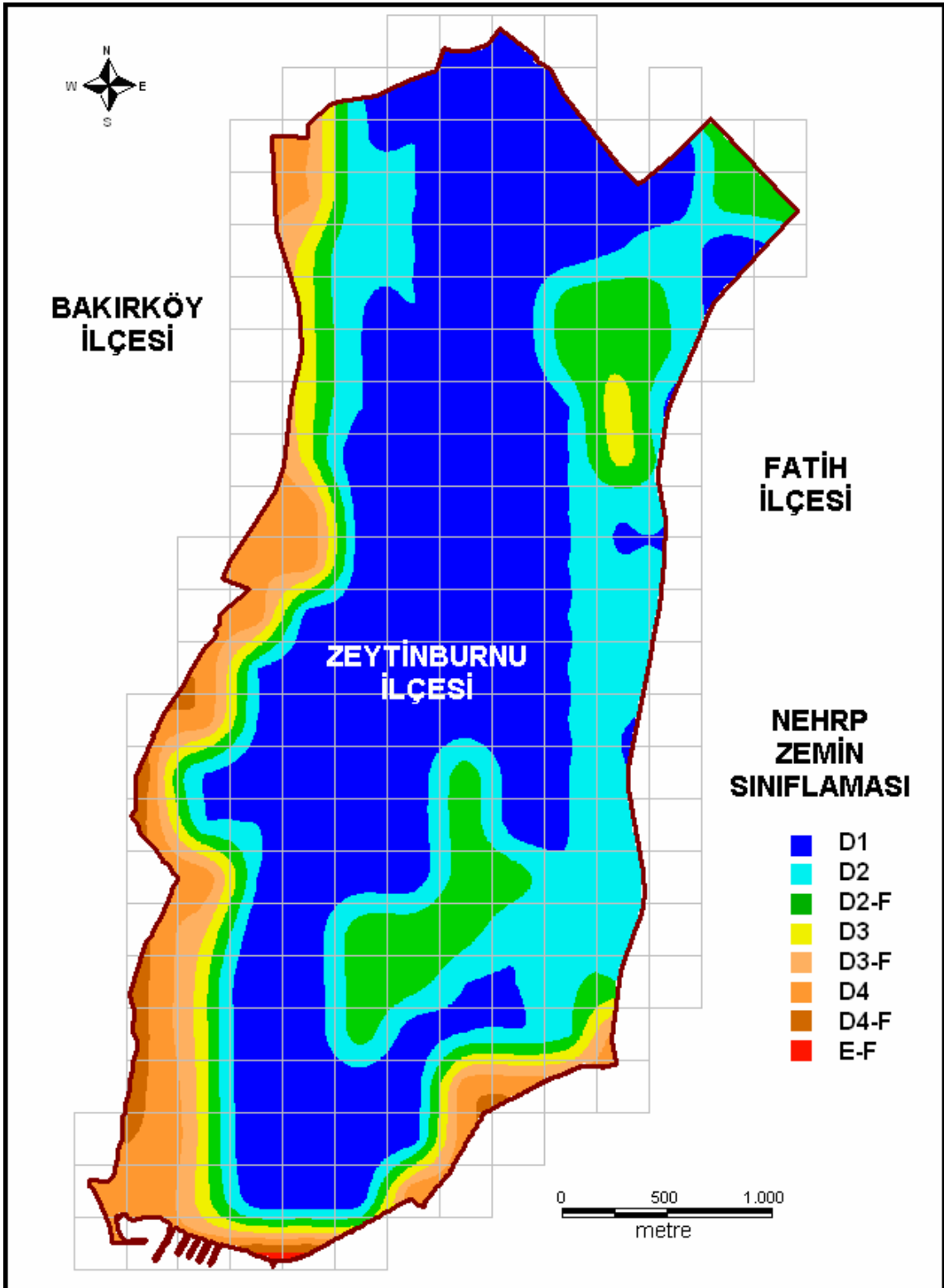
Zeytinburnu İlçesi 1. derecede deprem bölgesi içinde yer almaktadır (Özaydın ve diğ., 2004). İnceleme alanının bölgesel deprem tehlikesi Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı tarafından yapılmış ve her bir hücre için 475 yıllık dönüşüm periyodu veya 50 yılda %10 aşılma olasılığı gözönüne alınarak NEHRP B/C sınırı zemin sınıfında en büyük yer ivmesi ile 0.2 s ve 1.0 s deki spektral ivme değerleri belirlenmiştir. Her bir hücre için belirlenen bu spektral ivme değerlerine göre NEHRP ivme spektrumu ile uyumlu olarak sentetik (simulasyon) deprem kayıtları TARSCTHS programı ile üretilmiştir. İnceleme alanı için belirlenen en büyük taban kayası ivme (PGA) değerleri Şekil 1.4'te verilmiştir. Türkiye deprem yönetmeliğine göre belirlenen yerel zemin sınıfları ve yerel zemin sınıflarının NEHRP'e göre bölgenmesi sırasıyla Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Şekil 1.7' de ise ilk 30 m. için belirlenen eşdeğer kayma dalgası hızına göre inceleme alanının bölgenme haritası verilmiştir. Burada A_{VSEQ} alanları 270 m/sn'den daha küçük, C_{VSEQ} alanları ise 270 m/sn'den daha büyük eşdeğer ortalama kayma dalgası hızı değerlerini göstermektedir.



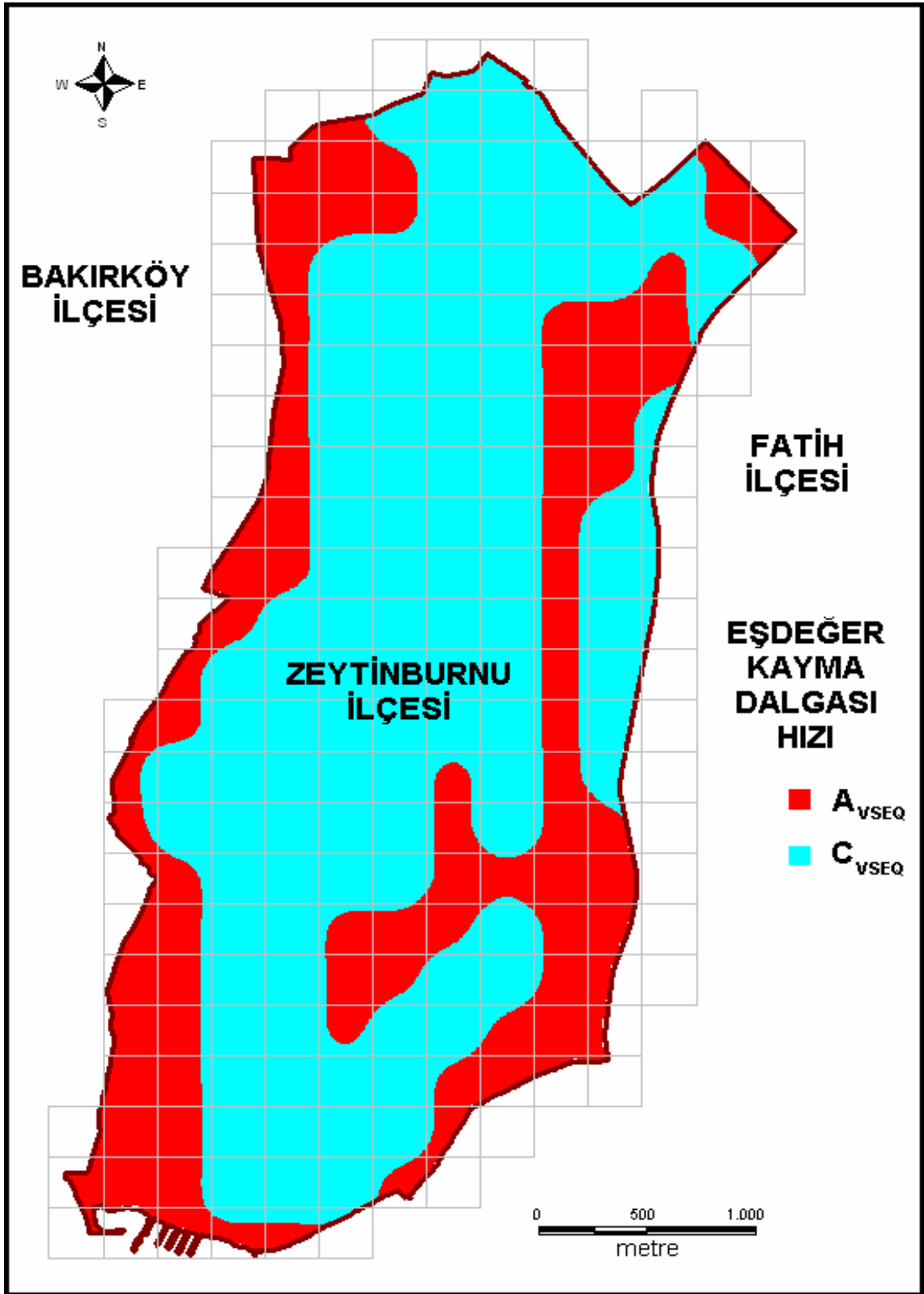
Şekil 1.4 İnceleme alanı için anakaya seviyesinde belirlenen en büyük ivme (PGA) değerleri (Özaydın vd.,2004)



Şekil 1.5 Türkiye Deprem Yönetmeliği'ne göre yerel zemin sınıfları (Özaydın vd., 2004)



Şekil 1.6 Yerel Zemin Sınıflarının NEHRP'e göre bölgenmesi (Özaydın vd., 2004)



Şekil 1.7 Eşdeğer kayma dalgası hızına göre inceleme alanının bölgenmesi (Özaydın vd., 2004)

2. YEREL ZEMİN KOŞULLARININ DEPREM ÜZERİNDEKİ ETKİSİ VE ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ

2.1 Giriş

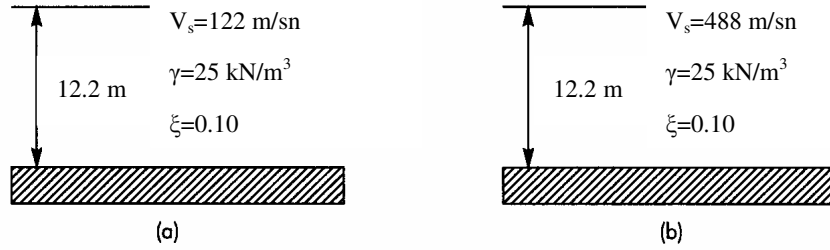
Yerel jeoloji ve zemin şartlarının yer sarsıntısının şiddeti üzerindeki etkisi uzun zamandır bilinmektedir. MacMurdo (1924), 1819'daki Cutch (Hindistan) depremi ile ilgili olarak "doğrudan kaya üzerine oturtulan yapılardaki hasarın, temeli kayaya kadar inmeyen yapılardaki kadar olmadığını" belirtmiştir. Mallet (1862), 1857 Neapoliten depremi ile ilgili raporunda yerel jeolojik şartların hasar üzerindeki etkisine dikkat çekmiştir. Wood (1908) ve Reid (1910), 1906 San Francisco depremindeki yer sarsıntısı şiddetinin yerel zemin ve jeoloji ile ilişkisini ortaya koymuşlardır. Gutenberg (1927) farklı yer altı şartlarına ait mikrodeprem kayıtlarına dayalı olarak zemine bağlı büyütme faktörleri geliştirmiştir. Bu ilk gözlemlerden sonra, yerel zemin şartlarının yer hareketleri üzerine olan etkileri dünyanın değişik yerlerindeki depremler sırasında da gözlenmiştir. Kuvvetli yer hareketi ölçen cihazların yakın geçmişten bugüne kadar yaygınlaşmaya başlamasıyla, yerel zemin etkileri son zamanlarda nicel olarak ölçülmeye başlanmıştır.

Yerel zemin etkileri depreme dayanıklı tasarımda önemli bir rol oynar ve her zemin durumu için ayrı ayrı ele alınmalıdır. Bu konu, geoteknik deprem mühendisliğinin en önemli uğraşlarından birini oluşturur.

2.2 Yerel Zemin Şartlarının Yer Hareketi Üzerindeki Etkileri

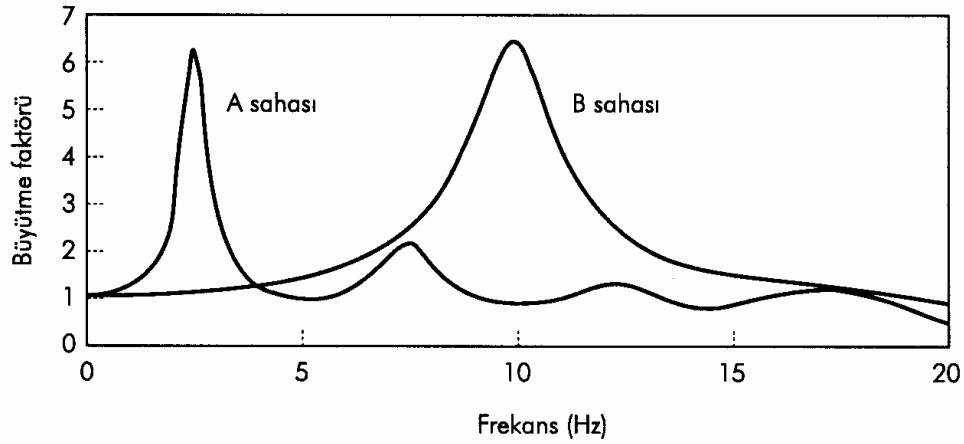
Yerel zemin şartları kuvvetli yer hareketinin genlik ve frekans içeriğini oldukça fazla etkiler. Bunların etki derecesi, jeolojik yapı ile malzeme özellikleri, sahanın topoğrafyası ve girdi hareketin özelliklerine bağlıdır. Yerel zemin etkilerinin karakteri, basit teorik zemin tepki analizleri, aynı sahada gerçek yüzey ve yer altı hareketlerinin ölçülmesi veya farklı yer altı şartlarındaki sahalarda zemin yüzeyi hareketlerinin ölçülmesi şeklinde birkaç değişik şekilde ifade edilebilir. Zemin yüzeyi hareketlerinin yerel zemin şartlarından etkilenmesine yol açan birkaç önemli teorik sebep vardır. Çoğu sahalarda yüzeye yakın malzemelerin yoğunluğu ve S dalgası iletme hızı, derin tabakalara kıyasla daha düşüktür. Yayılma ve materyal sönümleme etkilerinin ihmal edildiği durumda, elastik enerjinin korunması ilkesine göre derinden yüzeye doğru olan enerji akışı ($\rho v_s \dot{u}^2$) sabit olmalıdır. Bu nedenle, dalgalar yüzeye doğru yaklaşırken ρ (zemin yoğunluğu) ve V_s (kayma dalgası hızı) azaldığından, partikül hızı \dot{u} artmalıdır.

Şekil 2.1’de gösterilen iki zemin profili ele alındığında geometrileri aynı olmakla beraber biri diğerine göre çok daha rijittir. Eğer zeminin doğrusal elastik ve anakayanın da rijit davrandığı varsayılırsa, profillere ait büyütme fonksiyonları Şekil 2.2’de gösterildiği gibi olur. Açık bir şekilde görüldüğü gibi, daha yumuşak olan zemin (A profili) düşük frekanslı anakaya hareketini daha sert olan zemine göre (B profili) daha yüksek oranda büyütecektir.



Şekil 2.1 Rijit anakaya üzerindeki iki kuramsal zemin çökeli: (a) A sahası; (b) B sahası (Kramer, 1996)

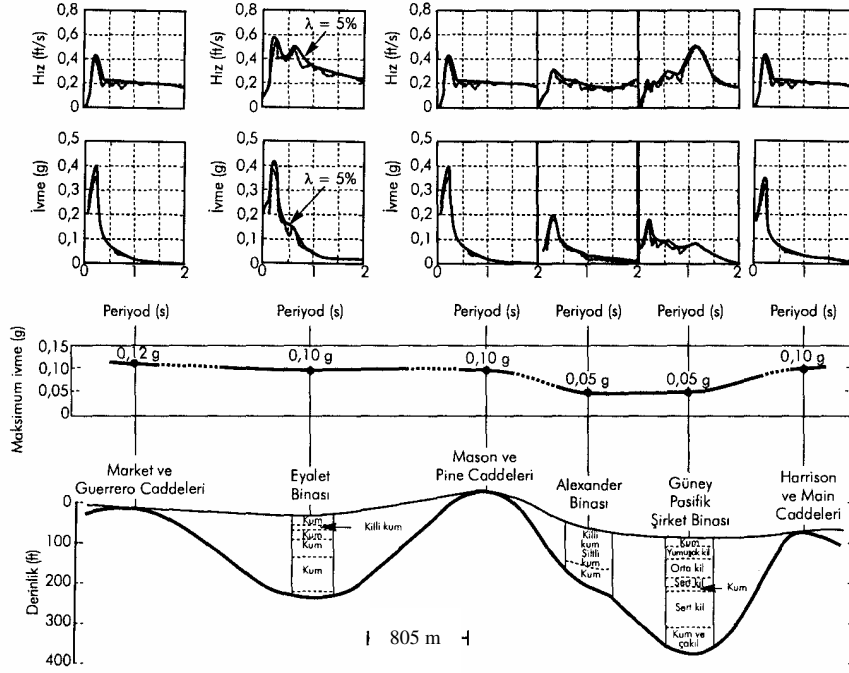
B sahasındaki zeminin S dalga hızının, A sahasındakinin dört katı olması hariç diğer zemin özellikleri aynıdır.



Şekil 2.2 A ve B sahasları için büyütme faktörleri (Joyner vd., 1976’dan).

Farklı sahalarda ölçülmüş zemin yüzeyi hareketlerinin karşılaştırılmasıyla, yerel zemin koşullarının önemi hakkında daha fazla veri elde etmek mümkün olmuştur. 1957 yılında San Francisco’daki birkaç lokasyonda, yakınlardaki $M=5.3$ büyüklüğündeki bir depreme ait yer hareketi kayıtları dikkate alındığında pik yatay ivme ve tepki spektrumları cinsinden ifade edilen yer hareketlerindeki değişimler, şehirdeki bir enine kesitte zemin şartlarındaki

değişimlerle birlikte Şekil 2.3’de verilmiştir. Kaya mostralarındaki (Market ve Guerrero, Mason ve Pine, Harrison ve Main Caddeleri’nde) yer yüzeyi hareketleri birbirine çok benzerken, kalın zemin çökellerinin bulunduğu yerlerdeki hareketlerin genlik ve frekans içerikleri oldukça farklıdır.



Şekil 2.3 1957 San Francisco depreminde San Francisco’da 4 mil’lik hat boyunca spektral hız, spektral ivme ve spektral yerdeğiştirmenin değişimi (Idriss ve Seed, 1968’den).

Yerel zemin etkileri açısından iki önemli deprem, 1985 Michoacan (Meksika) depremi (Stone vd., 1987) ile 1989 Loma Prieta (California) depremidir (Seed vd., 1990). Mexico City’de ve San Francisco körfez bölgesinde değişik zemin şartlarından oluşan sahalarda, son derece iyi raporlanmış bu depremlerin kuvvetli yer hareket kayıtları alınmıştır. Bu olaylara ait incelemeler yerel zemin etkilerinin önemini açıkça ortaya koyar.

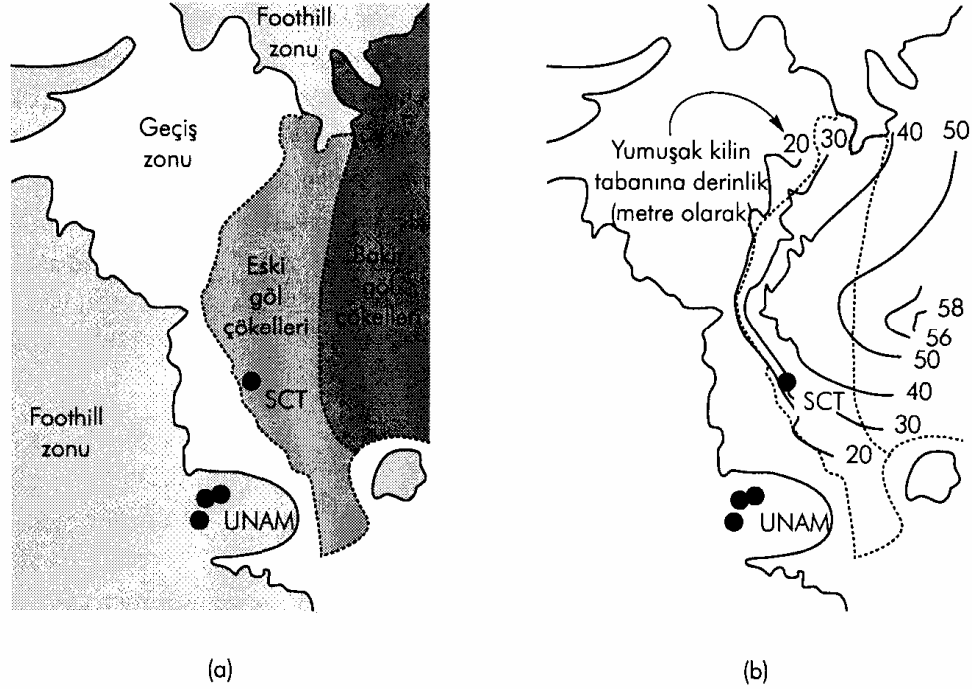
2.3 Mexico City, 1985

19 Eylül 1985 Michoacan depremi ($M_s=8.1$) dışmerkez civarında (Meksika’nın Pasifik kıyısına yakın yerlerde) sadece orta düzeyde hasara neden olmuş, fakat 350 km kadar uzaktaki Mexico City’de çok büyük hasarlar meydana gelmiştir. Mexico City’de değişik sahalarda kaydedilen yer hareketleri üzerinde yapılan çalışmalar, yerel zemin koşulları ile yıkıcı yer hareketi arasındaki önemli ilişkiyi ortaya koymuştur (Dobry ve Vucetic, 1987).

Mexico City zemin koşulları, sismik bölgelendirme bakımından birbirinden farklı üç bölgeye ayrılmaktadır (Şekil 2.4a). Kent merkezinin batısındaki Foothill Kuşağı çoğunlukla granüler zeminler, bazalt veya volkanik tüf şeklindeki sık ve sıkı çökellerden oluşmaktadır. Göl Zonu'nda yakındaki bir volkandan türemiş silt, kil ve küllerin geçmiş dönemlerde Texcoco Gölü suları içine havada taşınarak çökmesi ile oluşmuş çok yumuşak kalın tortullar, Şekil 2.4b'deki konturlardan da görüldüğü gibi, önemli derinliklere kadar devam etmektedir. Bu yumuşak zeminler genellikle 0 ile 6 m kalınlığında sıkı bir kum tabakası ile birbirinden ayrılmış iki yumuşak kil tabakasından (Mexico City Kili) oluşmaktadır. Göl Zonu'nun önemli bir bölümünde yer altı suyu derinliği 2 m civarındadır. Foothill Kuşağı ile Göl Zonu arasında nehir çökellerinin düzensiz olarak yer aldığı ve kalınlığı fazla olmayan yumuşak zeminlerden oluşan Geçiş Zonu bulunmaktadır.

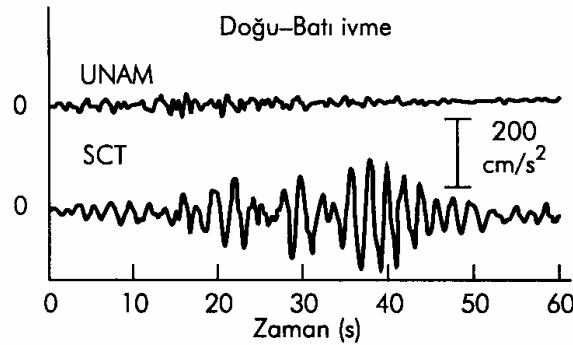
Mexico City'de 1985 yılından önce çok sayıda kuvvetli hareket ölçüm cihazı yerleştirilmiştir. Şekil 2.4'de Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM) ve Secretary of Communications and Transportation (SCT) kayıt sahalarının yerleri görülmektedir. Foothill Kuşağı'ndaki UNAM istasyonunun temelinin 3 ile 5 m kalınlığında bazaltlar oluşturulmuştur. SCT istasyonu ise Göl Zonu'ndaki yumuşak zeminler üzerine oturmaktadır.

Michoacan depremi çok büyük bir deprem olmasına rağmen, Mexico City'den çok uzakta olmasından dolayı UNAM istasyonunda sadece 0.03-0.04g'lik ivme üretmiştir (Şekil 2.5). Diğer taraftan, Göl Zonu'ndaki SCT istasyonlarındaki pik ivmeler UNAM'dakinin beş katından daha büyüktür. SCT hareketlerinin frekans içerikleri de UNAM hareketininkinden çok farklıdır. SCT'dekilerin baskın periyodu yaklaşık 2 s'dir. SCT istasyonlarında kuvvetli sarsıntının süresi daha uzun olmuştur. Şekil 2.6'da gösterilen tepki spektrumları Göl Zonu'ndaki zeminlerin yer hareketi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

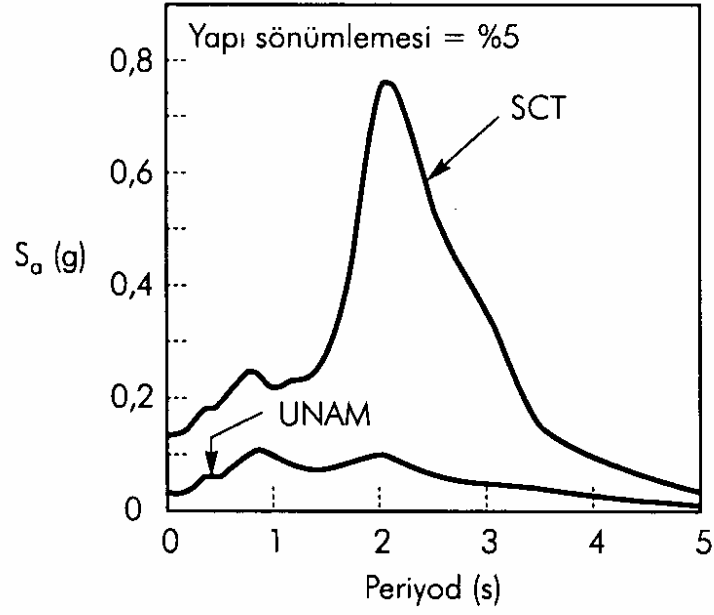


Şekil 2.4 Mexico City’de kuvvetli hareketi cihazları ve jeoteknik şartlar: (a) kuvvetli hareket cihazlarının Foothill, Geçiş ve Göl kuşaklarına göre konumu; (b) yumuşak zeminin kalınlık konturları (Stone vd., 1987’den)

Yaklaşık 2s’deki periyotlarda SCT sahasındaki spektral ivmeler UNAM sahasındakinden yaklaşık 10 kat daha büyüktür. SCT sahasının zemini, kayma dalgası hızı yaklaşık 75 m/s ve kalınlığı da 35-40 m olan yumuşak kilden oluşmaktadır. Buna göre, karakteristik zemin periyodu $T_s=4H/V_s \approx 4(37.5)/75=2$ s olup, bu değer Şekil 2.6’daki SCT tepki spektrumunun maksimumu ile uyum içerisindedir.



Şekil 2.5 UNAM ve SCT sahaslarındaki kuvvetli yer hareketi cihazları ile kaydedilmiş ivmenin zamana göre değişimi (Stone vd., 1987’den)



Şekil 2.6 UNAM ve SCT sahalarında kaydedilen hareketlerden hesaplanan tepki spektrumları (Romo ve Seed, 1986'dan)

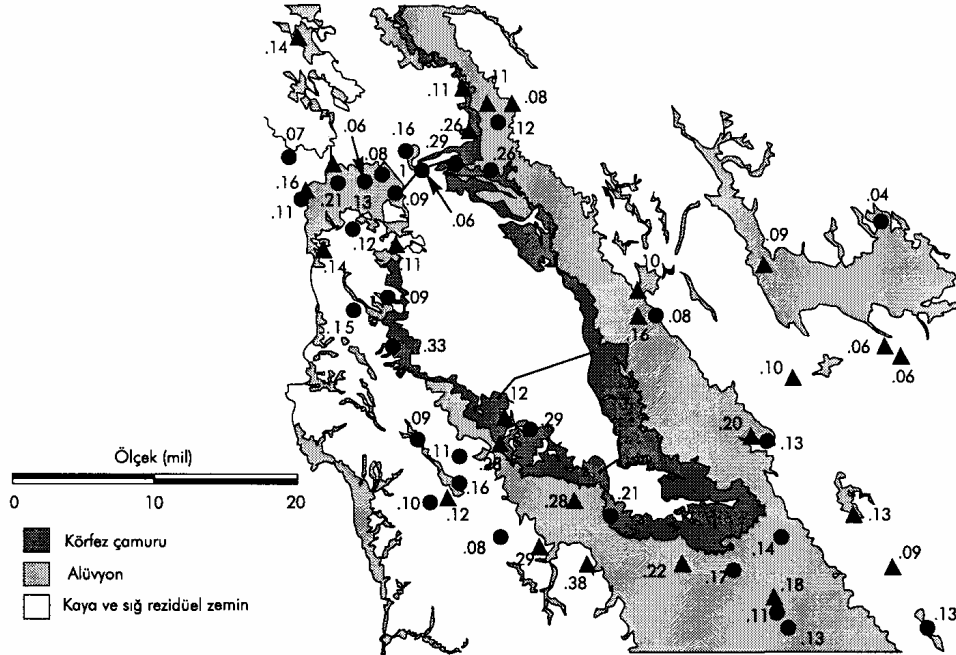
Mexico City'deki yapısal hasar oldukça seçici olmuştur. Kentin önemli bir kısmında herhangi bir hasar meydana gelmez iken, bazı bölgelerde çok büyük hasar meydana gelmiştir. Foothill Zonu'ndaki hasar önemsiz iken, Geçiş Zonu'nda da minimum düzeyde kalmıştır.

Hasarın en büyüğü, karakteristik zemin periyodunun 1.9 ile 2.8 s arasında tahmin edildiği ve 38 ile 50 m kalınlığındaki yumuşak çökellerden (Stone vd., 1987) oluşan Göl Zonunda olmuştur. Bu zonda, 5'ten daha az katlı veya 30'dan daha fazla katlı modern binalarda düşük düzeyde hasar gözlenmiştir. Ancak, kat sayısı 5 ile 20 arasında değişen yapılar ya tamamen çökmüş ya da ağır hasara uğramıştır. N katlı bir binanın esas periyodunun yaklaşık olarak $N/10$ s alındığı pratik kuralı kullanıldığında, hasar görmüş çoğu yapıların esas periyodunun karakteristik zemin periyoduna eşit veya ona yakın olduğu görülür.

2.4 San Francisco Körfez Bölgesi, 1989

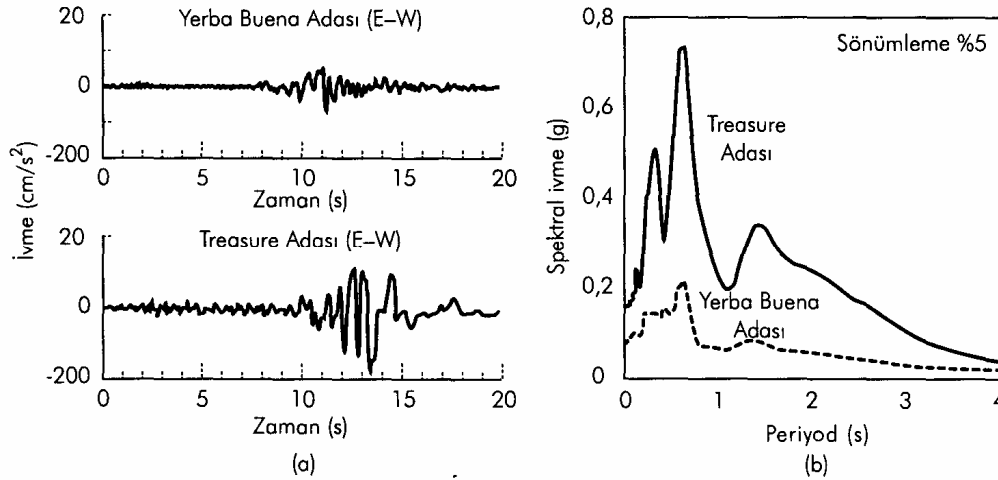
19 Ekim 1989'da San Francisco ve Oakland'ın (Kaliforniya) yaklaşık 100 km güneyindeki Loma Prieta Dağı'nın yakınında $M_s=7.1$ büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Loma Prieta depreminin dışmerkez civarında neden olduğu sarsıntının şiddeti (MMI) VIII iken, San Francisco ve Oakland'ın bazı kesimlerinde IX civarında olmuştur. Deprem hasarının bazı bölgelerde yüksek ve bazı bölgelerde ise nispeten düşük olması, yerel zemin etkilerinin önemli olduğuna işaret etmektedir (Seed vd., 1990).

San Francisco Körfezi havzası genellikle kumlu-çakıllı zeminlerin de eşlik ettiği alüvyal kil ve siltli kumlu kil ile doldurulmuştur. Daha derindeki çökeller tarihsel buzul denizi çekilmelerinden dolayı aşırı konsolide olmuş, fakat üstteki birim en son çekilme döneminden sonra oluşmuştur. San Francisco Körfezi Çamuru olarak bilinen bu birim, normal konsolide siltli kildir. Oldukça sıkışabilir nitelikteki bu malzemenin kıvamı, zemin yüzeyine yakın kesimde yumuşaktan başlayıp daha derinlerde orta katıya doğru artmaktadır. Sismik bölgeleme açısından Körfez alanı Şekil 2.7'deki gibi üç alt bölgeye ayrılmıştır. San Francisco Körfez Çamuru genellikle körfezin kenarlarında bulunur ve kalınlığı sıfır ile 30 m arasında değişmektedir.



Şekil 2.7 1989 Loma Prieta depremi sırasında San Francisco Körfez bölgesinde ölçülen pik yatay ivmeler (g cinsinden) (Değişik saha şartlarında pik ivmedeki değişime dikkat ediniz.) (Seed vd., 1990'dan).

Gerek dışmerkez ve gerekse San Francisco bölgesi, sismograflar ve akselometrelerle çok iyi şekilde donatılmıştır. Pik yatay ivmeler Şekil 2.7’de görülen lokasyonlarda kaydedilmiştir. Dışmerkeze yakın yerlerde yüksek olan bu ivmeler, kaynaktan itibaren mesafeye bağlı olarak sönümlenmiştir. Ancak, Kaya/Sığ Rezidüel Zemin kuşağındaki sahalarda sönümleme, Alüvyon veya Körfez Çamuru bölgelerinden daha çabuk gelişmektedir (Şekil 2.7). San Francisco Körfezi’ndeki Yerba Buena Adası ve Treasure Adası’nda yerleştirilen iki cihazın tepkileri özellikle çok anlamlıdır. Yerba Buena Adası’ndaki istasyon bir kaya mostrası üzerindedir. Treasure Adası ise, bir kısmı Yerba Buena Adası’nın hemen kuzeybatısında bulunan ve sığ kum sırtlarından oluşan denizel alanın hidrolik dolgu yapılarak oluşturulduğu, yapay bir adadır. Treasure Adası’nın altındaki zemin, değişken kalınlıklardaki San Francisco Körfez Çamurun’ndan oluşmaktadır. Bu sahadaki sismograf istasyonun altındaki zemin yapısı, 16.8 m kalınlığındaki San Francisco Körfez Çamuru üzerindeki 13,7 m kalınlığında gevşek kum şeklindedir. Yerba Buena sismograf istasyonu doğrudan kaya üzerindedir. İkisi de kaynaktan aynı mesafede olmasına rağmen, Yerba Buena Adası ve Treasure Adasında’ki cihazların kaydettiği zemin yüzeyi hareketleri birbirinden çok farklıdır. (Şekil 2.8 a). Yerba Buena Adası’ndaki pik ivmeler D-B yönünde 0.06g ve N-S yönünde 0,03g; Treasure Adası’ndaki ivmeler ise aynı yönlerde sırasıyla 0.16g ve 0.11g’dir. Bu iki sahaya ait tepki spektrumları Şekil 2.8 b’de verilmiştir. Ancak açık bir şekilde görüleceği gibi, Treasure Adası’nda alttaki anakaya hareketi yumuşak zemin tarafından önemli ölçüde büyütülmüştür.



Şekil 2.8 1989 Loma Prieta depreminde Yerba Buena ve Treasure adalarında zemin yüzeyi hareketleri: (a) zamana göre değişimleri; (b) tepki spektrumları (Seed vd., 1990’dan).

Diğer bölgelerdeki yumuşak zemin çökellerinin neden olduğu yer hareketi büyütmesinin San Francisco Körfez bölgesinin değişik kesimlerindeki hasara önemli ölçüde katkısı söz konusudur. I-880 Cypess Viyadüğü'nün deprem sırasında çöken kuzey bölümünün zemini San Francisco Körfez Çamuru'ndan oluşmaktadır, çökmeyen güney bölümü ise başka bir birim üzerine oturmaktadır.

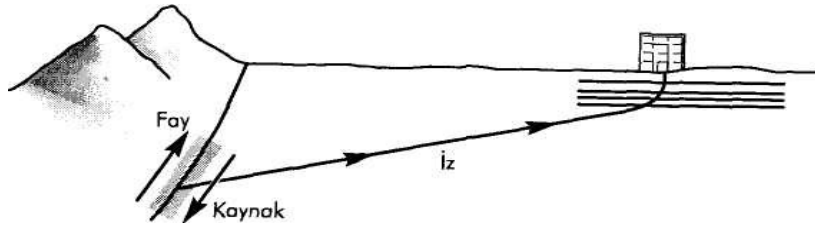
2.5 Zemin Davranış Analizleri

Geoteknik deprem mühendisliğinde en çok karşılaşılan problemlerden biri, yer tepkisinin değerlendirilmesidir. Tasarım tepki spektrumlarının geliştirilmesi için gerekli yer yüzeyi hareketlerinin kestirilmesinde, sıvılaşma tehlikelerinin değerlendirilmesinde gerekli dinamik gerilme ve birim deformasyonların belirlenmesinde ve toprak dolgular ile istinat yapılarının duraysızlığına yol açacak deprem kaynaklı kuvvetlerin belirlenmesinde yer tepki analizleri kullanılmaktadır.

İdeal şartlar altında eksiksiz bir yer tepkisi analizinde, deprem kaynağındaki yırtılma mekanizması, gerilme dalgalarının yer içinde yayılarak belirli bir sahanın altındaki anakayanın tepesine ulaşması modellenir ve yer yüzeyindeki hareketin anakaya üzerindeki zeminler tarafından nasıl etkilendiği belirlenebilir. Fay yırtılması mekanizması gerçekte çok karmaşık ve kaynaktan sahaya enerji aktarılması da çok belirsiz olduğundan, çoğu mühendislik uygulamalarında bu yaklaşım pek kullanışlı değildir. Pratikte, kestirici bağıntı türlerinin geliştirilmesi için, kaydedilmiş deprem özelliklerine dayalı ampirik yöntemler kullanılmaktadır. Bu kestirici bağıntılar çoğu zaman sahadaki anakaya hareketi özelliklerini kestirmek için sismik tehlike analizi ile birlikte kullanılmaktadır. O zaman, yer tepki analizi problemi sadece zemin çökelinin altta bulunan temel kayadaki harekete verdiği tepkinin belirlenmesinden ibarettir. Sismik dalgaların kaya ortamda yüzlerce km ilerledikten sonra zemin içinde de çoğu zaman 100 m'den daha az yol aldığı gerçeği dikkate alındığında, yer yüzeyi hareketi özelliklerinin belirlenmesinde zeminin çok önemli rol oynayacağı açıktır.

2.5.1 Bir Boyutlu Yer Tepki Analizi

Yerin yüzeyi altında bir fay yırtıldığı zaman, cisim dalgaları kaynaktan tüm yönlere yayılır. Farklı jeolojik birimlerin sınırlarına eriştiklerinde yansır ve kırılırlar. Sığ derinlikteki birimlerin dalga iletme hızları daha derinliklere göre daha düşük olduğundan, yatay katman sınırına çarpan eğimli ışınlar genellikle daha düşey bir konuma doğru kırılırlar. Işın yer yüzeyine ulaşana kadar meydana gelen kırılmalar bunların çoğu zaman düşeye yakın yönde kırılmalarına neden olurlar (Şekil 2.9). Bir boyutlu yer tepki analizleri, tüm sınırların yatay olduğu ve zeminin tepkisine egemen olarak ana kayadan düşey yönde yayılan dalgaların (SH dalgalarının) neden olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bir boyutlu yer tepki analizinde zemin ve anakaya yüzeylerinin yatay yönde sonsuz uzanımlı olduğu kabul edilir.



Şekil 2.9 Yer yüzeyine yakın kesimde yaklaşık olarak düşey dalga yayılması oluşturan kırılma süreci

2.5.1.1 Bir Boyutlu Yer Tepki Analizi İçin Nümerik Formülasyonlar

Sınırsız bir alan boyunca düşey yayılan kayma dalgasının hareket denklemi:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (2.1)$$

Burada; ρ ; yoğunluk, τ ; kayma gerilmesi, u ; yer değiştirme ve z ise zemin yüzünden uzaklıktır. Zeminin, Kelvin-Voigt cismi gibi davrandığı kabulü yapılarak kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirmesi ilişkisi:

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada G ; kayma modülü, γ ; kayma şekil değiştirmesi ve η ; viskozitedir.

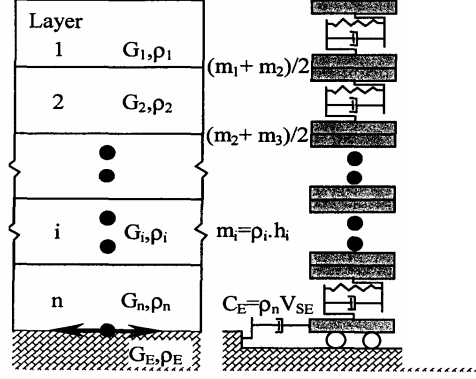
(2.2) eşitliği, (2.1) eşitliğinde yerine yazıldığında;

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (2.3)$$

denklemini elde edilir.

- **Frekansa Bağlı Çözüm**

Eşitlik (2.3), Şekil 2.10'da gösterilen çok serbestlik dereceli bir sistem için çözülebilir.



Şekil 2.10 Yatay katmanlanmış zeminde çok serbestlik dereceli model.

Burada; G ; kayma modülü, ρ ; yoğunluk, ξ ; sönüm oranı, V_s ; kayma dalgası hızı, h ; tabaka kalınlığı, k ; rijitlik (G/h), c ; viskoz sönümlemedir.

Herbir tabaka için belirlenen koordinatlar ve dalga denkleminin çözümü ile, herbir tabakanın en üstünde ve en altında oluşan yerdeğiştirmeler;

$$\begin{aligned} u(Z_m = 0, t) &= u_m = (A_m + B_m) e^{i\omega t} \\ u(Z_m = h_m, t) &= u_{m+1} = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (2.4)$$

burada; u ; yerdeğiştirme, A_m ve B_m yukarı ($-z$) ve aşağı (z) yönlerde yayılan dalgaların

genlikleri, h_m ; kalınlık ve herbir tabaka için $k_m^* = \frac{\omega}{(v_s)_m (1 + i\xi_m)}$ 'dir.

Sınır koşulları uygulandığında;

$$\begin{aligned}
A_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik^* m h_m} + \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik^* m h_m} \\
B_{m+1} &= \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik^* m h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik^* m h_m} \\
\alpha_m^* &= \frac{\rho_m (v_s)_m (1 + i \xi_m)}{\rho_{m+1} (v_s)_{m+1} (1 + i \xi_{m+1})}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Herhangi bir tabakadaki hareket, (i) tabakasındaki yerdeğiştirmeyi (j) tabakasındaki yerdeğiştirme ile ilişkilendiren transfer fonksiyonları yardımıyla başka bir tabakadaki hareketten hesaplanabilir.

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{A_i(\omega) + B_i(\omega)}{A_j(\omega) + B_j(\omega)} \tag{2.6}$$

Viskoziteyi daha gerçekçi tanımlayabilmek için frekanstan bağımsız sönüm oranı ξ kullanılmıştır.

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_s} = \frac{\eta \omega}{2G} \tag{2.7}$$

Burada; $E_s = \frac{1}{2} G \gamma_0^2$ 'dır. Eşitlik(2.7) tekrar düzenlendiğinde;

$$\eta = \frac{2G}{\omega} \xi \tag{2.8}$$

olur.

(2.8) eşitliği, (2.3) eşitliğinde yerine koyulduğunda frekanstan bağımsız hale gelir.

• Zamana Bağlı Çözüm

Zamana bağlı analizde, Şekil 10 (a)'da gösterilen sınırsız ortam Şekil 10(b)'de görüldüğü üzere parçalı kütle sistemi şeklinde idealize edilir. Dalga yayılma denklemi;

$$[M] \left\{ \ddot{u} \right\} + [C] \left\{ \dot{u} \right\} + [K] \{u\} = -[M] \{I\} \ddot{u}_g \tag{2.9}$$

şeklinde yazılabilir. Burada [M]; kütle matrisi, [C]; viskoz sönüm matrisi, [K]; rijitlik

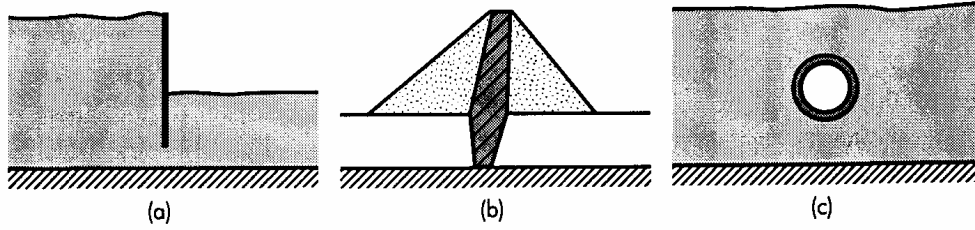
matrisi, $\{ \ddot{u} \}$; relatif ivme, $\{ \dot{u} \}$; relatif hız ve $\{ u \}$ ise relatif yerdeğiştirmedir.

\ddot{u}_g ; zemin tabanındaki ivme ve $\{I\}$ ise birim vektördür. Eşitlik (2.9), herbir adımda Newmark β metodu kullanılarak çözülür.

Lineer elastik malzeme için rijitlik matrisi sabittir ve $k_i = G_i/h_i$ olarak tanımlanır. Burada G_i ; kayma modülü, h_i ise i tabakasının kalınlığıdır.

2.5.2 İki Boyutlu Yer Tepki Analizi

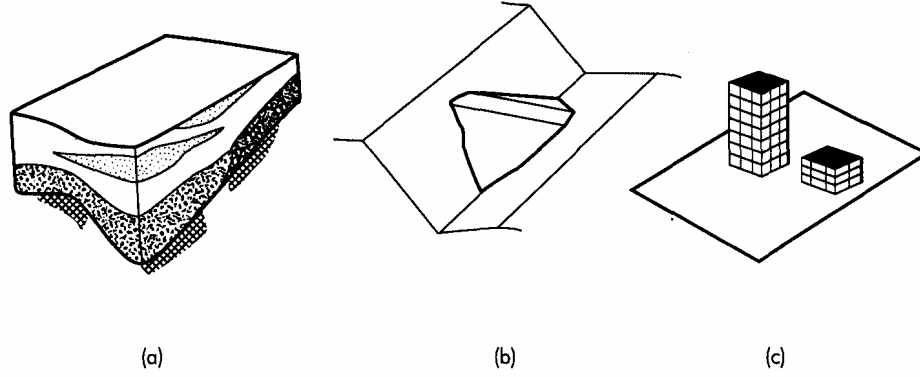
Bir boyutlu yer tepki analiz yöntemleri, düz veya malzeme sınırına paralel hafif eğimli yüzeylerde oldukça yararlıdır. Uygulamada böyle pek çok durum söz konusu olup bir boyutlu analizler geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında yaygınca kullanılmaktadır. Ancak, uygulamada karşılaşılan diğer bir çok problemde bir boyutlu dalga yayılma varsayımı amaç için uygun olmamaktadır. Eğimli veya düzensiz zemin yüzeylerinde rijit veya gömülü ağır yapılar veya duvarlar ile tünellerin bulunduğu tüm durumlar için iki boyutlu hatta belki de üç boyutlu analiz gereklidir. İçinde bir boyutun diğerlerine göre çok daha büyük olduğu problemler çoğu zaman iki boyutlu düzlemsel birim deformasyon problemi olarak ele alınabilir. Bununla ilgili sıkça rastlanan durumlar Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11 Tipik olarak iki boyutlu düzlemsel birim deformasyon dinamik tepki analizleri ile çözülen yaygın problemler (a) konsol palplanş perde;(b) toprak dolgu baraj;(c) tünel

2.5.3 Üç Boyutlu Yer Tepki Analizi

İki boyutlu modellemelerin elverişli olmadığı bazı durumlarda üç boyutlu dinamik tepki analizleri gerekebilir. Böyle durumlar, Şekil 2.12’de görüldüğü gibi zemin şartları üç boyutta değiştiği zaman ve üç boyutlu yapının tepkisi söz konusu olduğu zaman ortaya çıkabilir.



Şekil 2.12 Üç boyutlu dinamik tepki veya zemin yapı etkileşim analizi gerektiren üç durum:
 (a) zemin şartlarının üç boyutta önemli olarak değiştiği saha; (b) dar vadideki toprak dolgu baraj; (c) zemin tepkisinin yapıların tepkisinden etkilendiği saha.

Üç boyutlu dinamik tepki problemlerinin ele alınış şekli iki boyutlu problemlerinki ile büyük benzerlik gösterir. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımların ikisini de kullanan dinamik sonlu eleman analizleri mevcuttur. Özellikle zemin-yapı etkileşimi konuları olmak üzere çok sayıda üç boyutlu analiz geliştirilmiştir. Toprak barajlardaki önemli problemlerde, dar vadilerdeki barajların yaklaşık tepkilerini belirlemede kayma kirişi analizleri geliştirilmiştir.

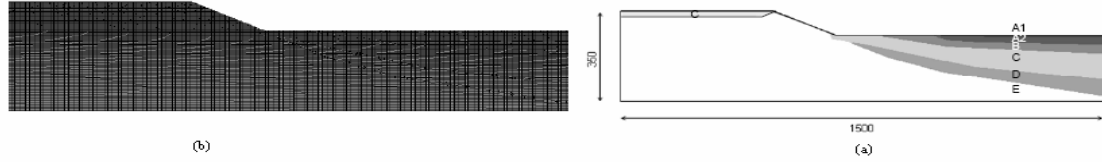
2.6 Yüzey Topoğrafya’sının Yer Hareketi Üzerindeki Etkisi

Yerel zemin koşulları kuvvetli yer hareketinin özelliklerini çeşitli şekillerde etkiler. Bir alandaki yerel jeoloji, ana kayadan yüzeye doğru yol alan sismik hareketin genliğini, frekans bileşenlerini değiştirebilir. Zeminin etkisi, zemin tabakalarının kalınlıkları, yüzey topoğrafyası, alan içinde yer alan faylar, süreksizlikler gibi bir çok faktöre bağlıdır.

Yüzey ve yer altı topoğrafyası, sismik enerjinin sönümlenmesi veya büyütülmesi, dalgaların kırılması ve yansması gibi iki boyutlu etkilerde önemli rol oynar.

Bu tez çalışması ile benzer amacı güden bir çalışma Yunanistan’ın Corinth Körfezinde yer alan CORSSA (Corinth Soft Soil Array) bölgesinde yapılmıştır (Ktenidou vd. 2007).

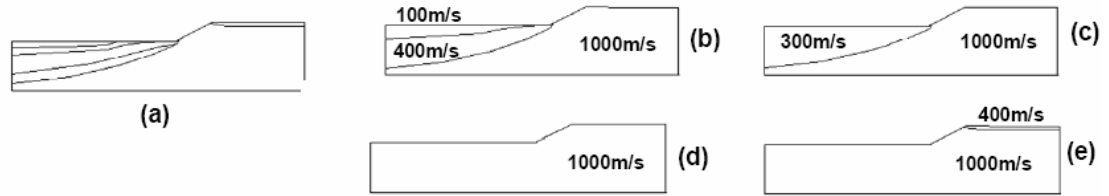
Bu bölge karakteristik yüzey topografyasının yanında karmaşık bir yüzey altı topoğrafyasına da sahiptir ve bölgeden Aegion fayı geçtiği için fay boyunca yatay süreksizlik mevcuttur. Çalışmada önceki depremlerden ve mikrotremor ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Zemin kesiti ve iki boyutlu analizlerde kullanılan model Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 (a) Zemin modeli, (b) 2D analizlerde oluşturulan model

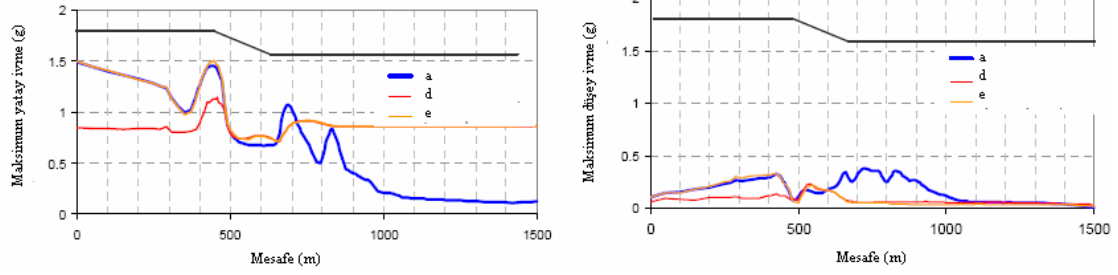
Çalışmada kesit beş farklı şekilde incelenerek topoğrafik etkiler araştırılmıştır (Şekil 2.14).

Orijinal kesitin hiç değiştirilmeden analizi (a), vadi tarafını iki tabakaya ayırarak yapılan analiz (b), vadi kısmını tek tabaka olarak göz önüne alan analiz (c), tüm kesitin ana kaya gibi incelenmesi (d) ve yalnızca yukarı kısımdaki dolgu tabakasını göz önüne alan analizler (e) yapılarak tabakalanmanın, ara yüzeylerin ve zemin-zemin etkileşimlerinin etkileri araştırılmıştır.

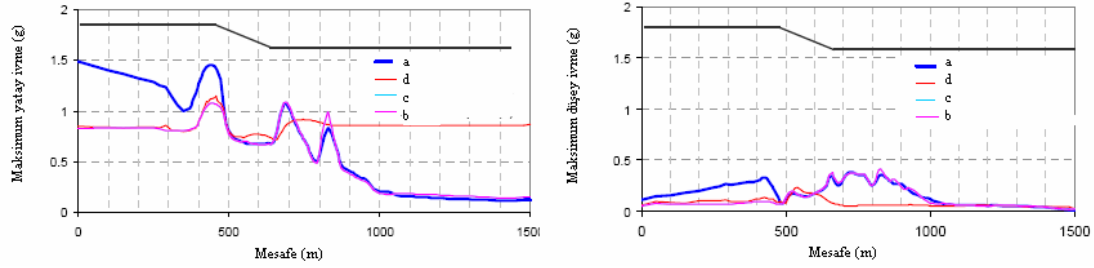


Şekil 2.14 Analizlerde kullanılan 5 model.

Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da FLAC 2D (Itasca Consultants, 2002) iki boyutlu programı kullanılarak yapılan analizlerin sonucunda her model için elde edilen yatay ve dikey maksimum ivmelerin karşılaştırılmaları yer almaktadır.



Şekil 2.15 a,d,e modelleri için kesit boyunca maksimum yatay ve düşey ivmeler.



Şekil 2.16 a,d,c,b modelleri için kesit boyunca maksimum yatay ve düşey ivmeler.

Şekil 2.15'de model (a) ile model (e) karşılaştırıldığında maksimum ivme değerlerinin aynı olduğu görülür. Şekil 2.16'da ise model (b) ve (c) için neredeyse aynı PGA değerleri elde edildiği gözlenmektedir. Her iki yöndeki PGA değerleri incelendiğinde gerçek modelin (a), diğer basit modellerin (e,b ve c) süperpoze edilmiş hali olduğu görülmüştür.

2.7 1966 Duvall Depreminde Fraser Deltasındaki Yer Hareket Verilerinin Bir ve İki Boyutlu Analizleri

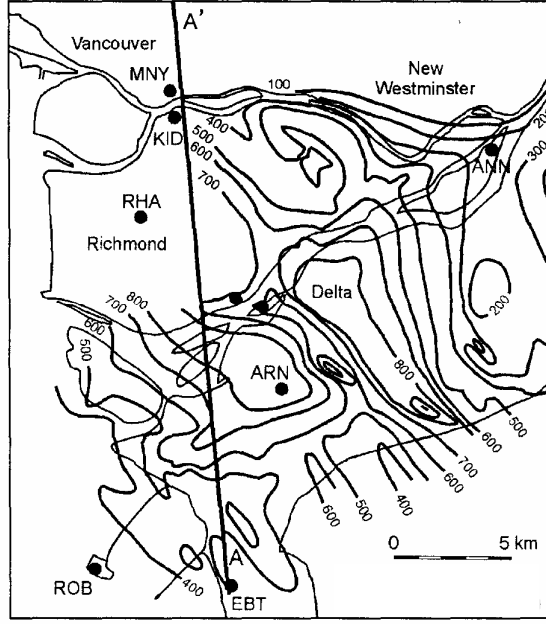
Kanada Jeolojik Araştırma Kurumu (GSC), 1994'te ince katmanlı yumuşak çökellerin sismik tepkisini modellemek amacıyla bir proje başlatmıştır. Zemin tepki analizleri, 1994'te yapılan 300 m derinlikli iki sondajdan alınan verilere dayanarak yapılmıştır. Ayrıca çalışmada Delta'daki anakaya derinliğini tespit eden sismik yansıma profillerinden de yararlanılmıştır. Benzer tepki çalışmaları daha öncede çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmıştır (Finn ve diğ., 2001). Fakat bu çalışmalarda, anakaya derinliği ve Pleistosen ve Holosen arasındaki sınır ile ilgili varsayımlar yapılmak zorunda kalınmıştır. Bunun yanında derinlerdeki zemin özellikleri ile ilgili bilgiler de çok yetersizdir. GSC çalışmasında, uzun periyotlu yer hareketlerinde ($3.5 \leq T \leq 5$) gözlenen önemli zemin büyütmelemlerinin muhtemelen Delta'nın

daha derin çökellerinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu büyütme davranışı, yüksek binalar, köprüler, endüstriyel tesisler ve boru hatları için beklenen tehlikeyi artırmıştır. GSC tarafından 1997'ye kadar yapılan arazi çalışmalarında düzensiz anakaya üzerinde kalınlıkları değişen Holosen ve Pleistosen çökellerinin karmaşık topografyası belirlenmiştir. Bu çalışmada, ek sondajlarla zemin özelliklerinin tanımlandığı ve Holosen ile Pleistosen çökellerde kayma hızını veren ve aradaki sınırı daha iyi belirleyen geniş kapsamlı jeofizik çalışmalar da yapılmıştır.

Delta'da ki zemin tepki analizleri, 1996 Duvall Depremi'nde tetiklenmiş kuvvetli hareket kayıt istasyonlarından alınan veriler ile yapılmıştır. Hesaplanmış ve kaydedilmiş tepkiler, bir boyutlu analizin Delta'daki potansiyel sismik tepkiyi bulmak için yeterli olup olmadığını belirleyebilmek amacıyla karşılaştırılmıştır. Yüzey altı topografyasının etkilerini görmek ve iki boyutlu analizlerin zemin tepkilerini daha iyi örnekleyip örneklemediğini anlamak için Delta'nın iyi tanımlanmış bir en kesiti iki boyutlu bir model kullanılarak analiz edilmiştir. Bir boyutlu analizler, SHAKE adlı program kullanılarak yapılmıştır.

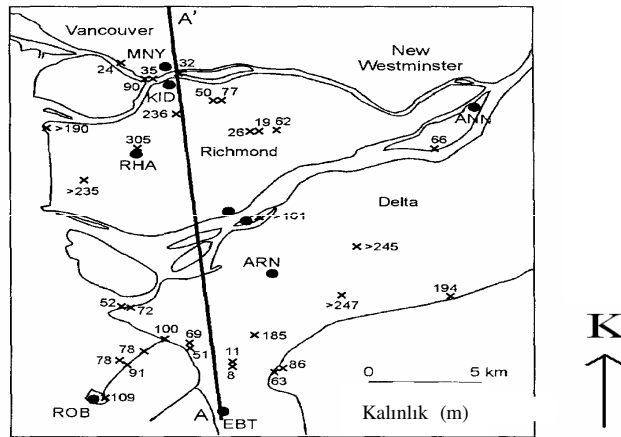
2.7.1 Delta'nın Jeolojisi

Güneybatı British Columbia'daki Fraser Delta'sı, Fraser Irmağı'nın kuzey kolunun aşağısındaki Vancouver'ın hemen güneyinde yer alır. Delta'nın içerisine oldukça hızlı gelişen Richmond şehri kurulmuştur. Tersiyer ana kayanın üstündeki çökeller kalınlıkları ile birlikte tanımlanmışlardır (Rogers ve diğ., 1997). Delta'nın altında yer alan çökeller, Holosen döneme ait nehir çökelleri ve Pleistosen döneme ait buzul çökelleridir. Holosen çökeller 300 m kalınlığa kadar ulaşır ve genel olarak kumlardan ve silt'ten oluşur. Pleistosen çökeller, tersiyer kayanın üzerinde bulunur ve silt ve kum hücreleri içerir. Holosen ardışıklarında kayma dalgası hızı derinlikle artar ve tipik ortalama değerleri 200-300 m/sn arasında değişirken yüzeye yakın yerlerde 100 m/sn değerini alır. Pleistosen çökellerdeki ortalama kayma dalgası hızı önemli değişikliklerle beraber 500 m/sn değerindedir. Tersiyer ana kayanın kayma dalgası hızı ise 1500 m/sn ve daha büyük değerlerdedir. Tersiyer ana kaya derinliği Şekil 2.17'de görüldüğü gibi haritalanmıştır (Britton ve diğ., 1995).



Şekil 2.17 Tersiyer ana kayanın derinliği

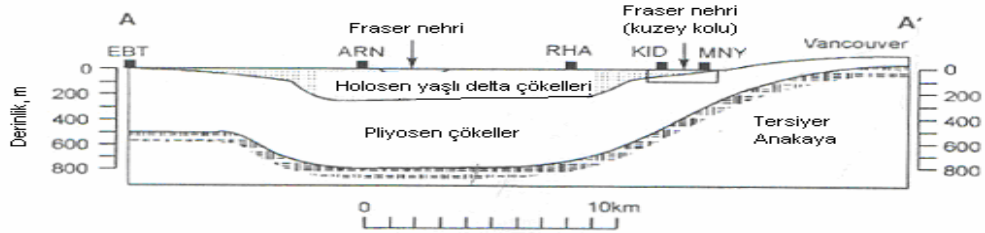
Şekil 2.18'de ise çalışma alanındaki Holosen çökellerin kalınlıkları gösterilmiştir. Havzanın kuzey köşesine doğru Holosen çökellerin kalınlığı hızlı bir şekilde azalmakta, kuvvetli hareket kayıt bölgeleri ARN ve RHA'ya yakın havza merkezinde kalınlık 300 m civarında iken Fraser Irmağı'nın kuzeyine yakın MNY kayıt istasyonuna doğru sığlaşmaktadır.



Şekil 2.18 Holosen çökellerinin kalınlıkları

Buna karşılık, Pleistosen çökeller kuzeye doğru yavaş yavaş incilir ve Fraser Deltası boyunca uzanarak Vancouver alanının büyük bir kısmını kaplar. Tersiyer kayaya uzaklık Delta merkezinde 800 m civarında iken Fraser Irmağı'nın kuzey koluna yakın yerlerde (KID, MNY

ve RHA kayıt istasyonlarında) 200-400 m arasındadır. Anakaya üzerinde saptanmış bazı yükselti ve EBT kayıt istasyonu civarındaki gibi Pleistosen yüzeyler mevcuttur. Şekil 2.17 ve Şekil 2.18, Deltada boyunca A-A' kuzey-güney en kesitinin kabaca çizilebilmesi için temel oluşturur. Bu en kesit Şekil 2.19'da görüldüğü gibi Holosen/Pleistosen sınırının ve tersiyer anakayanın başlangıcının yaklaşık yerleşimlerini verir.



Şekil 2.19 A-A' Enkesiti

2.7.2 Kuvvetli Hareket Verileri

Washington, USA'da meydana gelen $M=5.1$ şiddetindeki Duvall Depreminde tetiklenen Fraser Deltası'ndaki kuvvetli kayıt istasyonları Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Bu aletlerin hepsi dijital kayıt yapmaktadır ve %0.4-1 g arası tetiklenmeye ayarlıdır. Dijital veriler, düşük genlikli kayıtları yorumlamak için gerekli yüksek çözünürlüğü sağlarlar. Bu çalışmada kullanılan istasyonlar ile ilgili detaylar ve deprem sırasında kaydedilen pik ivme değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Çalışmada kullanılan kayıt istasyonları ile ilgili bazı detaylar ve kaydedilen maksimum ivmeler (cm/sn^2)

İstasyon	Uzaklık (km)	Zemin durumu	Maksimum İvme (cm/s^2)		
EBT	166.3	500 m (P)	6.0	3.2	1.5
KID	185.3	45 m (H) 200 m (P)	12.8	13.6	2.9
MNY	186.1	3 m (H) 200 m (P)	15.0	6.9	3.7
RHA	182.7	300 m (H) 500 m (P)	9.0	10.7	2.3

Kayda kayıt yapan tek kuvvetli hareket istasyonu Sidney yakınındaki Vancouver adasındaki Geosience Merkezinde kurulmuştur. Bu teçhizat granit anakayanın üstüne oturtulmuştur. Bu çalışmada, dikkate alınan deprem merkezinden kayıt istasyonlarına uzaklık 160 ve 180 m arasında değişmekte olup bütün istasyonlar için çevresel koşullar neredeyse aynıdır. Bu

yüzden izlenen yol etkilerinin çok önemli olması beklenemez. İstasyonlar için deprem sırasında tetiklenmiş pik ivmeler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Çeşitli doğrultularda alınan filtre edilmiş maksimum ivmeler (cm/sn^2)

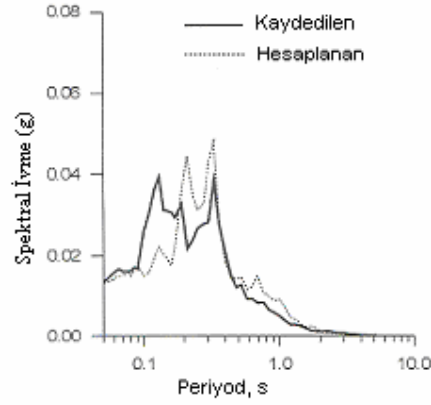
İstasyon	L	Doğrultu (°)	T	Doğrultu (°)	V	Rad	Tan
EBT	4.6	0	-4.5	90	1.5	3.23	5.93
KID	11.9	180	-14	270	2.9	13.61	9.31
PGC	4.6	0	3.5	90	1.8	3.38	4.54
MNY	-6.2	0	15.5	90	-3.7		
RHA	11.1	270	-8.2	0	2.4	10.65	8.87

Radyal hareketler, hareketin merkezi ile kuvvetli hareket istasyonları arasındaki hat boyunca meydana gelir. Bütün istasyonlar için L ve T bileşenleri aynı yönde iken Ran ve Tan bileşenleri az da olsa farklı yönlere sahiptirler. Farklı metodlarla yapılan analizlerin değerlendirilmesi için L ve T bileşenleri kaynak oluşturur ve sadece bu yönler için sonuçlar verilmiştir. Kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilen düşük seviyeli hareketlerin spektrumları ile Pasifik Geosience Merkezi tarafından kurulan sismik ağdaki uzak istasyonlardan alınan hareket kayıtlarının spektrumları karşılaştırılarak doğrulama yapılır.

2.7.3 Bir Boyutlu Analiz Sonuçları

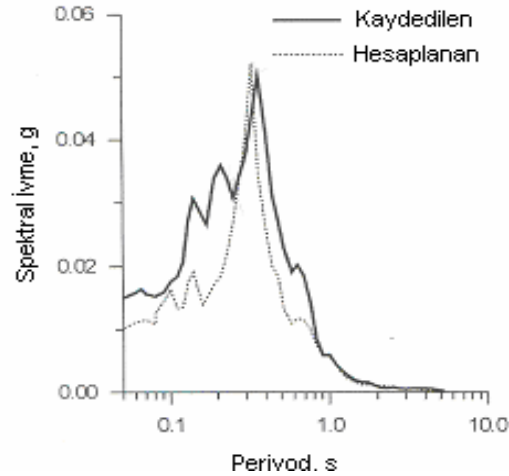
KID İstasyonu

Sismik tepki analizleri, Çizelge 2.2’deki L ve T bileşenlerini hareket veri girdisi olarak kullanan Shake programı kullanılarak yapılmış ve ivmeler, Fourier spektrumları ve ivme tepki spektrumları her bileşen için hesaplanmıştır. Hesaplanan ve kaydedilen hareketlerin karşılaştırılması ivme tepki spektrumuna bağlı olarak yapılmıştır. 180° bileşeni için hesaplanmış tepki spektrumu Şekil 2.20’de gösterilmiştir.



Şekil 2.20 180° Bileşeni için Hesaplanmış İvme Spektrumu ile Kaydedilen İvme Spektrumunun Karşılaştırılması

0.4 sn'den büyük periyotlar için kayıtlı spektrumların orta derecede uyumlu olduğu ve 0.35 civarındaki periyotlar için pik tepki gösterdiği gözlemlenirken, 0.4 sn' den kısa periyotlar için karşılaştırma çok iyi değildir. 0.2 ile 0.4 sn. arası periyotlarda hesaplanan spektrumun, kayıtlı spektrumları oldukça aşmaktadır. Hesaplanan hareketlerin spektrumu, 0.1 sn. ve 0.35 g' de kayıtlı hareketlerin spektrumunu oldukça aşan pik tepkiler göstermektedir. 0.1 ve 0.2 sn. arasındaki periyotlarda kayıtlı hareket spektrumları 0.13 sn. civarında pik gösteren kuvvetli tepkiler göstermektedir. Bu kısa periyot aralığında hesaplanan spektrum, kayıtlı tepkinin gerçek değerinin oldukça altındadır. Bu model, Şekil 2.21'de gösterilen 270° bileşenine oldukça benzer.

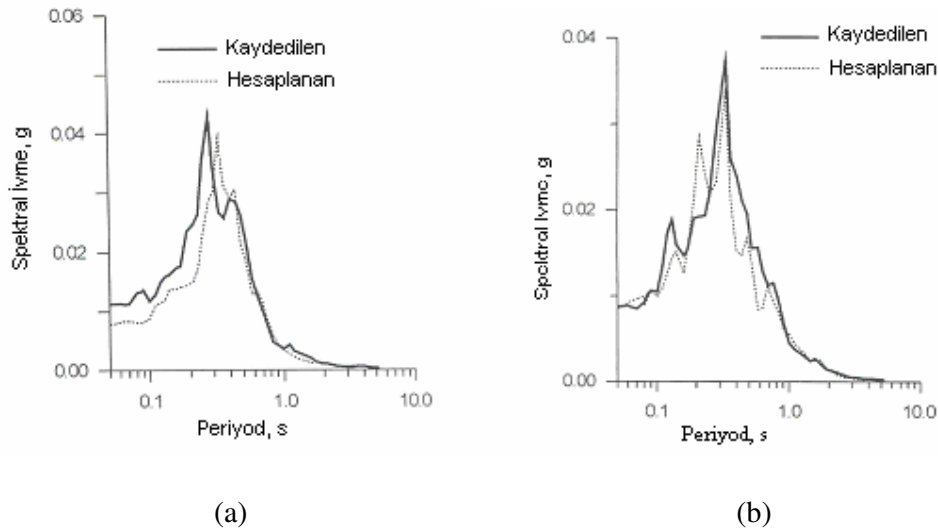


Şekil 2.21 270° Bileşeni için Hesaplanmış İvme Spektrumu ile Kaydedilen İvme Spektrumunun Karşılaştırılması

Bu durum için 0.3 sn.'den büyük periyotlarda makul bir uyumluluk ve kayıtlı hareket ile şiddet ve frekansta yakın uyumluluk gösteren pik tepkiler gözlenmektedir. Fakat 0.3 sn.'nin altındaki periyotlar için hesaplanan hareketler yine kayıtlı hareketlerin gerçek değerinin altında çıkmıştır. Dinamik tepki analizleri, KID istasyonunda, hareketin L ve T bileşenlerinin ikisi için de pik tepki periyotlarını doğru şekilde tanımlamaktadır. 0.4 sn.'den büyük periyotlar için hesaplanan tepki spektrumları oldukça uyumludur, fakat kısa periyotlar için hesaplanan tepki, gerçek değerinin oldukça altında çıkmaktadır. PGC kaya hareketinin spektrumu, 0.4 sn.'den küçük periyotlar için amplifikasyon göstermektedir.

Richmond Şehir Mahkemesi yakınındaki RHA İstasyonu

RHA'daki tersiyer anakaya derinliği 800 m'yi, Holosen çökellerin derinliği ise 300 m'yi bulmaktadır. Bu alan, uzun periyot hareketlerinde önemli amplifikasyonlarının beklendiği bir sahadır. 0° ve 270° bileşenleri için hesaplanan ve kaydedilen tepki spektrumları sırasıyla Şekil 2.22'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.22 RHA istasyonunda hesaplanan ve kaydedilen ivme spektrumlarının karşılaştırılması (a) RHA 0° , (b) RHA 270°

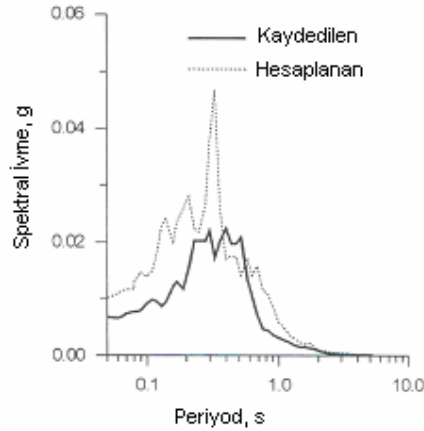
Bu istasyonda, kaydedilmiş ve hesaplanmış hareketler karşılaştırıldığında, L ve T bileşenleri için tüm frekans aralıklarında bir uyum olduğu gözlenmektedir. Bu derin arazide 1-D tepki analizlerinin yeterli olduğu görülürken, bunun Holosen/Pleistosen sınırının çok derinlerde olması dolayısıyla mümkün olduğu düşünülmektedir.

MNY İstasyonu

MNY istasyonunda, sondaj bilgisi mevcut olmadığından dolayı Holosen çökellerin kalınlığı ile ilgili bazı belirsizlikler vardır. İleri ve geri yansıma kontrollerinden elde edilen kalınlıklar sırasıyla 29.5 ve 49.2 m.'dir.

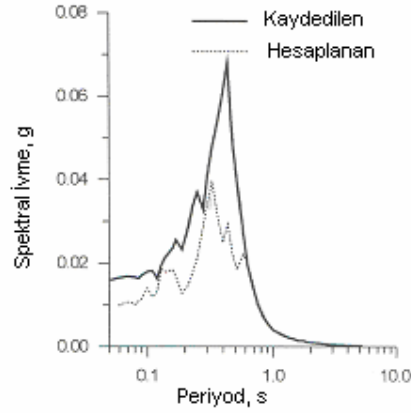
PGC hareketlerinin L ve T bileşenlerini veri olarak kullanan ve kayma dalgası hızının yansıma kontrolleri ile bulunduğu dinamik tepki analizleri her model için ayrı ayrı yapılmıştır.

0° bileşeni için kayıtlı hareketlerin tepki spektrumları, 0.2-0.6 sn. arası periyotları kapsayan pik tepki bölgesi ile birlikte geniş bir alanı oluşturmaktadır. Hesaplanan maksimum spektrum 0.3 sn. civarındadır (Şekil 2.23) ve aynı alanda kaydedilene göre 3 kat büyüktür.



Şekil 2.23 0° Bileşeni için Hesaplanmış İvme Spektrumu ile Kaydedilen İvme Spektrumunun Karşılaştırılması

270° bileşeni için de (Şekil 2.24) kaydedilen ve hesaplanan hareketlerin spektrumları birbirleriyle çok uyumlu değildir.



Şekil 2.24 270° Bileşeni için Hesaplanmış İvme Spektrumu ile Kaydedilen İvme Spektrumunun Karşılaştırılması

Bu durum için pik tepkinin hesaplanan periyodu, kayıtlı tepkinin periyodundan 0.1 sn. kısa ve büyütme ise yaklaşık %40 daha azdır. Genellikle, pik tepkinin periyot aralığı dışında kalan uzun ve kısa periyotlarda spektrum karşılaştırılmasının daha uyumlu olduğu görülmektedir.

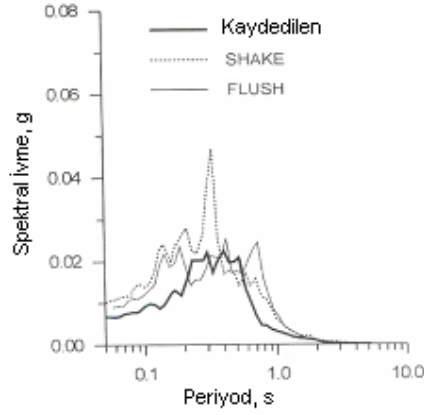
2.7.4 İki Boyutlu Tepki Analizleri

2-D eşdeğer lineer tepki analizleri Şekil 2.19’da gösterilen A-A’ en kesitinin bir kesiminde FLUSH programı kullanılarak yapılmıştır. Kapsamlı 2-D analizlerinin gerekliliklerinin detaylı çalışılmasından sonra, en uygun stratejinin KID ve MNY istasyonlarını içeren kesiti seçmek olduğuna karar verilmiştir. İstasyonlar birbirine yakındır ve Holosen çökellerin derinliği 50 m’den azdır. Hesapları basitleştirmek için analizlerin derinliği 100 m ile sınırlanmıştır. Bu, model tabanının tamamen Pleistosen içinde kalmasını sağlamakta ve modelin boyutları Şekil 2.19’da KID ve MNY’yi içine alan dikdörtgenden oluşmaktadır. Model iki istasyonun arasından akan fakat KID’ye daha yakın olan Fraser Irmağı Kuzey Kolu Kanalını hem hesaba katarak hem de katmayarak iki şekilde de analiz edilmiştir.

2.7.4.1 İki Boyutlu Analiz Sonuçları

MNY İstasyonu

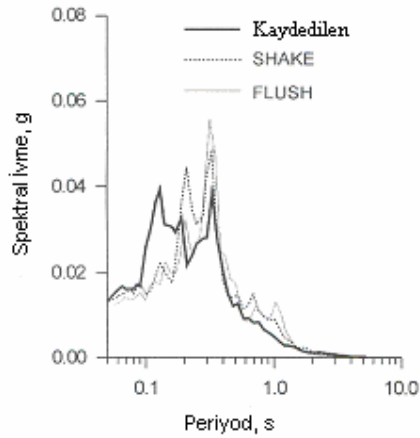
Analiz ilk olarak Fraser Irmağı’nın kuzey kolunu hesaba katacak şekilde yapılmıştır. MNY(0°) için ivme spektrumları Şekil 2.25’te verilmiştir. FLUSH ile hesaplanan tepki spektrumunun, SHAKE ile hesaplanan spektrumla karşılaştırıldığında, kayıtlı hareket spektrumuna daha yakın bir sonuç verdiği görülmektedir.



Şekil 2.25 MNY istasyonundaki ivme spektrumunun karşılaştırılması

KID İstasyonu

Analiz ilk olarak Fraser Irmağı uzey Kolunu içerecek şekilde yapılmıştır. KID (180°) için ivme spektrumları Şekil 2.26'da verilmiştir.



Şekil 2.26 KID istasyonundaki ivme spektrumunun karşılaştırılması

FLUSH tarafından hesaplanan spektrum, kayıtlı hareket spektrumlarına oldukça yakındır. 0.2 sn. periyotlarında SHAKE tarafından tahmin edilen kuvvetli spektral büyütme FLUSH analizlerinde görülmemektedir. Fakat 0.1-0.25 sn. periyot aralığındaki hesaplanan tepkiler hala gerçek değer in altındadır. Modelde ırmak dikkate alınmadığında da tepkiler çok benzerdir yalnız $T=1.05$ 'te tepki, ırmak dikkate alınarak hesaplanan tepki ile karşılaştırıldığında 2 katı büyük bir sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca $T=0.35$ sn.'deki tepkinin çok büyütülmüş olduğu, diğer periyotlardaki spektrumların çoğunlukla neredeyse

aynı olduğu gözlenirken, 0.2 sn. altındaki periyotlarda 2-D FLUSH analizinde hesaplanan spektrumlar gerçek değerinin altında çıkmıştır.

2.7.5 Sonuçlar

1-D tepki analizleri ile her durum için pik tepki periyotlarının iyi bir şekilde belirlendiği görülmüştür. KID istasyonu gibi bazı alanlarda kayıtlı hareketler 0.1-0.25 sn. kısa periyot aralığında kuvvetli spektral tepkiler göstermektedir. Richmond Şehir Mahkemesi yakınında, Holosen/Pleistosen sınırının çok derinde olduğu RHA istasyonunun derin çökellerinde, 1-D analizler kayıtlı hareketlerin iyi modellenmesini sağlamışlardır. 2-D analizlerin kullanılması zemin tepki spektrumunun tahminini oldukça geliştirmiştir. Bu analizlerde, yüzey altı topografyasının ve Holosen ile Pleistosen arasındaki sınırın derinliğinin etkisi görülmüştür. Ana kayanın topoğrafyasının da davranış üzerinde önemli etkisi olmaktadır. Bu etki ise 3-D dinamik tepki analizleri ile bulunabilir.

3. İNCELEME ALANINDA YAPILAN DİNAMİK ANALİZLER

İnceleme alanında 3 adet kesit üzerinde farklı topoğrafik ve jeolojik özellikleri temsil edecek şekilde seçilmiş noktalar üzerinde bir boyutlu analizler ve kesitlerin bütün olarak girildiği iki boyutlu analizler yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Bir boyutlu analizler için EERA ve DEEPSOIL programları kullanılırken, iki boyutlu analizler için PLAXIS 8.5 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

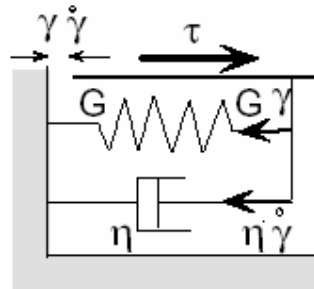
3.1 EERA (2000) Programı

1998 yılında SHAKE ile benzer kabuller yapılarak FORTRAN 90 ile EERA (Equivalent-Linear Earthquake Response Analysis) programı geliştirilmiştir. EERA, FORTRAN 90 dili ile hazırlanmış olan eşdeğer lineer deprem tepki analizi programının EXCEL'de uygulanmasıdır ve EERA'nın girdi ve çıktı verileri EXCEL programı ile ilişkilendirildiği için DOS ortamında çalışan SHAKE programına göre kullanımı daha kolaydır.

Programda zemin Kelvin-Voigt modeli ile ifade edilmekte ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri bu kabule dayanılarak yapılmaktadır. Kayma gerilmesi τ , kayma şekil değiştirmesi, γ ve şekil değiştirme hızına, $\dot{\gamma}$ bağlı olarak şu şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\tau = G\gamma + \eta \dot{\gamma} \quad (3.1)$$

Burada G kayma modülünü ve η viskoziteyi temsil etmektedir.



Şekil 3.1 Eşdeğer lineer metotta kullanılan gerilme-şekil değiştirme modeli (Bardet vd., 2000).

SHAKE programında yapılan kabuller EERA için de aynen geçerlidir. Zemin tabakalarının sadece kayma deformasyonu yapacağı varsayıldığı için, düşey bir zemin kolonu, kayma kirişi gibi düşünülerek analizler yapılmaktadır. Hareket halindeki viskoelastik elementler bir parça üzerinde kayma dalgalarının oluşturduğu kayma gerilmeleri artımları, eşit ve ters yönlü elastik ve viskoz kayma gerilmeleri artımlarına neden olacağından bu durumu ifade eden diferansiyel denklem (hareket denklemi) kurulmuş ve yer değiştirmeler harmonik fonksiyonlarla temsil edilerek çözüm elde edilmiştir. Tabakaların ara yüzeylerinde yer değiştirmelerin ve kayma gerilmelerinin eşitliği şartı, çözümün sürekliliğini sağlamaktadır. İki tabaka arasında transfer ya da büyütme fonksiyonu, çeşitli frekanslardaki dalgaların bu tabakaların yüzeyinde oluşturduğu yer değiştirmelerin oranı şeklinde ifade edilmektedir. Frekans ortamında yapılan çözümlerde, öncelikle ana kaya ivme kaydının Fourier dönüşümü ile kayıt frekans ortamına taşınmaktadır. Bu dönüşüm zemin tabakalarının transfer ya da büyütme fonksiyonları ile çarpılarak, yüzeydeki kaydın Fourier transformu elde edilmektedir. Yüzey kaydının ters Fourier dönüşümü ile tekrar zaman ortamında, zemin davranışının etkilerini de taşıyan, ivme kaydı elde edilmektedir. Yüzeydeki ivme kaydı ya da frekans ortamındaki hali, diğer parametre ve fonksiyonların hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Zemin davranış analizinde, önce kayma modülü ve sönümün başlangıç değerleri düşük deformasyon seviyelerine karşı gelecek şekilde seçilmekte ve tüm deprem süresi için bir elastik analiz yapılmaktadır. Bu başlangıç çözümlerinde her tabaka için efektif deformasyon seviyesi hesaplanmaktadır. Bunun için R_γ , olarak ifade edilen deprem manyetidüne bağlı bir katsayı ile maksimum deformasyon çapılarak efektif şekil değiştirme bulunabilmektedir. Daha sonra bu efektif deformasyon seviyeleri ile uyumlu kayma modülü ve sönüm oranları seçilmekte ve bir sonraki iterasyonda kullanılmaktadır. Eşdeğer lineer analiz tüm tabakalarda şekil değiştirme ile uyumlu kayma modülü ve sönüm oranı değerleri oluşuncaya kadar devam etmektedir.

Eşdeğer lineer model zeminlerin bazı nonlinear özelliklerini göz önüne almak için Kelvin–Voigt modelinin modifiye edilmesi ile geliştirilmiştir. Zeminlerdeki tekrarlı yükleme altındaki nonlinear ve histeretik gerilme–şekil değiştirme davranışı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Eşdeğer lineer kayma modülü, G , kayma şekil değiştirme seviyesi genliği γ ya bağlı, Sekant modülü G_s olarak alınmıştır. Şekil 3.2 (a)’dan görülebileceği gibi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (3.2)$$

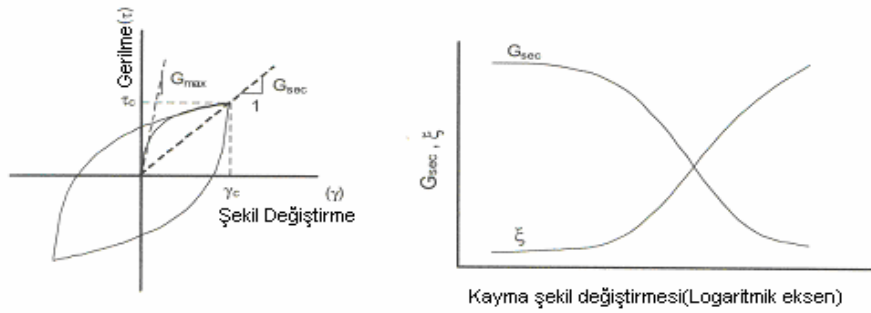
Burada τ_c ve γ_c sırasıyla kayma gerilmesi ve şekil değiştirme genliğidir. Bir döngüde yutulan enerji miktarı bir döngünün tamamlanmasıyla oluşan histerisis eğrisinin alanına eşittir.

$$W_D = \oint_{\tau_c} \tau d\gamma \quad (3.3)$$

Depolanan enerji ise (3.4) eşitliği ile hesaplanır.

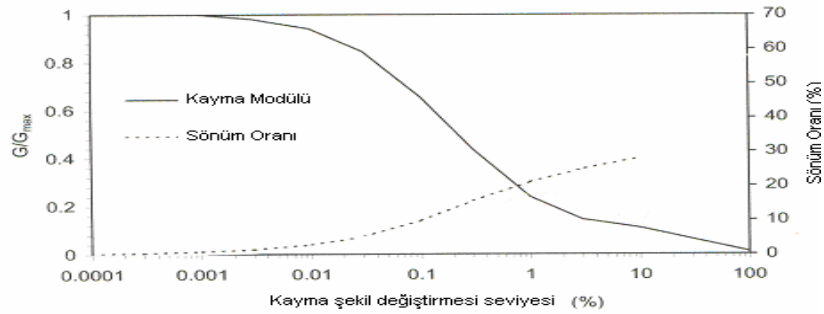
$$W_S = \frac{1}{2} \tau_c \gamma_c = \frac{1}{2} G \gamma_c^2 \quad (3.4)$$

Kritik sönüm oranı ξ , W_D ve W_S cinsinden aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.2 Eşdeğer lineer model (a) Histerisis eğrisi, (b) Sekant kayma modülü ve sönüm oranının şekil değiştirme seviyesi ile değişimi

EERA analizlerinde zemin profili, kayma dalgası hızları, formasyon kalınlıkları ve birim hacim ağırlıkları ile tanımlanır. Daha sonra programa analizlerde kullanılacak anakaya ivme kaydının girilmesi gerekir. Analizde kullanılan bir diğer önemli veri ise kayma modülü oranı (G/G_{max}) ve sönüm oranı ile şekil değiştirme seviyesi arasındaki ilişkilerdir. Şekil 3.3'de tipik G/G_{max} ve sönüm oranı-kayma şekil değiştirme ilişkileri gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Zeminlerde G/G_{max} ve sönüm oranının kayma şekil değiştirme seviyesi ile değişimi

3.2 Sönüm

Sönüm, dinamik yüklenmiş bir malzemedeki ya da mekanik sistemdeki enerji miktarının ısıya dönüşüp azalmasıdır. Bir malzemenin sönümünün büyük olması, bu malzemenin dinamik yükleme ya da titreşimler sırasında daha çok enerji yutması demektir. Zeminlerde sönüm, zemin elemanında bir çevrim sonucu yutulan enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerin sönüm özelliklerini bilmek, zeminlerde dalga yayılımı, deprem yükleri karşısında zemin davranışı gibi dinamik problemlerin çözümü açısından önem taşımaktadır. Sönüm miktarı, dinamik gerilme-şekil değiştirme davranışında oluşan histerisis ilmiğinden hesaplanır. Histerisis ilmiğinin alanı, malzemenin enerjiyi sönümleme kapasitesini gösterir. Zeminlerde ve yapılardaki enerji sürtünme, ısı, plastik akma gibi mekanizmalarla yutulur. Yutulan enerjiyi tanımlamak için kullanılan tanımlardan biri viskoz sönümdür. Viskoz sönüm, visko-elastik bir sistem olarak idealize edilen malzemede, bir titreşim devrinde yutulan enerji miktarıdır. Jacobsen (1930) tarafından önerilen eşdeğer sönüm oranı, ξ ,

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_s} \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir.

W_D , yutulan enerji, W_s maksimum birim kayma enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Lineer olmayan davranış sırasında depolanan enerji, Şekil 3.4'de görüldüğü gibi sekant kayma modülünü tanımlayan doğrunun altında kalan üçgenin alanı olarak elde edilir. Böylece depolanan enerji

$$W_s = \frac{1}{2} \gamma_a f(\gamma_a) \quad (3.6)$$

olarak ifade edilir.

Burada, γ_a birim kayma genliğinde bir çevrimde kaybedilen enerji miktarı,

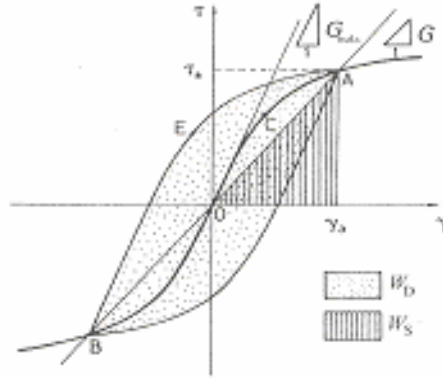
$$W_D = 8 \left[\int_0^{\gamma_a} f(\gamma) d\gamma - W \right] \quad (3.7)$$

olarak hesaplanabilir.

(3.6) ve (3.7) bağıntıları (3.5) bağıntısında yerine konulursa sönüm oranı,

$$\xi = \frac{2}{\pi} \left[\frac{2 \int_0^{\gamma_a} f(\gamma) d\gamma}{\gamma_a f(\gamma)} - 1 \right] \quad (3.8)$$

şeklinde belirlenir.



Şekil 3.4 Histerisis Eğrisi

Sonlu elemanlar yönteminde genel hareket denklemi aşağıdaki gibidir (Haşal, 2003).

$$[M] \left\{ \ddot{u} \right\} + [C] \left\{ \dot{u} \right\} + [K] \{u\} = \{F\} \quad (3.9)$$

(3.9) bağıntısında, $[M]$, kütle matrisi, $[C]$, sönüm matrisi, $[K]$, rijitlik matrisi, $\{F\}$, yük vektörü, $\left\{ \ddot{u} \right\}$, düğüm noktaları ivme vektörü, $\left\{ \dot{u} \right\}$, düğüm noktaları hız vektörü, $\{u\}$, düğüm noktaları yerdeğiştirme vektörüdür.

Sönüm terimi genellikle kütle ve rijitliğin lineer kombinasyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3.10)$$

(3.10) bağıntısında α ve β skaler büyüklüklere ve Rayleigh sönüm katsayıları olarak ifade edilir. Bağıntı (3.10)'deki sönüm terimine sahip bir sistemin n . modu için sönüm oranı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\xi_n = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{\beta}{2} \omega_n \quad (3.11)$$

Burada ω_n açısal frekansı göstermekte, α ve β katsayıları, i. ve j. modlar için belirlenen sönüm oranları ξ_i ve ξ_j kullanılarak (3.12)'de verilen matris çözümlere bulunabilmektedir.

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

Eğer her iki modun da aynı sönüm oranına sahip olduğu düşünülürse α ve β aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \beta = 2\xi \frac{1}{\omega_i + \omega_j} \quad (3.13)$$

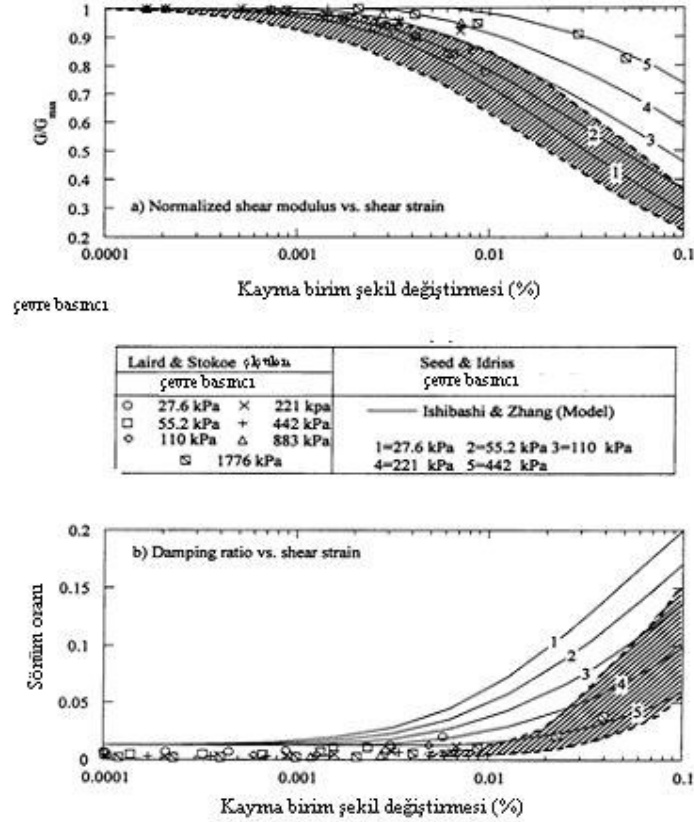
Herhangi bir sistemin dinamik analizinde, daha önceden belirlenen ve sistemin dinamik tepkisine belirgin şekilde katkısı olması istenen modlar için ayrı sönüm oranı seçilmektedir. Böylece daha yüksek doğal frekansa sahip modların sönüm oranı artmakta ve bu modların dinamik analize katkıları çok azalmaktadır.

3.3 DEEPSOIL Programı

Deepsoil programı, hem frekans hem de zaman alanında çözüm yapabilen bir programdır. Frekans alanında hem lineer hem de eşdeğer lineer analizler, zaman alanında ise hem lineer hem de nonlinear çözüm yapabilmektedir.

3.3.1 Tekrarlı Yüklemede Zemin Tepkisi

Zeminin tekrarlı yükler altındaki davranışı non-lineerdir ve yükün şiddeti, tekrarlı yükleme sayısı, ve zeminin cinsi gibi birçok faktörden etkilenir. Non lineer histeretik zemin davranışı genellikle bir eşdeğer sekant kayma modülü ve viskoz sönüm ile karakterize edilir (Seed ve Idriss, 1970; Hardin ve Drnevich, 1972). Çok geniş zemin sınıflandırmaları için sönüm eğrileri, birçok araştırmacı tarafından (Seed ve diğ. 1986; Vucetic ve Dobry, 1991) geliştirilmiştir. Bu eğriler nispeten sığ (< 30 m) çökellerdeki sismik zemin tepkisini tahmin etmek için çok sık kullanılmaktadır. Şekil.3.5' de Laird ve Stokoe (1993)'un verileri, Seed ve Idriss'in kum zemin sınıflandırması ile Ishibashi ve Zhang (1993)'ın kohezyonsuz zemin modelinden elde edilen eğriler gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Kumlu zeminlerde çevre basıncının modül azalımı ve sönüm oranı üzerindeki etkileri

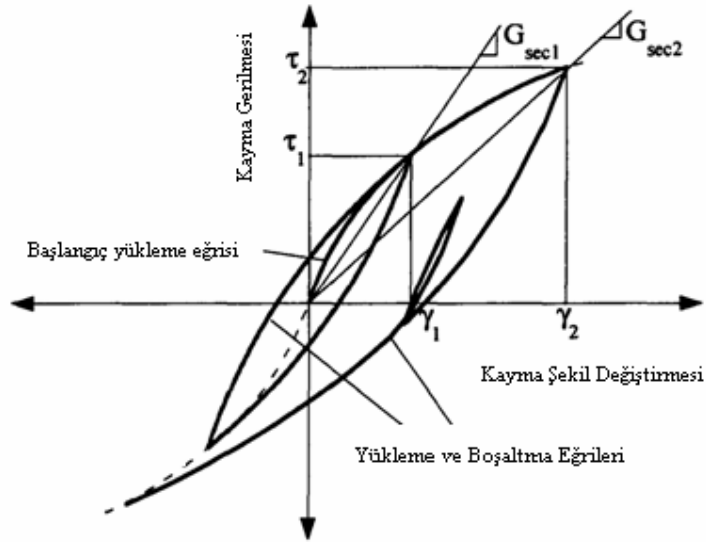
Seed ve Idriss'in (1970) çalışmasında, çevre basınçlarının belirli etkilerini gösteren eğriler mevcut değildir. Laird ve Stokoe (1993)'ün verileri, Seed ve Idriss'in verileri ile karşılaştırıldığında kayma modülünde şekil değiştirme seviyesine bağlı olarak oldukça küçük azalmalar görülmektedir. Orta düzeyde bir basınçta bile (221 kPa), veriler öngörülen sınırları oldukça aşmaktadır. 55 kPa ya da daha büyük çevre basınçlarında, sönüm oranı değişimleri öngörülen sınırların altına düşmektedir. Ishibashi ve Zhang (1993)'in kumlarda modül azaltma eğrileri, Laird ve Stokoe (1993) tarafından ölçülen değerlerle karşılaştırıldığında daha kuvvetli tepkiler alındığı görülmüştür. Benzer şekilde Ishibashi ve Zhang (1993)'in sönüm eğrileri ölçülmüş değerler ile elde edilememektedir. Laird ve Stokoe (1993)'ün verileri, çevre basıncının etkisini hesaba katacak şekilde tasarlanan deneylerden elde edildiği için daha güvenilir olarak kabul edilmektedir. Bu veriler, DEEPSOIL programının yazılımında nonlineer zemin modelini kalibre etmek için kullanılmıştır (Hashash ve Park, 2001).

Kullanılan hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}'\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g \quad (3.14)$$

Burada; $[M]$ = kütle matrisi; $[C]$ = sönüm matrisi; $[K]$ = rijitlik matrisi; $\{u\}$ = düğüm bağıl hız vektörü; $\{\dot{u}'\}$ = düğüm bağıl ivme vektörü; $\{u\}$ = düğüm bağıl yerdeğiştirme vektörü;

\ddot{u}_g = zemin kolonunun tabanındaki ivme ve $\{I\}$ = birim vektördür. Şekil 3.6'da ise boşaltma ve tekrar yükleme davranışı gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Yükleme ve boşaltma davranışını tanımlayan hiperbolik, non lineer zemin modeli

Deepsoil'de geliştirilmiş hiperbolik model kullanılmaktadır. Modifiye edilmiş hiperbolik model (Matasovic 1993), Kondner ve Zelasko (1963)'ün geliştirdiği hiperbolik modele dayanır ve bu modele ek olarak β ve s parametrelerini içerir.

$$\tau = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta\left(\frac{G_{mo}\gamma}{\tau_{mo}}\right)^s} = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \quad (3.15)$$

Burada G_{mo} ; başlangıç kayma modülü, τ_{mo} ; kayma dayanımı, γ ; kayma şekil değişimi'dir. β , s ve γ_r model parametreleridir.

Deepsoil modeli, γ_r ile gerilmeyi ilişkilendirmek için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir (Hashash ve Park 2001).

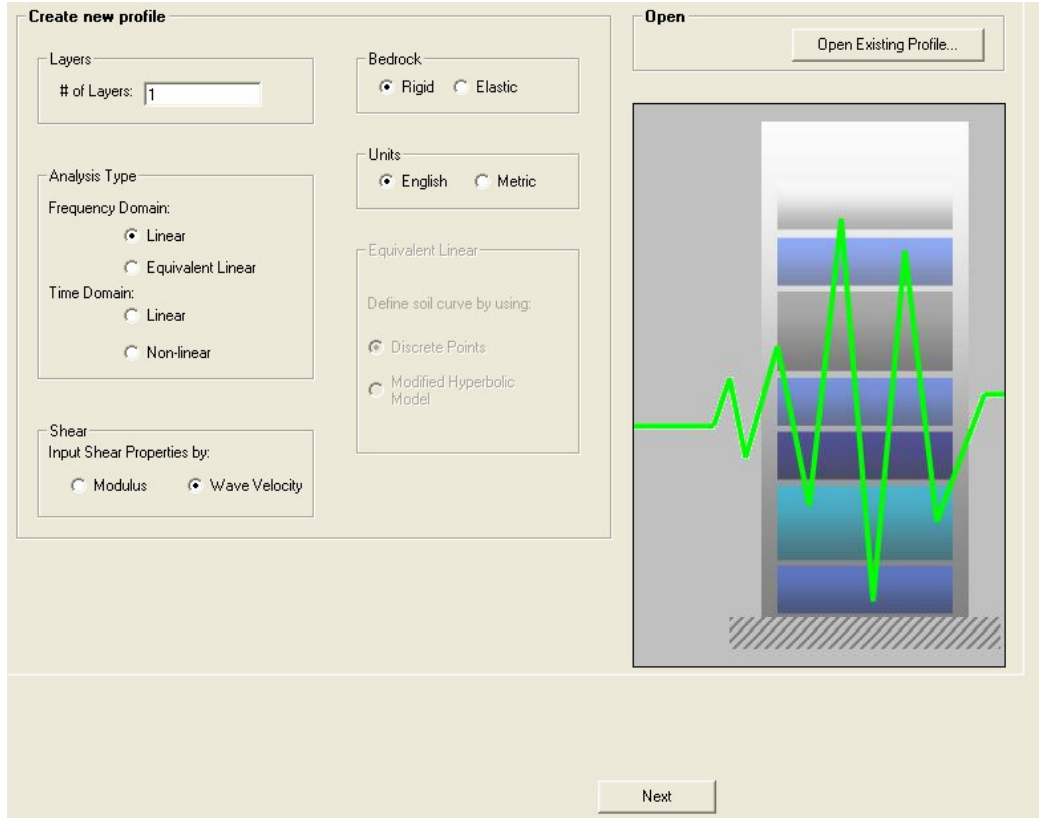
$$\gamma_r = REF \gamma \left(\frac{\sigma'_v}{REF \sigma} \right)^h \quad (3.16)$$

Burada, σ'_v ; efektif düşey gerilmedir.

Nonlinear analizlerde tabaka kalınlığı, maksimum frekansa göre ayarlanır, $h = V_s/4f_{max}$ bağıntısında f_{max} 25-50 Hz arasında kalacak şekilde bir tabaka kalınlığı seçilerek analiz yapılır.

3.3.2 Deepsoil Programını Kullanarak Modelleme Yapmak

Deepsoil programı Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, frekans alanında lineer ve eşdeğer lineer analizler, zaman alanında ise lineer ve nonlinear analizler yapabilen bir programdır. Yapılmak istenen analiz tipi “Analysis Type” bölümünden seçilir, kesitte yer alan tabaka sayısı “Layers” olarak girilir ve “Next” tuşu ile ikinci aşamaya geçilir.



Şekil 3.7 Deepsoil giriş menüsü

Bu aşamada (Şekil 3.8) tabaka kalınlıkları maksimum frekans değeri 25-50 Hz arasında kalacak şekilde ayarlanır. Bir sonraki aşamaya geçmeden bu değerler “Check Max. Freq.” butonuna basılarak Şekil 3.9’da görüldüğü gibi kontrol edilir. Malzeme parametrelerinin girildiği bu kısımda her tabaka için sağ tuşa tıklamak suretiyle Şekil 3.10’da gösterildiği gibi “Save/Calc Curves” menüsüne gelinir.

The screenshot displays the Deepsoil software interface. On the left, a vertical axis labeled "Depth (m)" ranges from 0 to 100. A soil profile is shown with 36 layers, each represented by a different color and labeled "Layer 0" through "Layer 36". The layers are stacked from top to bottom, with Layer 0 at the surface and Layer 36 at the bottom. The total profile depth is indicated as 168 m.

In the center, the "Layer Properties" panel shows the following values for Layer 0:

- Thickness (m): 0
- Unit Weight (kN/m³): 0
- Damping ratio (%): 0
- Shear Vel. (m/sec): 0

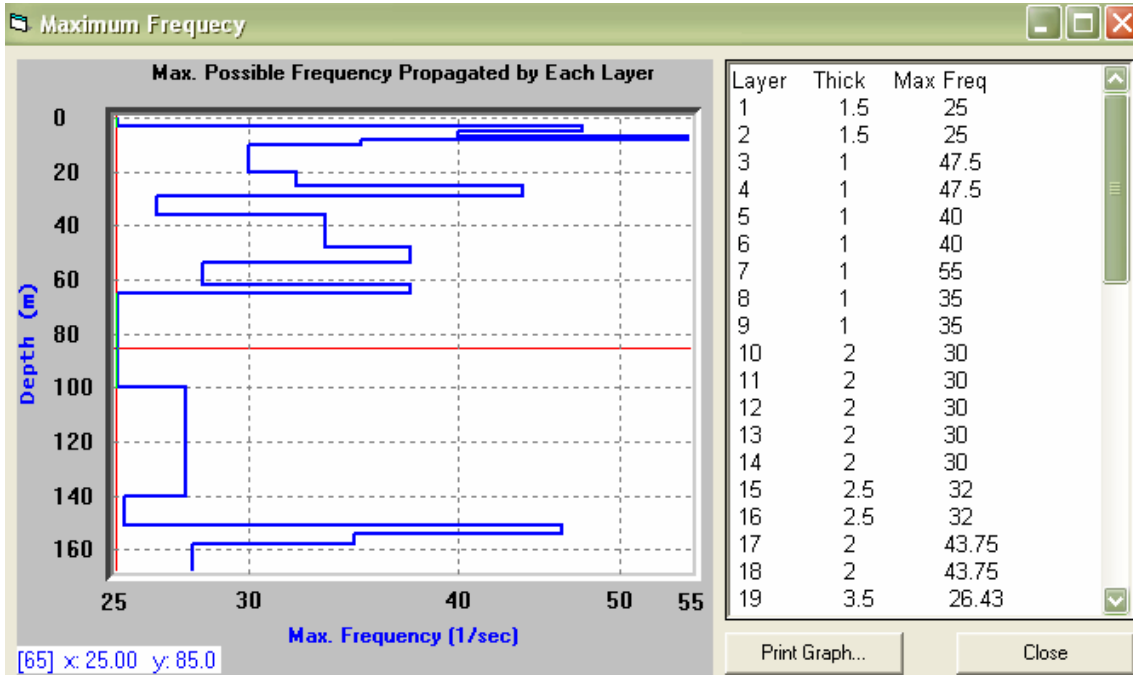
Below this, the "Soil Profile" panel includes buttons for "Add Layer...", "Remove Layer...", and "Set Default Parameters". The "Convert" panel has "UNITS" (Metric to English) and "SHEAR" (Velocity to Modulus) options. The "Soil Profile Display" panel has a "Redraw Profile" button.

On the right, a table lists the properties for all 36 layers:

Layer No.	Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m ³)
1	1-1	1.5	
2	1-2	1.5	
3	2-1	1	
4	2-2	1	
5	3-1	1	
6	3-2	1	
7	4	1	
8	5-1	1	
9	5-2	1	
10	6-1	2	
11	6-2	2	
12	6-3	2	
13	6-4	2	
14	6-5	2	
15	7-1	2.5	
16	7-2	2.5	
17	8-1	2	
18	8-2	2	
19	9-1	3.5	
20	9-2	3.5	
21	10-1	3	
22	10-2	3	
23	10-3	3	
24	10-4	3	
25	10-5	3	
26	10-6	3	
27	11-1	4	
28	11-2	4	

At the bottom, the "Analysis Type" panel has "Total Stress Analysis" selected. The "Water Table Above Layer:" is set to 1. The "Pore Water Pressure Generation Model" panel has "No pore water generation model" selected. The "Half Space" panel has "Edit Properties..." button. The "Spread Sheet Legend" panel has "Below water table", "Layer properties", and "Material properties" options.

Şekil 3.8 Deepsoil’de modellenmenin ikinci adımı



Şekil 3.9 Maksimum frekansların kontrolü

Layer No.	Name	Thickness (m)	Unit Weight [kN/m ³]	Shear Vel. (m/sec)	Damping Ratio	Ref. Strain	Ref. Stress (MPa)	Beta	s	b	d
1	1-1	1.5	18	150	0.5	0.035	0.18	0.68	0.7	0	0
2	1-2	1.5	18	150	0.5	0.035	0.18	0.68	0.7	0	0
3	2-1				0.5	0.035	0.18	0.68	0.7	0	0
4	2-2				0.5	0.035	0.18	0.68	0.7	0	0
5	3-1				0.5	0.035	0.18	0.68	0.7	0	0
6	3-2				0.5	0.035	0.18	0.68	0.7	0	0
7	4				0.5	0.035	0.18	0.68	0.7	0	0
8	5-1				0.5	0.035	0.18	0.68	0.7	0	0
9	5-2				0.5	0.035	0.18	0.68	0.7	0	0
10	6-1				0.2	0.08	0.19	0.45	0.7	0	0
11	6-2				0.2	0.08	0.19	0.45	0.7	0	0
12	6-3	2	19	240	0.2	0.08	0.19	0.45	0.7	0	0
13	6-4	2	19	240	0.2	0.08	0.19	0.45	0.7	0	0
14	6-5	2	19	240	0.2	0.08	0.19	0.45	0.7	0	0
15	7-1	2.5	20	320	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
16	7-2	2.5	20	320	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
17	8-1	2	20	350	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
18	8-2	2	20	350	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
19	9-1	3.5	20	370	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
20	9-2	3.5	20	370	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
21	10-1	3	20	400	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
22	10-2	3	20	400	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
23	10-3	3	20	400	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
24	10-4	3	20	400	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
25	10-5	3	20	450	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
26	10-6	3	20	450	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
27	11-1	4	20	450	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
28	11-2	4	20	450	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0
29	11-3	3	20	450	0.3	0.075	0.18	0.65	0.68	0	0

Analysis Type: Total Stress Analysis Effective Stress Analysis

Water Table Above Layer: No Water Table

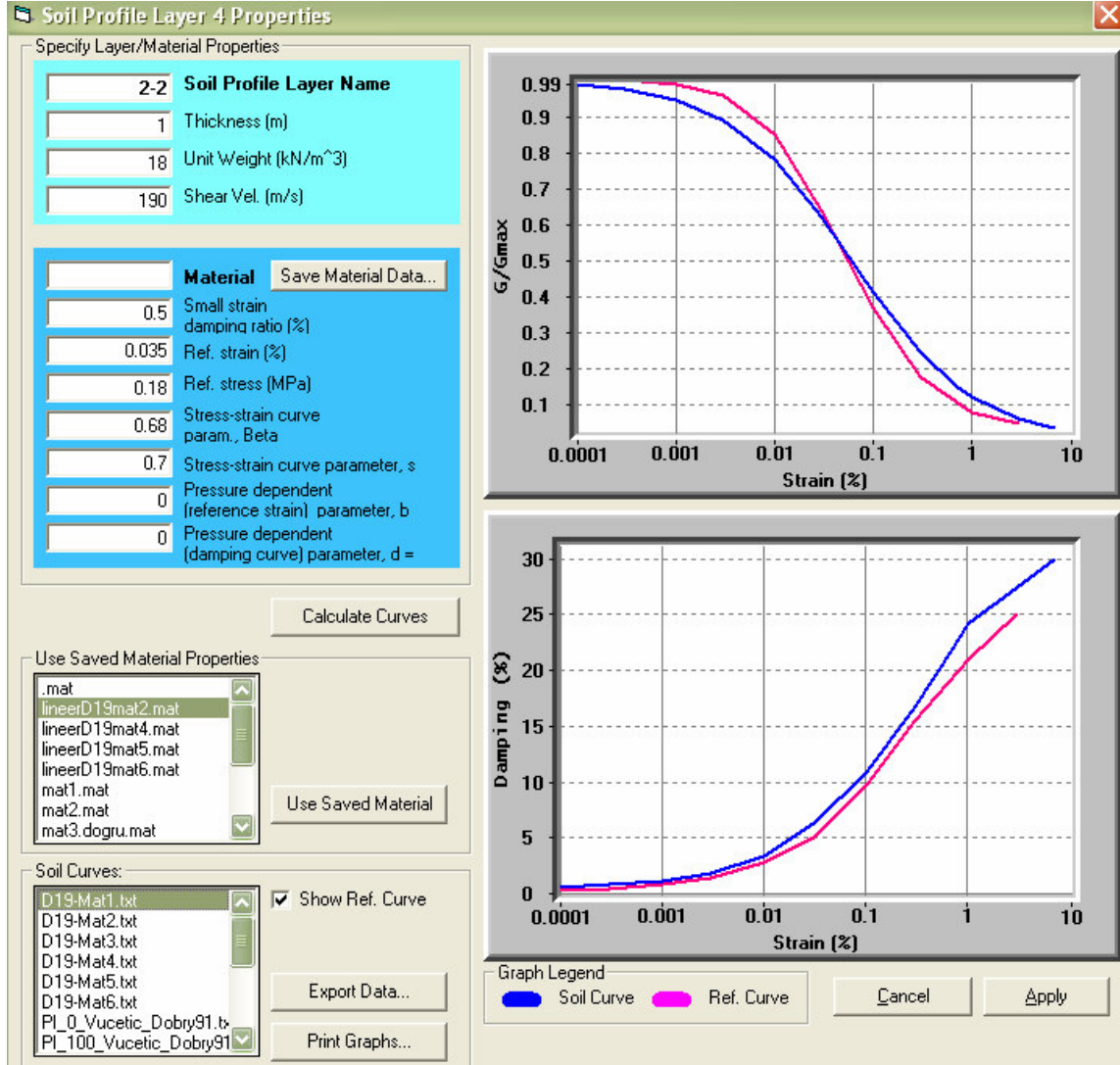
Pore Water Pressure Generation Model: No pore water generation model Pore water generation for sand Pore water generation for clay

Half Space:

Spread Sheet Legend: Below water table Layer properties Material properties

Şekil 3.10 Deepsoil'de modellenmenin üçüncü adımı

Bu aşamada Şekil 3.11’de görüldüğü gibi seçilen tabakaya ait parametreler girilir ve referans eğriler “Soil Curves” kısmından seçilerek karşılaştırılır. İki grafik yaklaşık sonuç verdiğinde “Apply” butonu ile bir önceki menüye dönülür ve her bir tabaka için bu işlem tekrarlanır. Her tabaka için değerler girildiğinde ise “Next” butonu ile diğer aşamaya geçilir.



Şekil 3.11 Deepsoil’de modellemenin dördüncü adımı

Bu aşamada, (Şekil 3.12) analiz şekline göre gerekli seçimler yapılır. Bir sonraki aşama ise Şekil 3.13’den görüldüğü gibi deprem kaydının girildiği ve analiz sonuçlarını yazılı olarak almak istediğimiz tabaka numaralarının seçildiği kısımdır. Girilmek istenen deprem kaydı Deepsoil programının kurulduğu klasörde “Working” dosyasının içinde yer alan “Input Motions” adlı dosyada yer almak zorundadır.

Eğer eşdeğer analiz yapılması isteniyorsa, bu aşamadan sonra analiz yaptırılabilir. Fakat nonlinear analiz için baskın frekans/modların belirlendiği bir aşama daha vardır.

Time Domain

Step Control

Flexible Fixed

Maximum Strain Increment:

Number of sub-increments:

Frequency Domain

Fourier Transform Type

Fast Fourier Transform

Discrete Fourier Transform

Effective Shear Strain:

Iteration Number

Number of iterations:

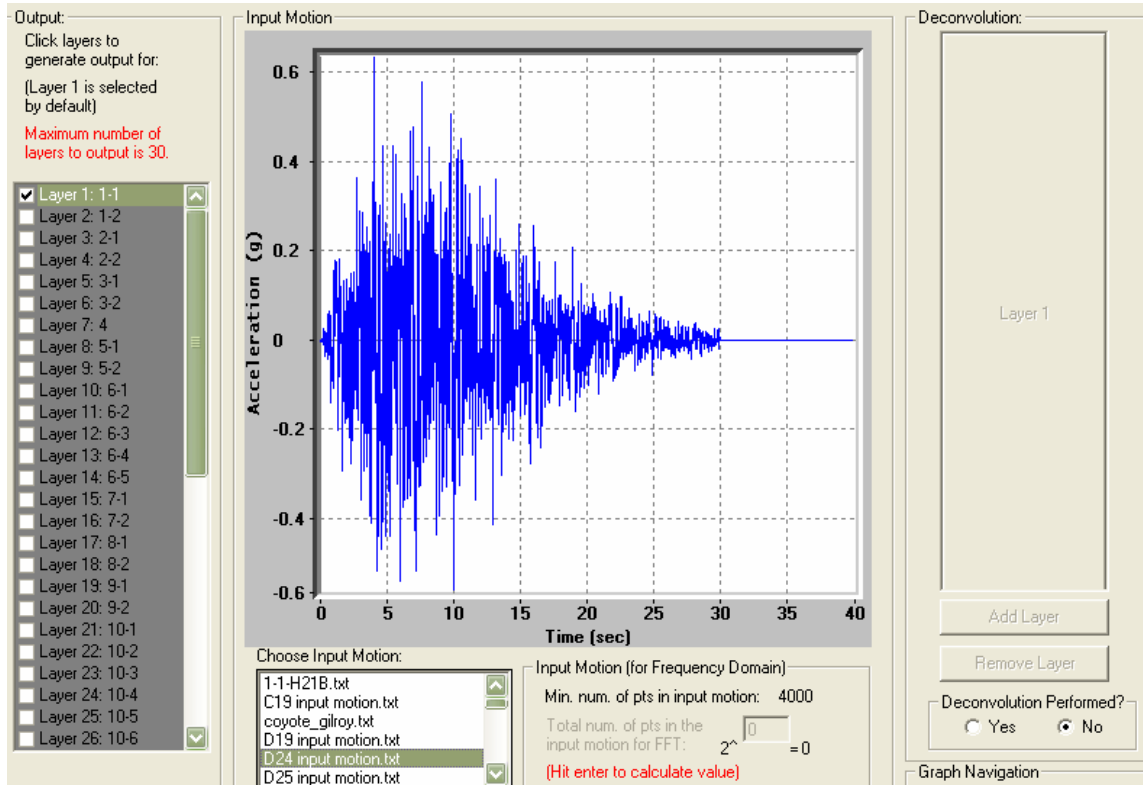
Complex Shear Modulus

Frequency Independent (recommended) $G^* = G(1 + i/2\xi)$

Frequency Dependent (SHAKE, use with caution)
 $G^* = G(1 - 2\xi^2 + i/2\sqrt{1 - \xi^2})$

Simplified (Kramer, 1996) $G^* = G(1 - \xi^2 + i/2\xi)$

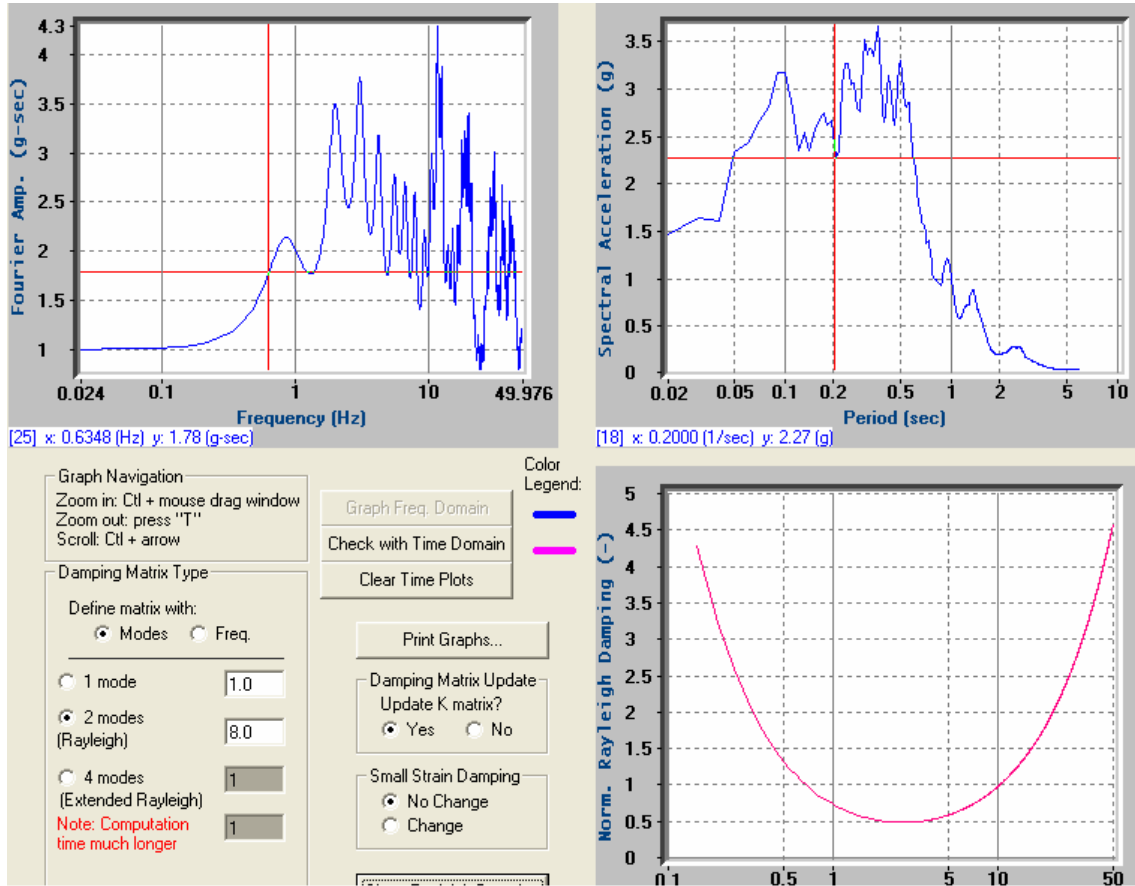
Şekil 3.12 Deepsoil’de modellemenin beşinci adımı



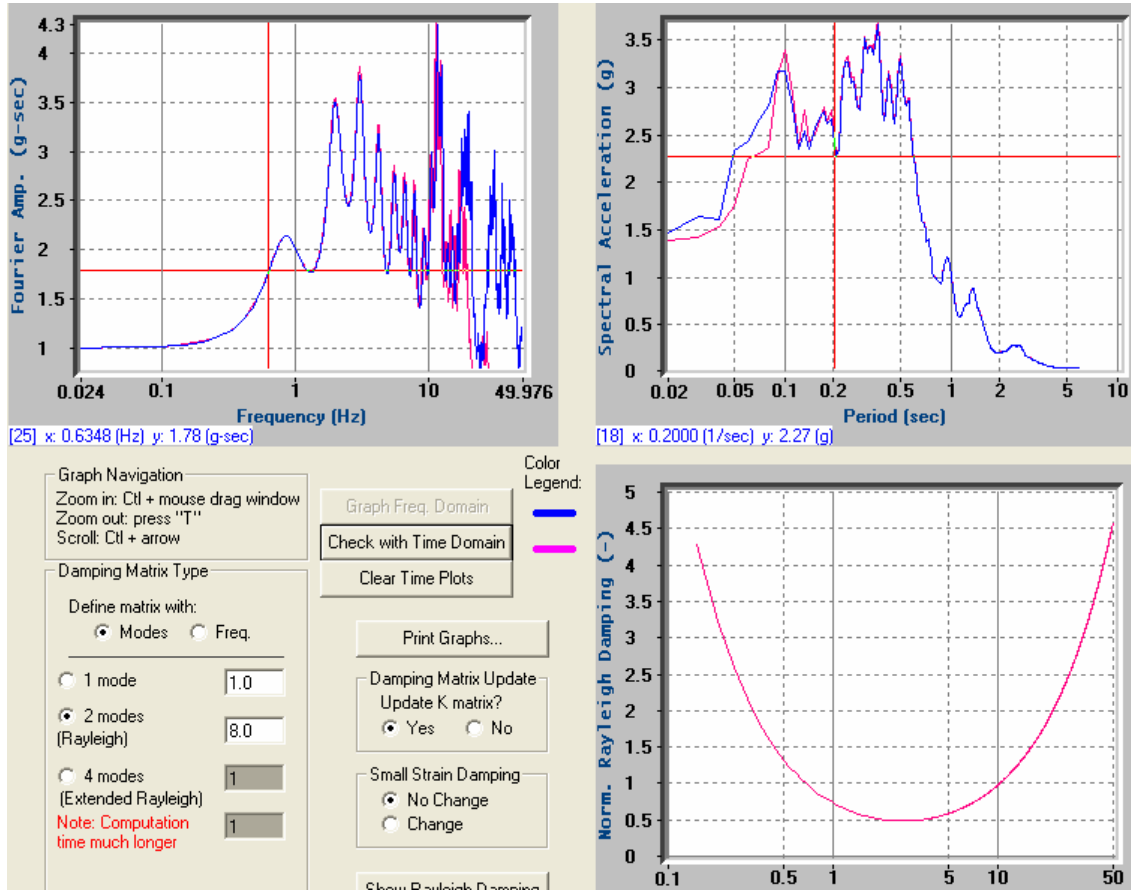
Şekil 3.13 Deepsoil’de modellemenin altıncı adımı

Nonlinear analiz için son aşama olan bu bölümde Şekil 3.14’de görüldüğü üzere frekans alanında çözüm için “Graph Freq. Domain” butonu ile spektral ivme – periyot ve fourier amp. – frekans grafikleri çizdirilir. Zaman alanındaki çözümle karşılaştırmak amacıyla Şekil 3.15’de görüldüğü gibi “Check with Time Domain” butonuna basılır. “Freq. Domain” ve “Time Domain” grafikleri davranış ve değer olarak birbirlerine yakın değil ise 1. ve 2. mod değerleri değiştirilir ve işlem tekrarlanır. Birinci ve ikinci mod değerleri iki grafik arasında uyum sağlandığında elde edilmiş olur ve “Analyze” butonu ile analiz başlatılır. Deepsoil programının manual’inde de belirtildiği üzere 1. ve 2. mod için “Default” olarak verilen 1 ve 8 değerleri analizlerin çoğunda uyumlu grafikleri vermiş olup bu şekilde bulunan 1. ve 2. mod değerleri Eşitlik (3.13)’te yerine konularak Rayleigh α ve Rayleigh β değerleri hesaplanmıştır.

Analiz sonuçları her tabaka için ivme-zaman, gerilme-zaman, şekil değiştirme-zaman, gerilme-şekil değiştirme, genlik-frekans, pik spektral ivme-periyot olmak üzere grafikler halinde elde edilebilir.



Şekil 3.14 Deepsoil'de modellemenin yedinci adımı



Şekil 3.15 Deepsoil’de modellenin sekizinci adımı

3.4 PLAXIS Programı

Sonlu elemanlar yöntemi, birçok mühendislik dalında karşılaşılan matematiksel problemlere yaklaşık sonuçlar bulmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, inşaat mühendisliğinde zemin-yapı etkileşimi, konsolidasyon, gerilme-şekil değiştirme, yükleme, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzeme çeşitliliği olan durumlarda kullanılmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

Plaxis programı zemin özelliklerini belirlemek amacıyla Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil Model (HS), Soft Soil Creep Model (SSC) ve Linear Elastic Model ile son olarak programa eklenen ve bu çalışmada kullanılan ve Küçük Şekil Değiştirme Rijitliğini içeren Pekleşen Zemin Modeli (HSsmall) olmak üzere beş çeşit malzeme modeli ile çalışma imkanı vermektedir.

Bu çalışmada Plaxis ile yapılan iki boyutlu analizlerde Hardening Soil model ve küçük şekil değiştirme rijitliğini içeren pekleşen zemin modeli (HSsmall) kullanılmıştır.

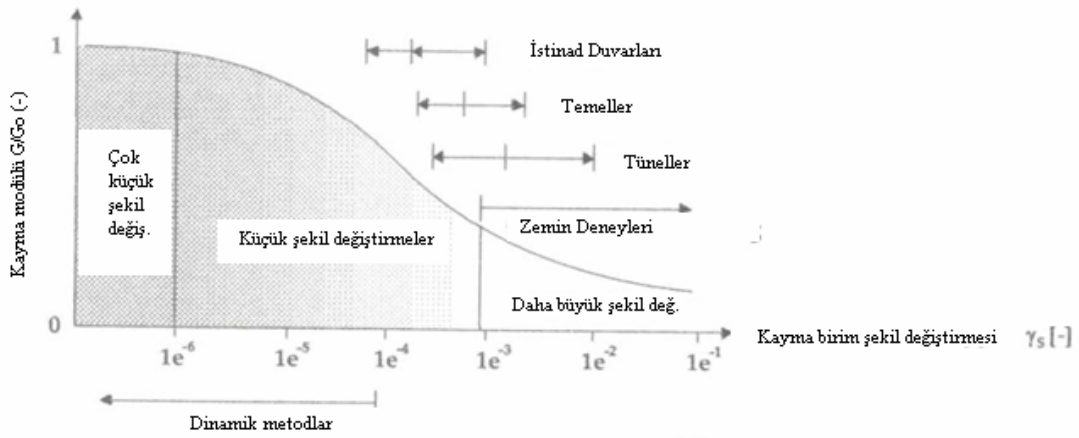
3.4.1 Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model)

Pekleşen zemin modeli iki çeşit pekleşmeyi tanımlar. Bunlardan birincisi deviatorik yükleme sonucu oluşan kalıcı birim şekil değiştirmeyi tanımlayan kayma pekleşmesi, diğeri ise ödometre yüklemesindeki sıkışma sonucu meydana gelen kalıcı plastik birim şekil değiştirmeleri modelleyen sıkışma pekleşmesidir.

Pekleşen zemin modeli hem yumuşak hem de sert zeminlerin davranışını örnekleyebilen gelişmiş bir bünye modelidir (Schanz, 1998). Zemin deviatorik yüklemeye maruz kaldığında azalan bir rijitlik gösterir bununla beraber kalıcı plastik birim şekil değiştirmeler meydana gelir. Drenajlı üç eksenli deneyden elde edilen aksenal birim şekil değiştirme ile deviator gerilme arasındaki ilişki bir hiperbol ile ifade edilmiştir. Bu ilişki ilk kez Kodner (1963) tarafından formüle edilmiş ve daha sonra Duncan ve Chang (1970)'in hiperbolik modelinde kullanılmıştır. Pekleşen zemin modelinde kullanılan başlıca parametreler HSsmall modelinde de ortak olan m , E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} , ν_{ur} ' dur.

3.4.2 Küçük Şekil Değiştirme Rijitliğini İçeren Sertleşen Zemin Modeli (HSsmall)

Pekleşen (hardening) zemin modeli original halinde, yükleme ve boşaltma sırasında elastik malzeme davranışını gözönüne alır. Fakat zeminlerin tamamen elastik kabul edildiği, yani uygulanan birim şekil değiştirmenin tamamen geri dönebildiği, şekil değiştirme aralığı çok küçüktür. Artan şekil değiştirme genliği ile birlikte zeminin rijitliği nonlineer olarak azalır. Şekil 3.16'da bir rijitlik azalım eğrisi örneği verilmiştir. Bu grafik aynı zamanda, laboratuvar deneylerinde uygulanabilecek şekil değiştirme aralıklarını ve geoteknik yapıların yakınlarında ölçülebilecek karakteristik kayma şekil değiştirmelerini de göstermektedir.



Şekil 3.16 Laboratuvar deneyleri ve yapılar için tipik şekil değiştirme aralıklarında zeminin karakteristik rijitlik-şekil değiştirme davranışı

Şekil 3.16'ya göre, geoteknik yapıların analizlerinde kullanılması gereken zemin rijitliği inşaat sonundaki şekil değiştirme aralığına karşılık gelen rijitlik olmamalıdır. Bunun yerine, çok küçük-şekil değiştirmelerdeki zemin rijitliği ve daha büyük şekil değiştirmelerdeki rijitliğin hesaplarda gözönüne alınabilmesi gerekmektedir.

Pekleşen zemin modelinin özelliklerine ek olarak HSsmall modeli lineer ve lineer olmayan davranışın dikkate alınabilmesine olanak sağlar.

PLAXIS'e konulan HSsmall modelinde, Pekleşen Zemin Modeli (HS) baz alınır ve hemen hemen aynı parametreler kullanılır. Bununla birlikte, küçük şekil değiştirmelerde rijitlik davranışını tanımlayabilmek için iki ek parametreye gerek duyulmuştur.

Bunlar:

- Başlangıç veya çok küçük şekil değiştirme kayma modülü G_0 ,
- Sekant kayma modülü G 'nin, G_0 ' ın %70'i değerine düşürüldüğündeki kayma şekil değiştirme seviyesi $\gamma_{0.7}$ değerleridir.

3.4.2.1 Küçük Şekil Değiştirme Rijitliğinin Tanımlanması

Zemin dinamiğinde, küçük şekil değiştirme rijitliği uzun zamandan beri bilinen bir olaydır. Statik analizlerde, zemin dinamiğinin bulguları uzun süre gözönüne alınmamıştır. Statik ve dinamik zemin rijitliği farklılıklarının uygulanan şekil değiştirmenin şiddetinden ziyade, yükleme şekline meydana geldiği düşünülür.

Deney verilerinden gözlenmiştir ki, küçük şekil değiştirmeler için gerilme-şekil değiştirme eğrileri basit bir hiperbolik model kullanılarak tanımlanabilir.

Kondner'in daha büyük şekil değiştirmeler için kullandığı hiperbolik modelin kullanılması Hardin ve Drnevich (1972) tarafından önerilmiştir. Buna göre (G/G_0) ilişkisi aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left| \frac{\gamma}{\gamma_r} \right|} \quad (3.17)$$

Burada γ_r referans kayma şekil değiştirmesi olup (3.18) eşitliği ile belirlenebilir.

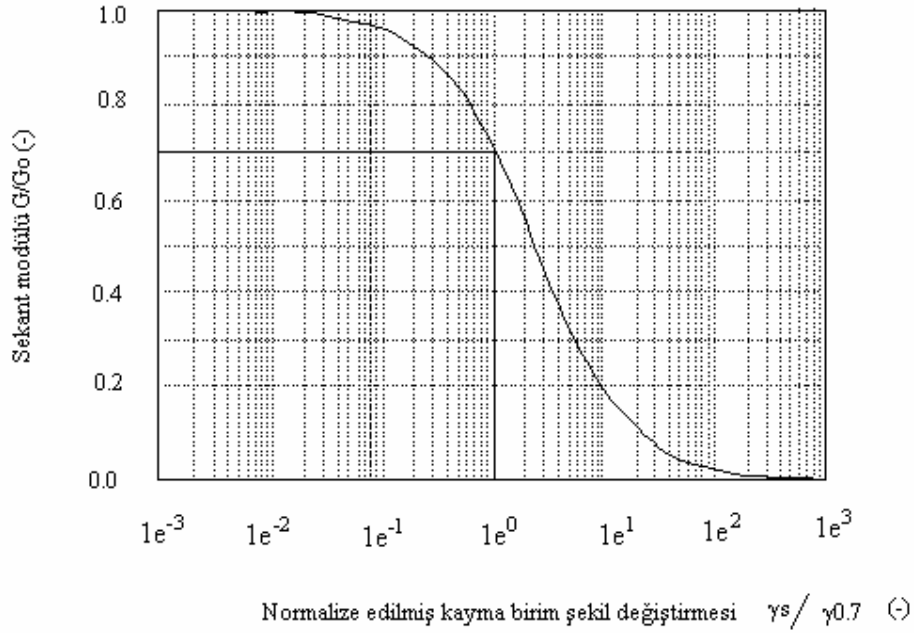
$$\gamma_r = \frac{\tau_{maks}}{G_0} \quad (3.18)$$

Burada,

τ_{maks} göçme anındaki kayma gerilmesidir. Denklem (3.17) ve Denklem (3.18) büyük şekil değiştirmeler ile küçük şekil değiştirme özelliklerini ilişkilendirmekte ve genelde iyi sonuçlar vermektedir. Santos ve Correia, kayma şekil değiştirmesinin referans değeri olarak $\gamma_r = \gamma_{0.7}$ değerinin kullanılabileceğini ve denklemin (3.19) şeklinde yazılabileceğini önermişlerdir.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + a \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right|} \quad a = \frac{3}{7} \quad (3.19)$$

Şekil 3.17, modifiye edilmiş Hardin-Drnevich bağıntısının (Denklem (3.19)) normalize edilmiş deney verileri ile uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.17 Hardin-Drnevich bağıntısı sonuçlarının Santos ve Correia deney verileri ile karşılaştırılması

3.4.2.2 HSsmall Model Parametreleri

HS model ile karşılaştırıldığında HSsmall modeli iki ek rijitlik parametresi daha içermektedir. Bunlar G_0 ve $\gamma_{0.7}$ 'dir. Diğer bütün parametreler HS modelde olduğu gibi aynen kullanılır.

G_0^{ref} , çok küçük örneğin $\varepsilon < 10^{-6}$ gibi şekil değıştirmelerdeki kayma modülüdür. Poisson oranı ν_{ur} Plaxis'te, çok küçük şekil değıştirme Young Modülü kullanılarak G_0^{ref} kayma modülü $G_0^{\text{ref}} = E_0^{\text{ref}} / (2*(1+\nu_{\text{ur}}))$ şeklinde hesaplayabilmek için sabit olarak alınır. HSsmall modelinin rijitlik parametreleri aşağıda listelenmiştir.

m: Rijitliğin gerilme bağımlılığı kuvvet değeri

E_{50}^{ref} = Standart drenajlı 3 eksenli deneydeki sekant modülü (kN/m²)

$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ = Birincil ödometre yüklemesi için tanjant modülü (kN/m²)

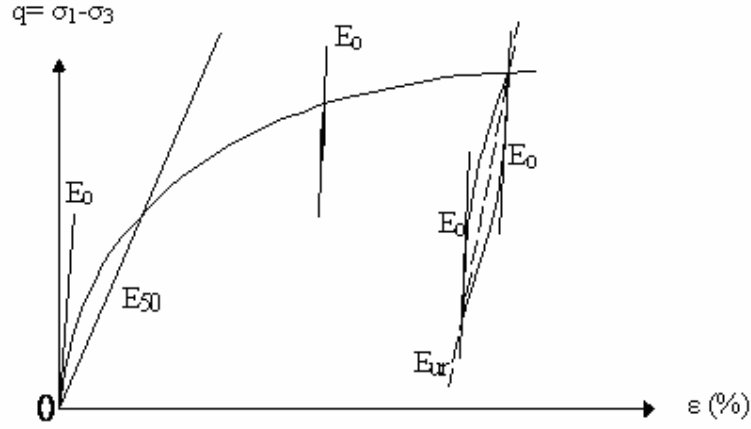
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = \varepsilon \approx 10^{-3}$ ve 10^{-2} arasındaki yüklenme-boşaltma modülü (kN/m²)

ν_{ur} = Yükleme-boşaltma için Poisson oranı

G_0^{ref} = Çok küçük şekil değiştirmelerdeki ($\epsilon < 10^{-6}$) referans kayma modülü (kN/m²)

$\gamma_{0.7} = G_{sekant} = (0.7 * G_0)$ (-)

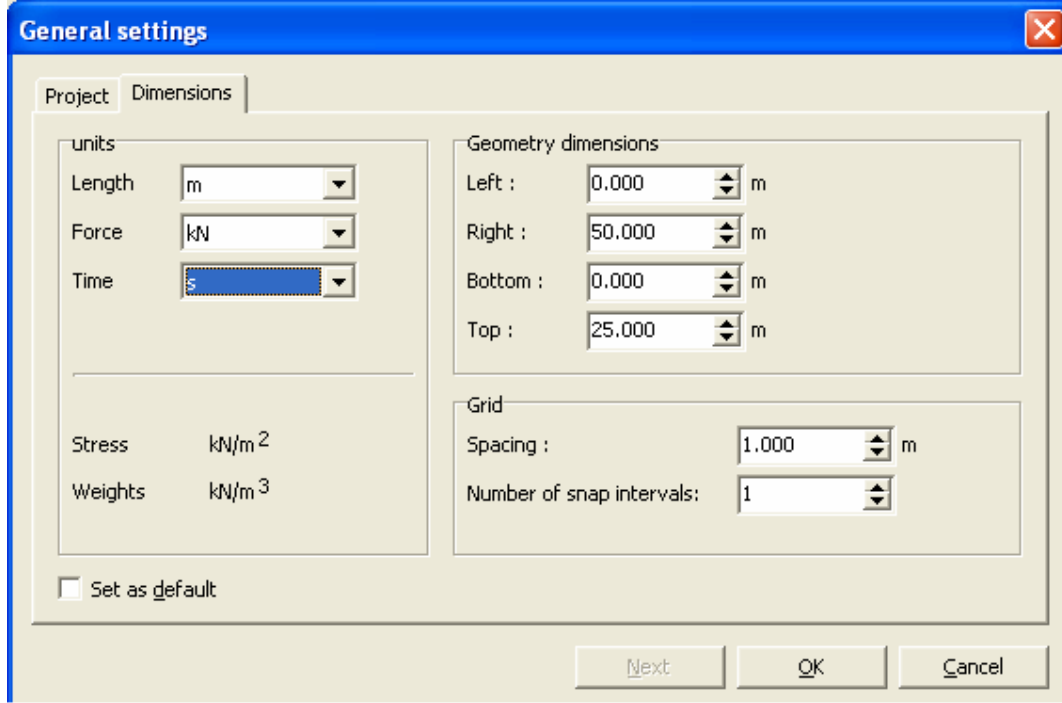
Şekil 3.18 modelin 3 eksenli deneydeki E_{50} , E_{ur} ve $E_0 = 2G_0 * (1 + \nu_{ur})$ parametrelerini göstermektedir.



Şekil 3.18 HSsmall modelin 3 eksenli deneyde rijitlik parametreleri E_{50} , E_{ur} ve $E_0 = 2G_0(1 + \nu_{ur})$

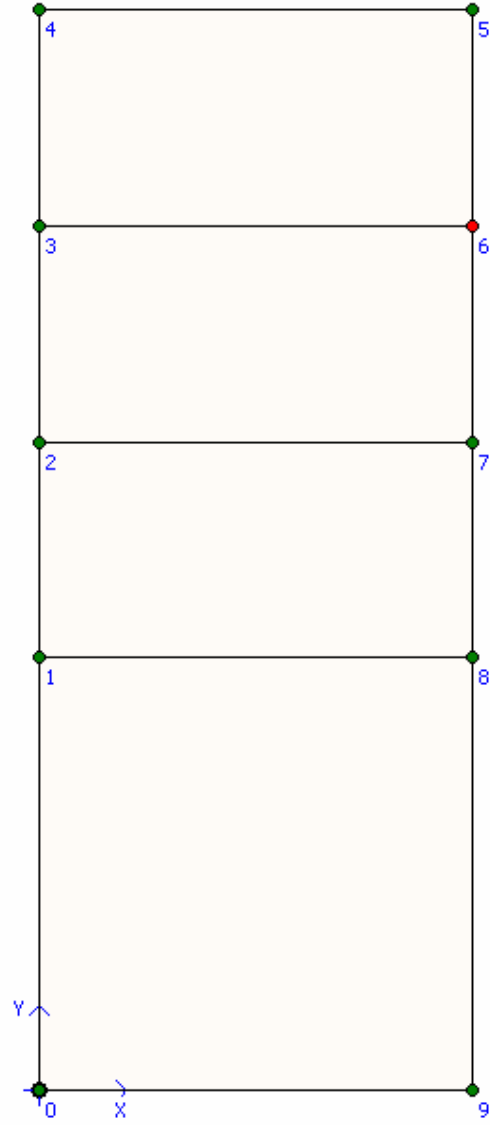
3.4.3 Plaxis Programını Kullanarak Modelleme Yapmak

Plaxis programı çalıştırıldığında gireceğimiz modelin geometrik sınırlarını ayarlayabileceğimiz pencere Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Plaxis'te model geometrik sınırlarının ayarlandığı pencere

İncelenen kesitin yüzey ve derinlik koordinatları kullanılarak ve formasyonların değiştiği kesimler göz önüne alınarak kesit geometrisi oluşturulur. Örnek amacıyla girilmiş bir basit model Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Plaxis'te girilmiş örnek model

Kesitte yer alan formasyonlar ve malzeme parametreleri “Material Sets” butonuna basıldığında açılan pencerede “New” komutu ile her bir formasyon için ayrı ayrı girilir. Şekil 3.21’de Bakırköy Formasyonu için malzeme parametrelerinin programa girilmesi gösterilmiştir. “General” penceresinde Plaxis programı içerisinde yer alan 9 modelden biri olan ve analizlerde kullanılan HS small modeli seçilir ve γ_{unsat} ve γ_{sat} değerleri girilir. Pencerenin sağ altında bulunan “Advanced” butonu ile açılan pencereden ise Şekil 3.22’de görüldüğü gibi Rayleigh α ve Rayleigh β değerleri girilir.

HS small - Bakırköy Formasyonu

General | Parameters | Interfaces

Material set

Identification: Bakırköy Formasyonu

Material model: HS small

Material type: Drained

General properties

γ_{unsat} : 21.000 kN/m³

γ_{sat} : 22.000 kN/m³

Comments

Permeability

k_x : 0.000 m/day

k_y : 0.000 m/day

Advanced...

SoilTest

Next OK Cancel

Şekil 3.21 Plaxis programında malzeme parametrelerinin girilmesi

Advanced General Properties

Void ratio

Dilatancy cut-off

e_{init} : 0.500

e_{min} : 0.000

e_{max} : 999.000

Change of permeability

c_k : 1.000E+15

$\log(k/k_0) = \Delta e/c_k$

Damping

Rayleigh alpha: 0.225

Rayleigh beta: 0.011

OK Cancel

Şekil 3.22 Plaxis programında Rayleigh α ve Rayleigh β değerlerinin girilmesi

“Parameters” penceresi ise her bir formasyon için hesaplanan ortalama kayma dalgası hızları Plaxis programında girildiğinde otomatik olarak hesaplanan rijitlik parametrelerinin girildiği pencere olup Şekil 3.23’de gösterilmiştir.

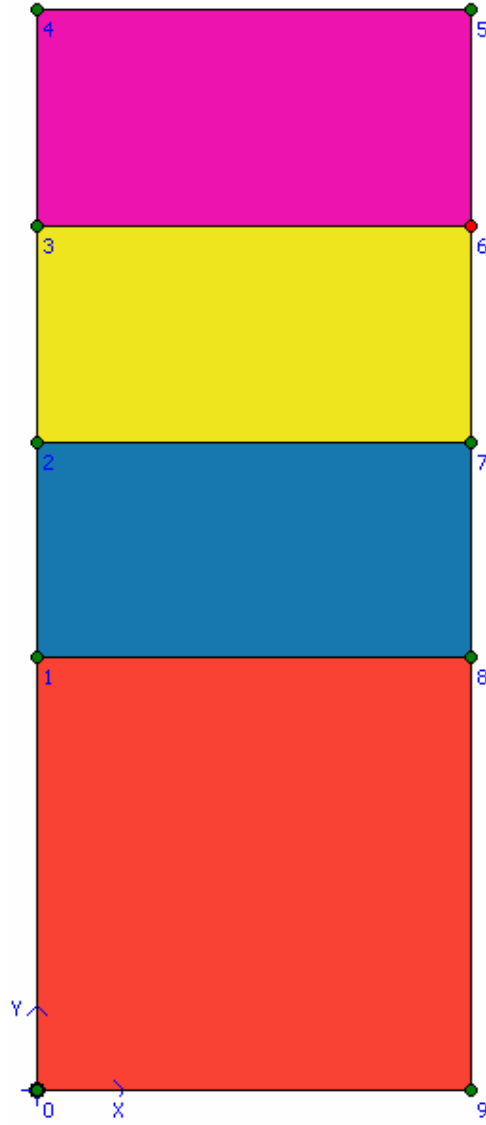
The screenshot shows the 'Parameters' dialog box in Plaxis software. The title bar reads 'HS small - BAKIRKOY'. The dialog is organized into four main sections:

- Stiffness:**
 - E_{50}^{ref} : 9.257E+05 kN/m²
 - E_{oed}^{ref} : 5.047E+05 kN/m²
 - E_{ur}^{ref} : 3.124E+06 kN/m²
 - power (m): 0.500
- Strength:**
 - c_{ref} : 1.000 kN/m²
 - ϕ (phi): 25.000 °
 - ψ (psi): 0.000 °
- Alternatives:**
 - Use alternatives
 - C_c : 0.0007
 - C_s : 6.880E-05
 - e_{init} : 0.5000
- Small strain:**
 - $\gamma_{0.7}$: 0.100
 - G_0^{ref} : 3.429E+06 kN/m²

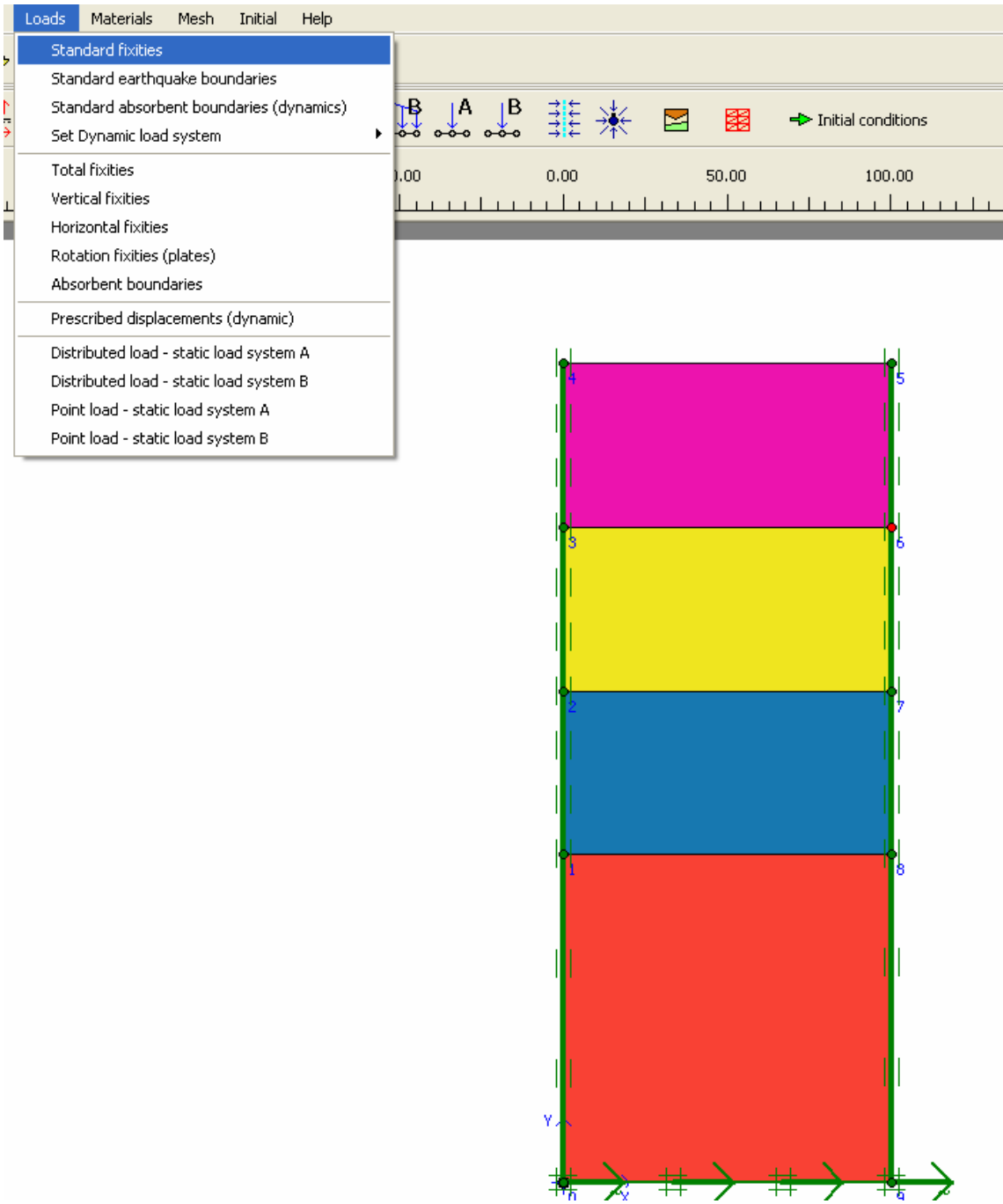
At the bottom of the dialog, there are buttons for 'SoilTest', 'Next', 'OK', and 'Cancel'. An 'Advanced...' button is also present in the bottom right corner of the main dialog area.

Şekil 3.23 Plaxis programında rijitlik parametrelerinin girilmesi

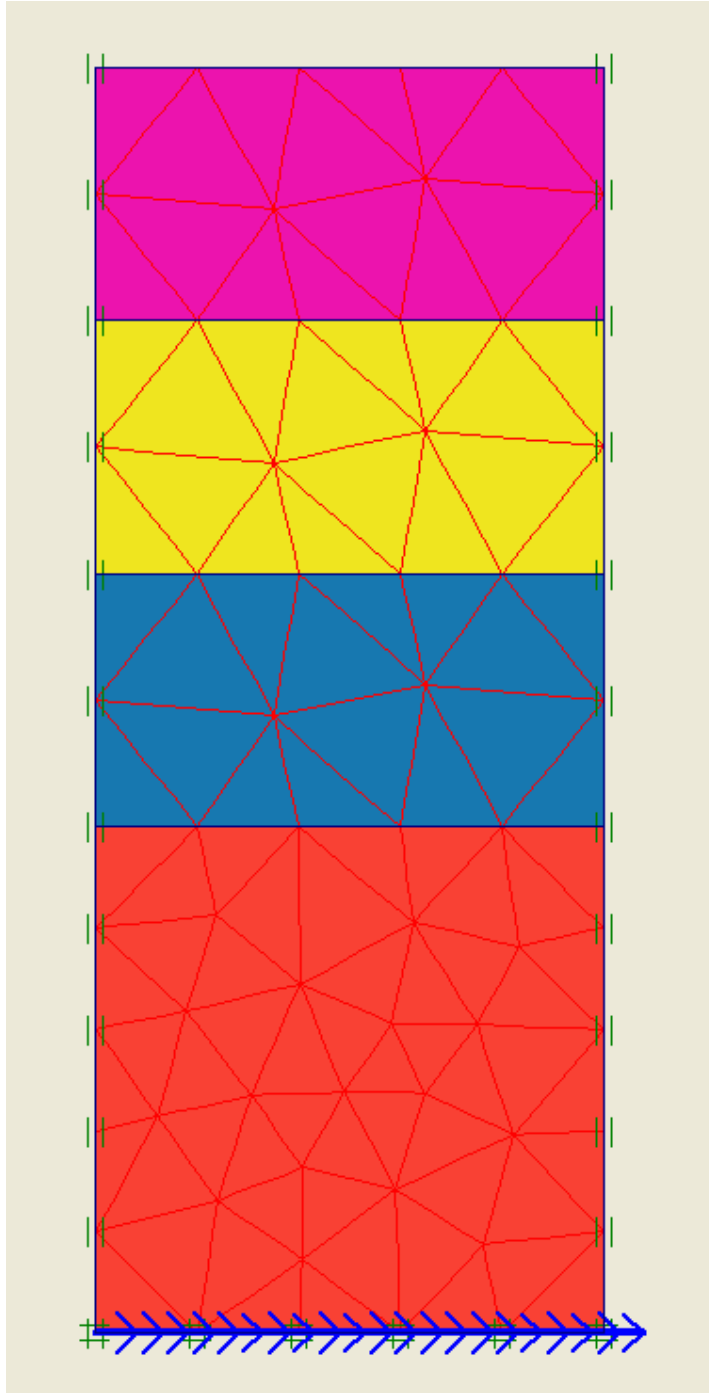
Her bir formasyon için malzeme parametreleri tanımlandıktan sonra formasyonlar oluşturulan geometrik kesitte Şekil 3.24’te görüldüğü gibi yerleştirilir. Son olarak modele “Loads” menüsünün altında yer alan ve Şekil 3.25’te gösterilen “Standard fixities” ve “Standart earthquake boundaries” eklenerek model tamamlanır. Analizden önceki son iki adım ise Şekil 3.26’da gösterilen ve “Generate mesh” komutu kullanılarak elde edilen analiz sonunda okuma alabileceğimiz noktalar ağının oluşturulması ve Şekil 3.27’de gösterilen “Initial conditions” ile başlangıç koşullarının tanımlanmasıdır.



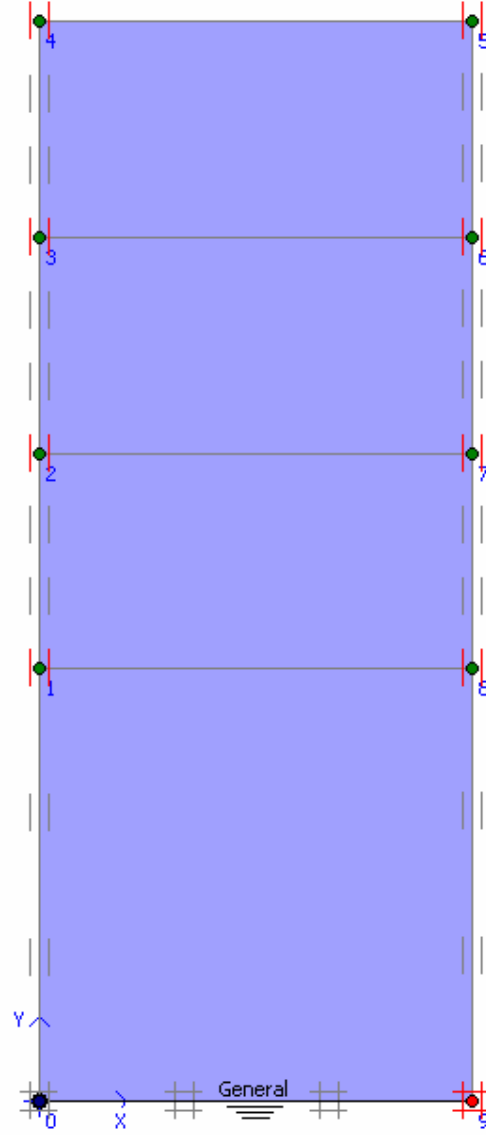
Şekil 3.24 Plaxis programında formasyonların oluşturulması



Şekil 3.25 “Standard fixities” ve “Standart earthquake boundaries”in tanımlanması

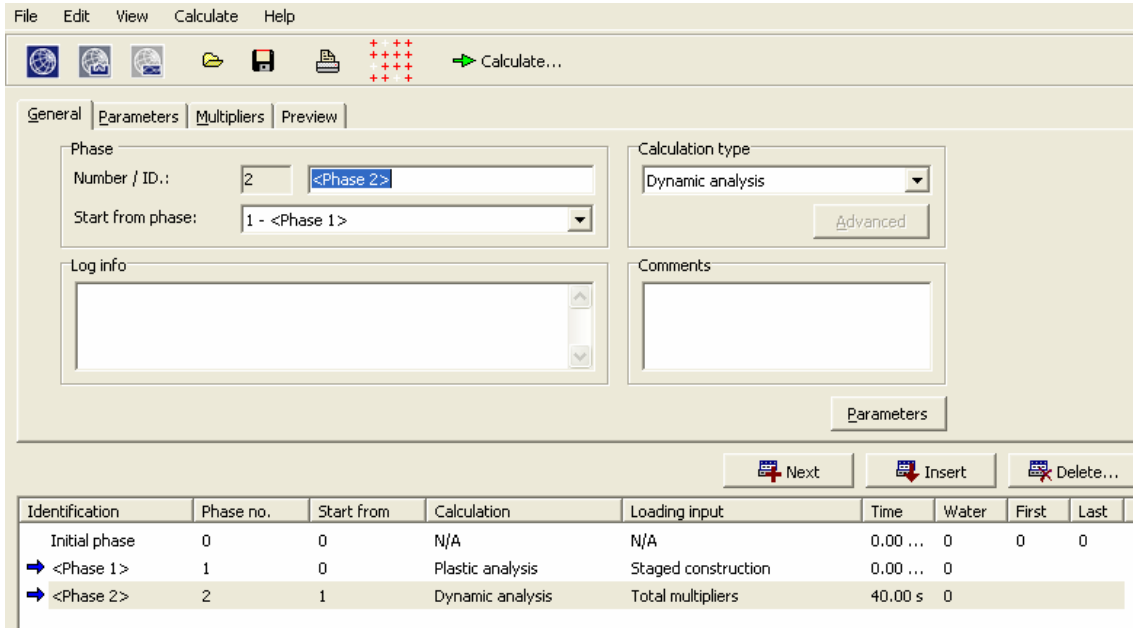


Şekil 3.26 Plaxis programı analiz noktaları ağı

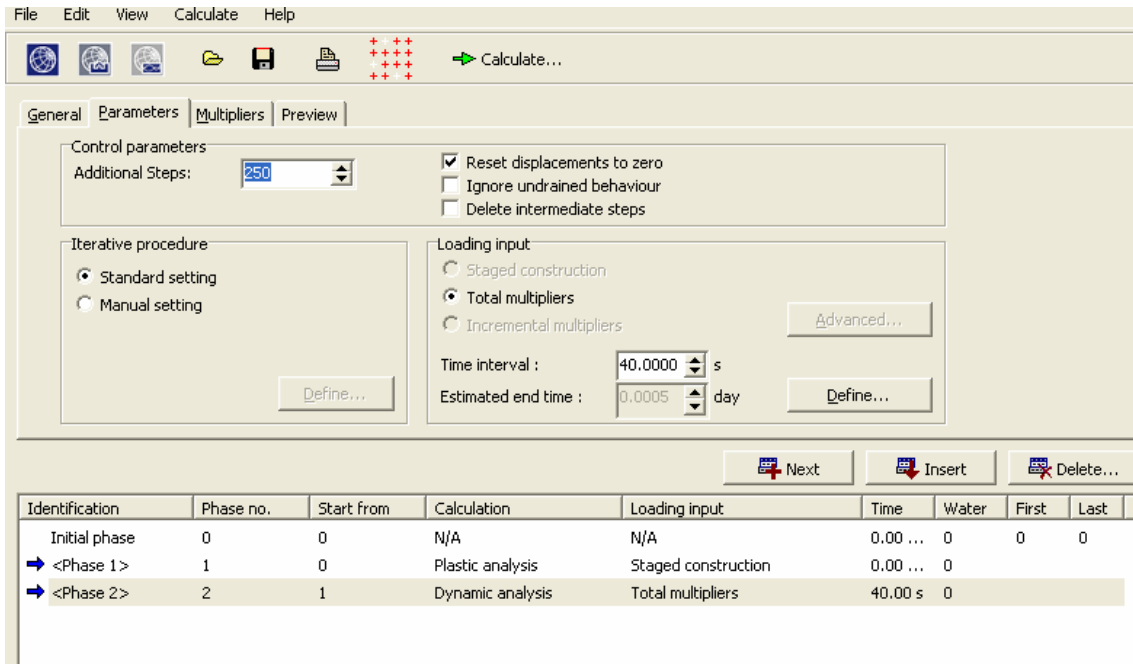


Şekil 3.27 Plaxis programında analiz öncesi son adım olan “başlangıç koşullarının” belirlenmesi

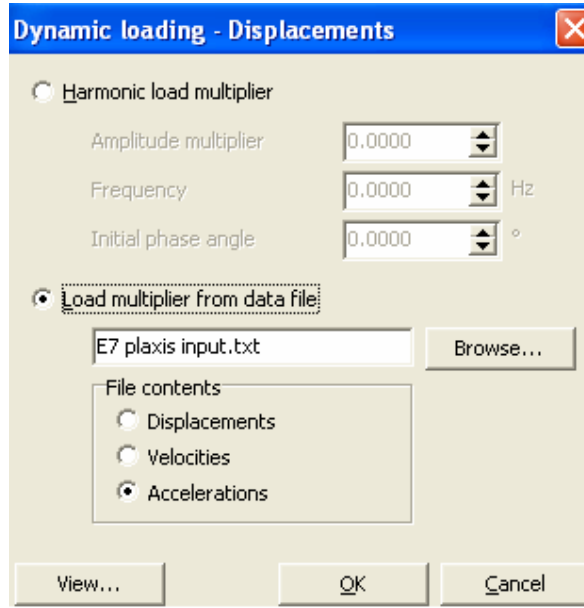
Programın input modu tamamlandıktan sonra “Calculate” butonu ile Calculation moduna geçilir. Şekil 3.28’de gösterilen pencerenin “General” bölümünden yapılmak istenen analiz tipi seçilir. Şekil 3.29’da ise “Loading input” kısmında kullanılacak olan deprem kaydının süresinin girilmesi gösterilmiştir. Analizde kullanılacak deprem kaydı ise aynı menüde yer alan “Define” butonu ile tanımlanır ve programa girilmesi Şekil 3.30’da gösterilmiştir.



Şekil 5.28 Analiz tipinin seçilmesi

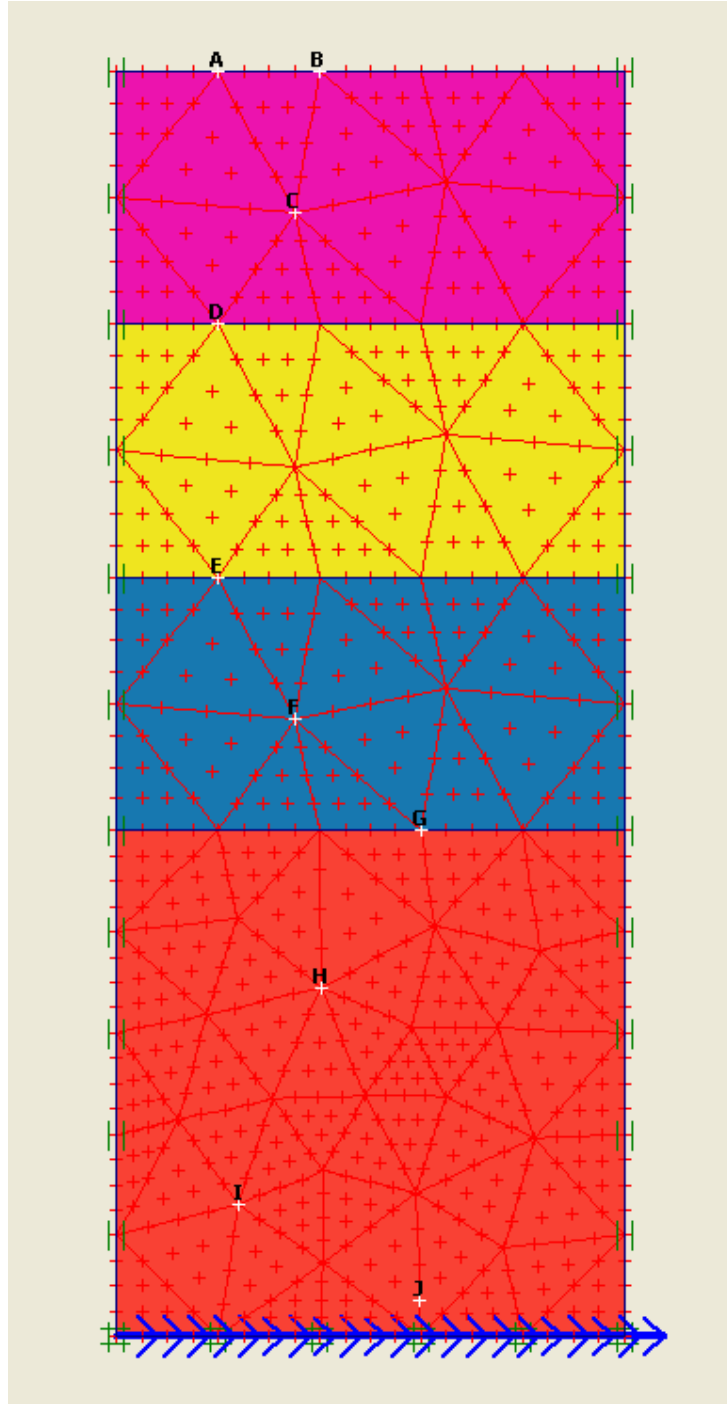


Şekil 3.29 Deprem kaydının süresinin girilmesi



3.30 Deprem kaydının girilmesi

Deprem kaydı da girildikten sonra sıra analiz sonucu okuma alınması istenen noktaların seçimi gelir. Bu işlem yine “Calculations” menüsündeki “Select points for curves” butonu ile gerçekleştirilir (Şekil 3.31). İstenilen noktalar seçildikten sonra “Calculate” butonu ile hesaplama işlemi başlatılır.



Şekil 3.31 Analiz sonucu alınması istenen noktaların seçimi

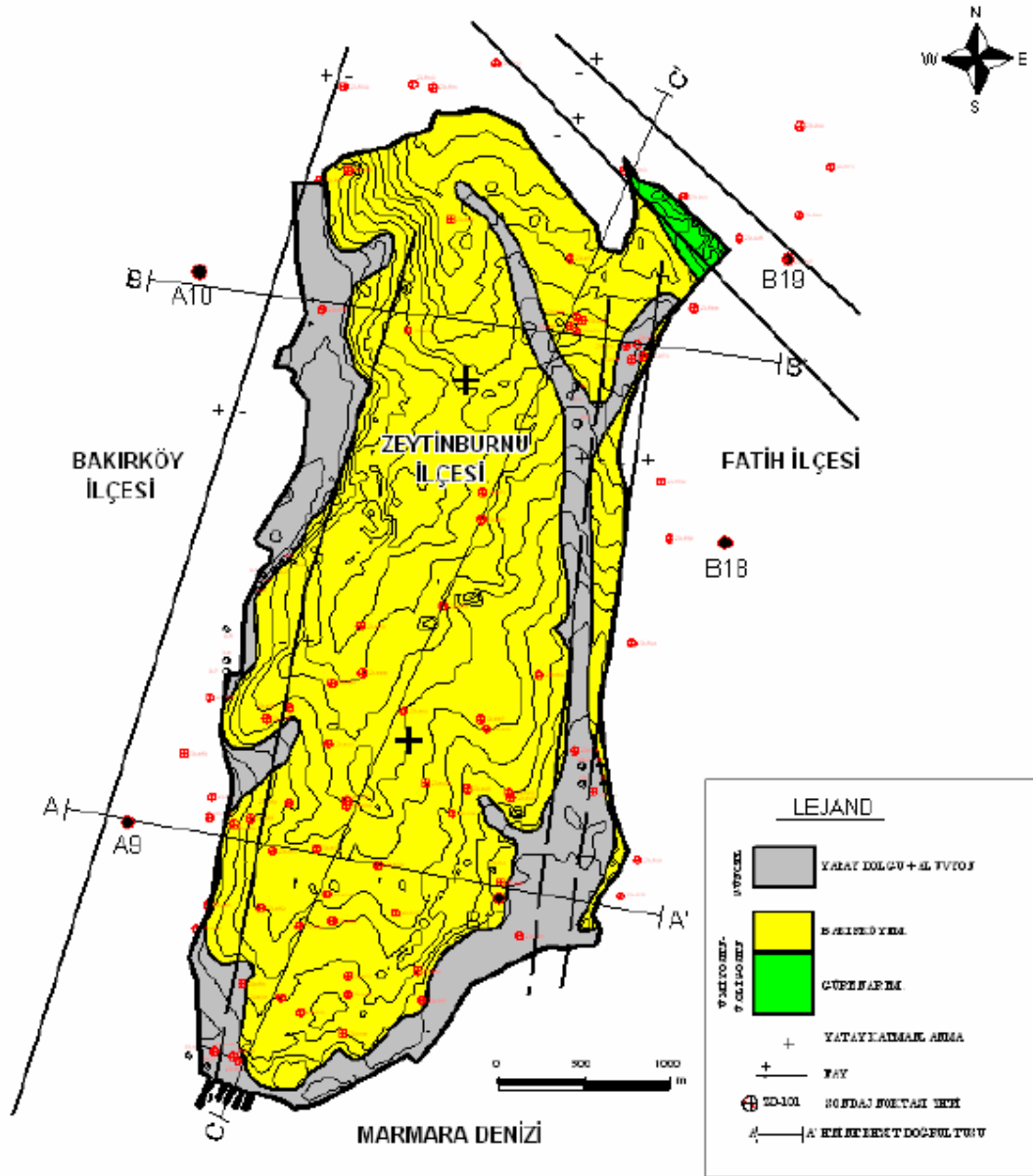
4. İNCELEME ALANININ JEOLJİSİ

Zeytinburnu İlçesinde “İstanbul Deprem Master Planı, Zeytinburnu Pilot Projesi” kapsamında ilçenin sismik mikrobölgelemesi yapılmıştır (Özaydın vd.,2004). Bu proje kapsamında yapılan çalışmalardan yararlanılarak inceleme alanının jeolojisi aşağıda özetlenmiştir.

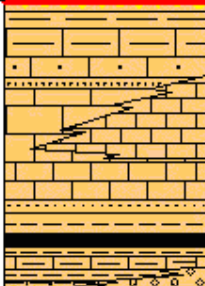

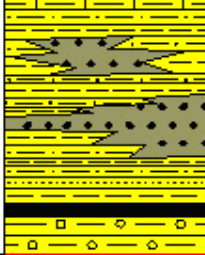

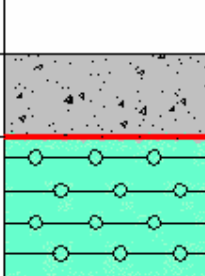
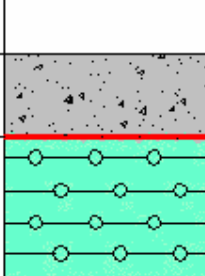
4.1 Genel Jeoloji

Zeytinburnu İlçesi’ni oluşturan inceleme alanı ve çevresinde yapılan jeolojik incelemeler ile, Zeytinburnu Belediyesi, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, DSİ, İSKİ, JICA ve yörede yol-dere-yerleşim güzergahları için yapılmış toplam 107 adet sığ ve derin sondaj detaylı değerlendirilerek yörenin jeolojik yapısı ve zemin profili ortaya çıkarılmıştır. Sondajlardan elde edilen numunelerin incelenmesi, yörede Neojen yaşlı çökellerin yüzeylemekte olduğunu göstermektedir. Bu çökeller, ana kayayı oluşturan Alt Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu grovakları ile Eosen yaşlı Kırklareli Formasyonu kireçtaşları üzerinde, Üst Oligosen döneminde bir transgresyonla taban çakıl-çakıltaşı seviyeleri ile başlayan üste doğru yeşil renkli aşırı konsolide kil, kum ardalanmalarıyla devam edip, en üst seviyelerde ise, Miyosen dönemi sonuna kadar giderek sığlaşarak lagüner ortamda, gri-yeşil renkli kum-organik kil-beyaz/krem renkli marn-Maktra’lı kireçtaşı (Bakırköy Formasyonu) ardalanmasıyla kesikli devam ederek son bulan bir istifdir.

Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi, Zeytinburnu İlçesi’nin hemen hemen tamamında, yukarıda tanımlanan istifin üst seviyelerini oluşturan Üst Miyosen yaşlı Bakırköy formasyonu litolojileri yaygınca yüzeylemektedir. Bakırköy formasyonu litolojileri sadece marn kireçtaşlarında oluşmayıp, kum-kil-marn-kireçtaşı ardalanmasından oluşan bir istifdir. Bu çökellerin daha alt seviyelerini oluşturan ve Gürpınar formasyonu olarak haritalanan yeşil renkli, fissürlü, aşırı konsolide killer ise, ilçenin kuzeydoğu köşesinde faylarla yüzeylemiştir (Özaydın ve diğ., 2004). Şekil 4.2’de ise İstanbul ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesiti verilmiştir.



Şekil 4.1 İnceleme alanının mühendislik jeolojisi haritası (Özaydın vd.,2004)

ÜST SİSTEM		KUVVA- TANER HÖLÖSEN	SİSTEM		LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR			
SEKİ	FORMASYON		SEKİ	FORMASYON					
PALEZOYİK	KARBONİFER	O.E.O.S.E.N.-A.O.Lİ.G.O.S.E.N	KIRKLARFELİ	> 250		MARN - KİREÇTAŞI : Beyaz - sarımsı bej - gri renkli, orta-kalm katmanlı, karbonath kil arakatmanlı, fosilli KARBONATLI KUMTAŞI : Krem renkli, ince taneli, sert, som yapı RESİFAL KİREÇTAŞI : Beyaz - bej renkli, sert, som yapı, karstik, bol fosilli ÇAKILTAŞI - MARN : Gri-sarımsı bej renkli, bol grovak çakıllı, kum - silt - kil ve kömür arakatmanlı Uyumsuzluk			
						TRAKYA	> 1000		KUMTAŞI (Grovaç) - SİLT TAŞI - KİLT TAŞI: Mavimsi gri - kahverengi, kireçtaşı mercekli (Ölçe ksiz)
S E N O Z O Y İ K	T E R S İ Y E R	Ü . O L İ G O S E N - Ü . M İ Y O S E N	GÜRÜPİNAR	> 200		ÇAKILTAŞI : Gri-sarımsı kahverengi, kumlu, killi, kireçtaşı çakıllı, kömür arakatmanlı Uyumsuzluk			
						GÜRÜPİNAR	> 200		KİL / KİL TAŞI - KUM ARDALANMASI : Kil : Gri-sarımsı yeşil, aşırı konsolide, tuf seviyeli, fissürlü yer yer karbonath / kireçtaşı banth, kömür katkılı Kiltası : Gri - yeşil, ince - orta katmanlı Kum : Açık gri - sarımsı krem renkli, kuvars-kireçtaşı çakıl ve bloklu
									GÜRÜPİNAR
						GÜRÜPİNAR	> 200		
									GÜRÜPİNAR
GÜRÜPİNAR	> 200		ÇAKIL, KUM, SİLT, KİL (ALÜVYON) Uyumsuzluk						

Şekil 4.2 İstanbul ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesiti (Yıldırım, 2003)

Zeytinburnu İlçesi'nin kuzeyinde kalınlığı 40m-60m arasında değişen Gürpınar formasyonu, güney-güneybatı yönünde gittikçe kalınlaşarak sahil şeridinde yakın kesimlerde 200m kalınlığa ulaşmaktadır. Kuzey alanlarda Trakya formasyonu üzerinde diskordan oturan Gürpınar formasyonu, A-A' kesiti doğrultusuna paralel ve yaklaşık 350m kuzeyinde doğu-batı doğrultuda uzanan bir hattan itibaren güneye doğru kalınlığı gittikçe artan Orta Eosen-Alt Oligosen yaşlı Kırklareli formasyonu kireçtaşları üzerine diskordan oturmaktadır.

Jeoloji haritası ve zemin kesitlerinde de görüldüğü gibi, Zeytinburnu İlçesi'nin kuzeyinde NW-SE doğrultulu faylar ile, batı ve doğu sınırlarına paralel uzanan NNE-SSW doğrultulu ve yaklaşık 20m ile 120m arasında düşey atımı olan faylar, ilçenin morfolojik şekillenmesine de etken olmuş ve faylar arasındaki çöküntü alanlarında kuru ve sulu dere yataklarını oluşturarak güncel alüvyal çökellerin oluşmasına neden olmuştur (Özaydın vd., 2004).

4.2 İnceleme Alanındaki Formasyonların Geoteknik Özellikleri

İncelenen bölgede, birbirinden farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip formasyonlar görülmektedir. Bu formasyonlar Bakırköy Formasyonu, Gürpınar Formasyonu, Kırklareli Formasyonu, Trakya Formasyonu ve Yapay Dolgu-Alüvyon olarak adlandırılmakta ve inceleme alanında çeşitli bölge ve derinliklerde gözlenmektedir. Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'te bu formasyonlar için elde edilen malzeme parametreleri verilmiştir (Kılıç vd., 2006).

Çizelge 4.1 SPT-N darbe sayıları (Kılıç vd., 2006)

Zemin	SPT-N darbe sayıları
Dolgu	5-10
Alüvyon	5-25
Bakırköy Formasyonu	1.5-7.0m 10-30, derinde >30
Gürpınar Formasyonu	4-20 m arası 12-30, 20-40 m arası 30-50, 40 m'den sonra 50-Refü

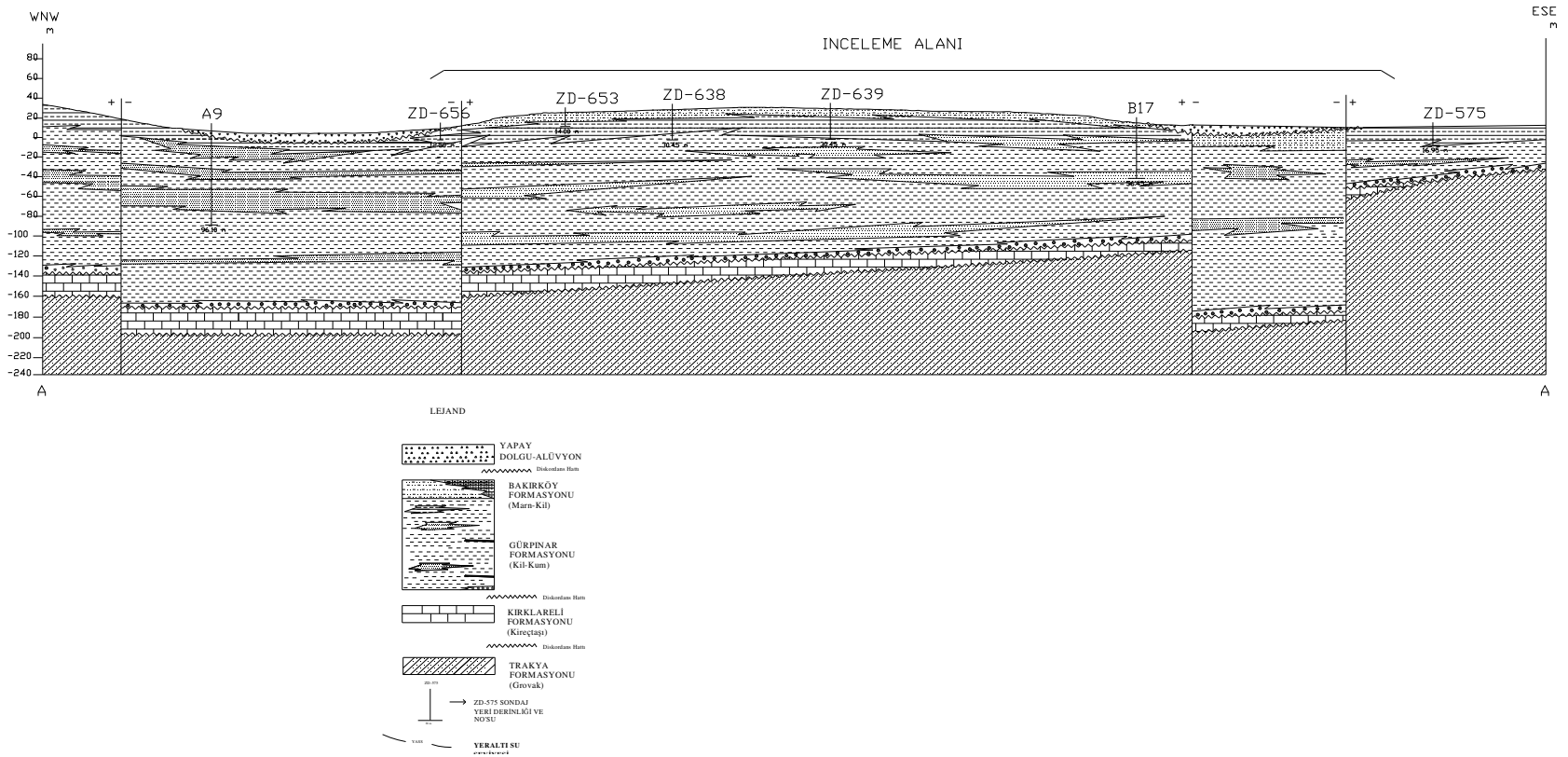
Çizelge 4.2 Formasyonlar için doğal su muhtevası, kıvam limit değerleri ve birim hacim ağırlıkları (Kılıç vd., 2006)

Zemin	w_n (%)	w_L (%)	w_P (%)	γ_n (kN/m ³)
Dolgu	24-32	38-52	14-22	17-18
Alüvyon	15-40	38-70	13-34	17-18
Bakırköy Formasyonu (killi seviyeler)	15-48	24-77	14-35	18-19
Bakırköy Formasyonu (marn)	21-47	35-86	17-26	21-26
Gürpınar Formasyonu (kil)	18-55	38-99	23-48	19-21
Kırklareli Formasyonu (kireçtaşı)	-	-	-	22-26

Çizelge 4.3 Dane çapı dağılımı (Kılıç vd., 2006)

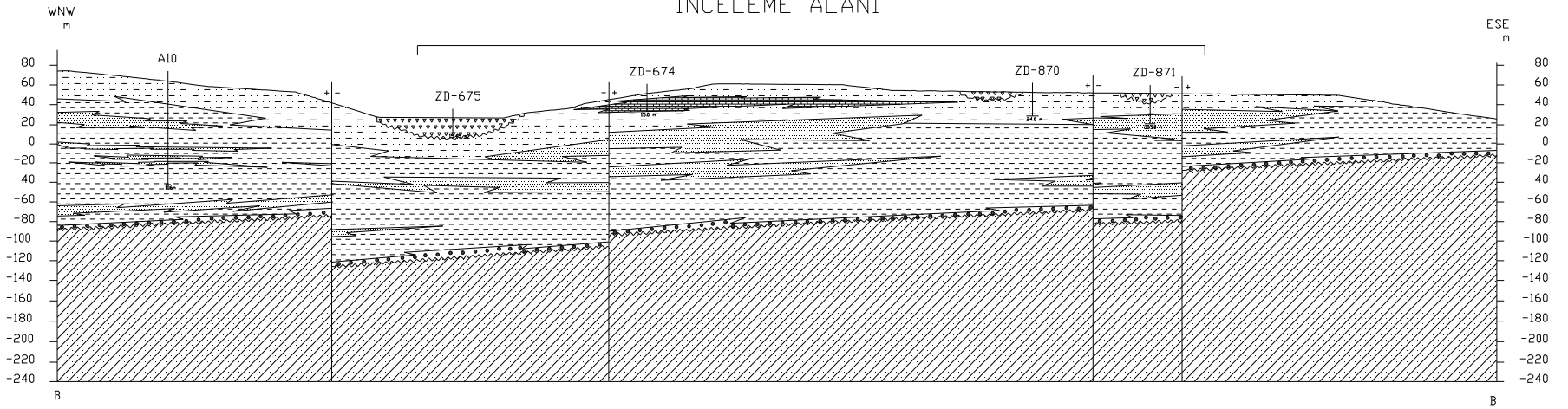
Zemin	Çakıl (%)	Kum (%)	Silt-Kil (%)
Dolgu	0-43	28-34	7-23
Alüvyon	0-2	35-75	14-64
Bakırköy Formasyonu (killi seviyeler)	0-2	6-75	14-60
Gürpınar Formasyonu (kumlu seviyeler)	0-14	47-83	16-48
Gürpınar Formasyonu (çakıllı seviyeler)	14-39	40-66	15-20

Bu çalışmada, Şekil 4.1'de görüldüğü üzere Batı-Doğu doğrultusunda iki adet ($A - A'$ ve $B - B'$) enkesit ve Güneydoğu-Kuzeybatı doğrultusunda bir adet ($C - C'$) enkesit üzerinde bir ve iki boyutlu analizler yapılmıştır. Sırasıyla, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de bu kesitler gösterilmiştir.

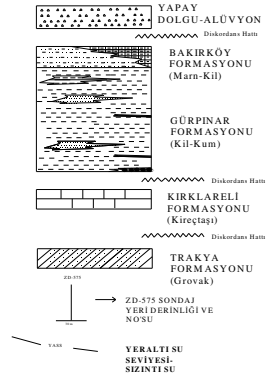


Şekil 4.3 A-A' Kesiti

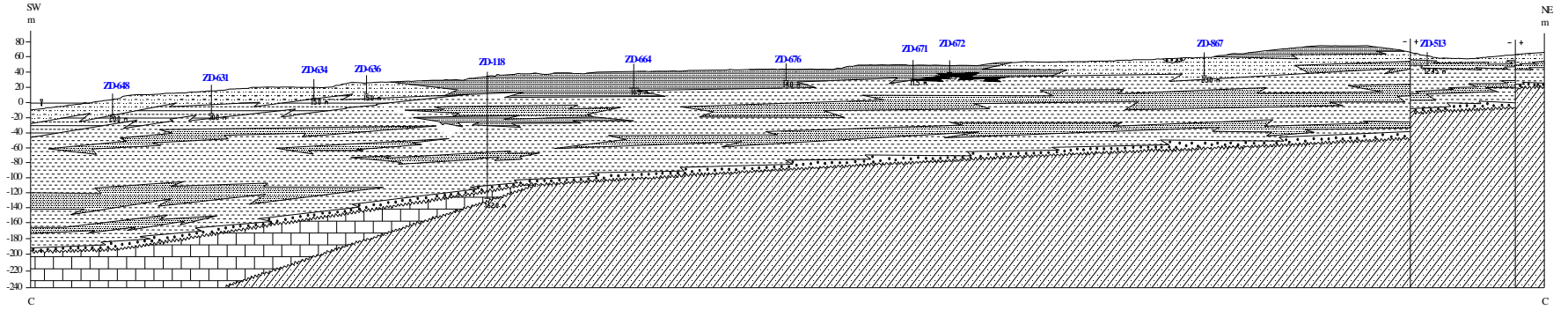
İNCELEME ALANI



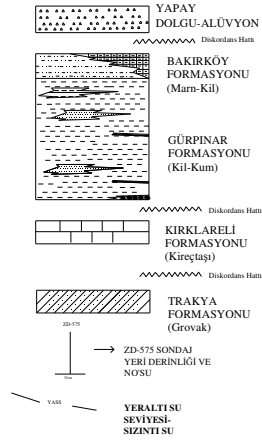
LEJAND



Şekil 4.4 B-B' Kesiti



LEJAND



Şekil 4.5 C-C' Kesiti

5. ANALİZLERDE KULLANILAN MALZEME PARAMETRELERİ

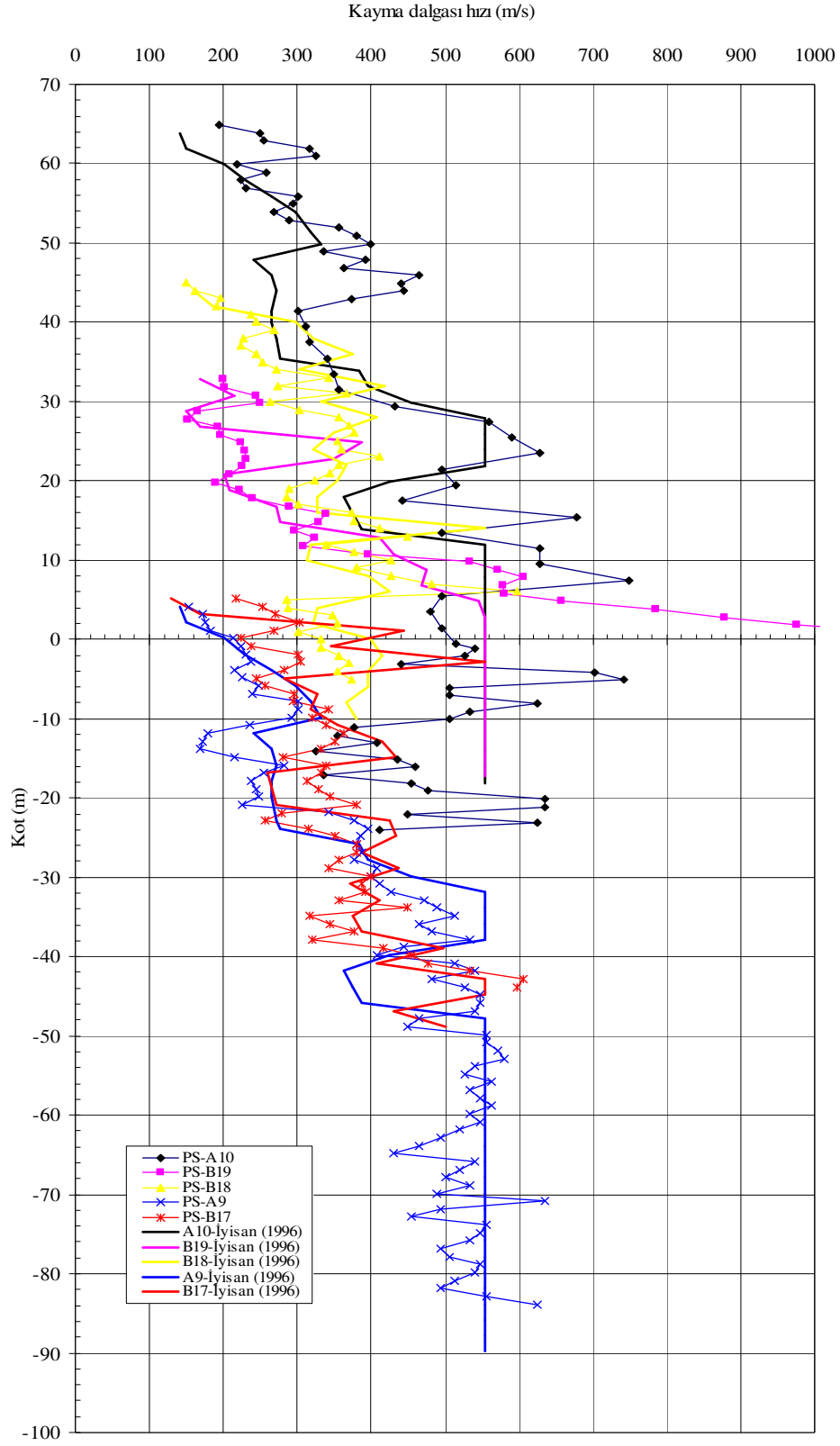
Zeytinburnu İlçesi sismik mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında yapılan çalışmalardan belirlenen malzeme parametreleri (Özaydın vd., 2004) aşağıda sunulmuştur.

5.1 Kayma Dalgası Hız Profilleri

Kayma dalgası hız profillerinin oluşturulmasında bölgede yapılan kayma dalgası hız ölçümlerinin yanında SPT N darbe sayıları ile kayma dalgası hızı arasındaki korelasyonlardan yararlanılmıştır. Bölgede yapılan PS logging ölçümlerinden hesaplanan kayma dalgası hızı (V_s) değerlerinin, İyisan (1996) tarafından önerilen (5.1) ampirik eşitliğine göre belirlenen V_s değerleri ile karşılaştırılması Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

$$V_s = 51.5N^{0.516} \quad (5.1)$$

Şekil 5.1’den de görüldüğü gibi, arazi PS Logging ölçümlerinden belirlenen kayma dalgası hızları ile aynı sondajda yapılan SPT deneylerinden belirlenen N darbe sayılarına göre (5.1) eşitliğinden hesaplanan kayma dalgası hızlarının derinlikle değişimlerinin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir (Özaydın ve diğ.,2004). Her bir formasyona ait seçilen G/G_{\max} – kayma birim şekil değiştirme (γ) ilişkileri ve sönüm oranı – kayma birim şekil değiştirme (γ) ilişkileri Çizelge 5.1’de verilmiştir.



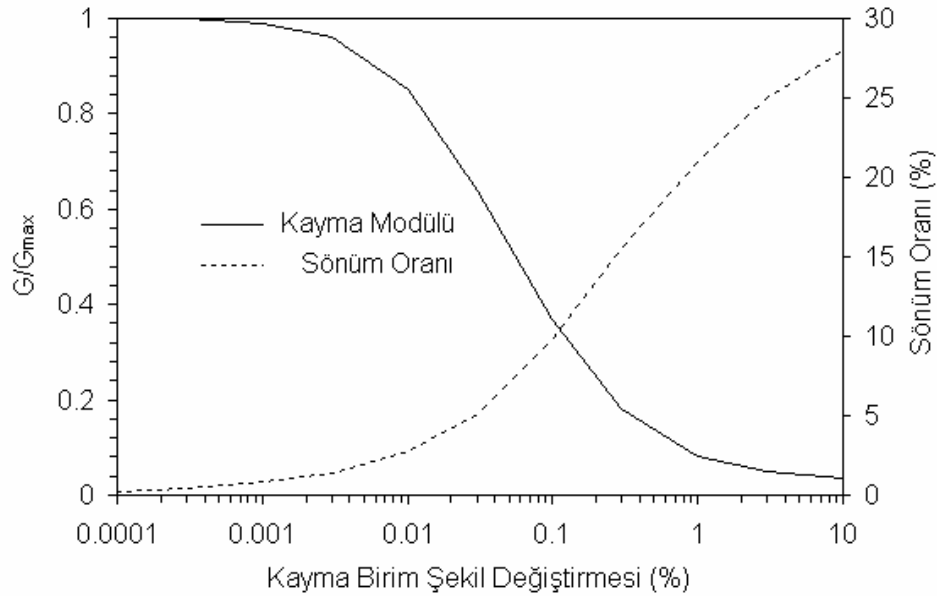
Şekil 5.1 PS Logging ölçümleri ile İyisan (1996)'dan belirlenen Vs değerlerinin karşılaştırılması (Özaydın vd.,2004)

Çizelge 5.1 Her bir formasyona ait seçilen G/G_{max} – γ ve sönüm – γ ilişkileri

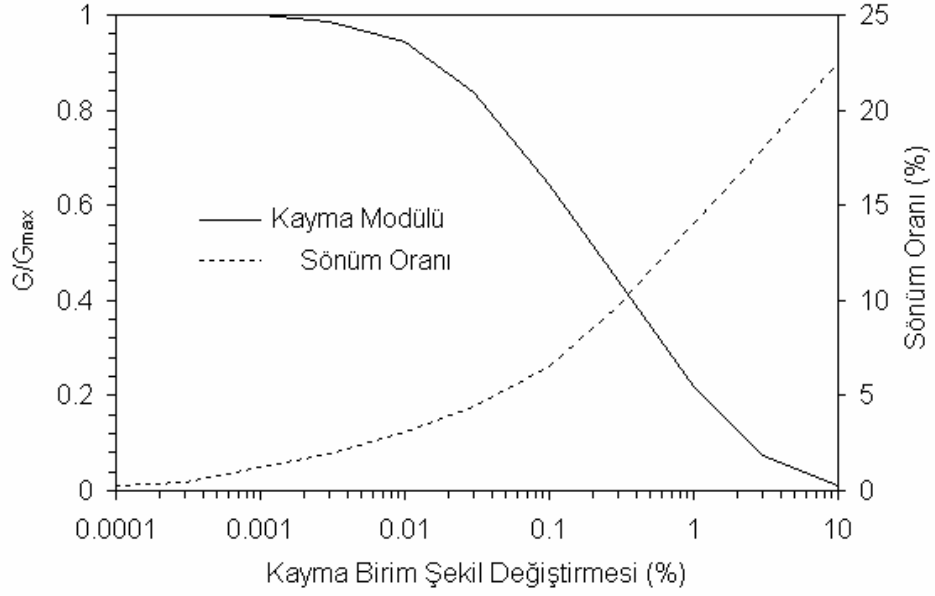
Formasyon	γ_n kN/m ³	Tip	Seçilen şekil değiştirme bağımlı yaklaşım
Dolgu	18	Mat 1	G/G_{max} : Vucetic and Dobry (1991), I_p =%25 Sönüm: Vucetic and Dobry (1991), I_p =%25
Alüvyon	18	Mat 2	G/G_{max} : Seed and Idriss (1970), Üst sınır Sönüm: (Idriss 1990)
Bakırköy*	19	Mat 3	G/G_{max} : Vucetic and Dobry (1991), I_p =% 45 Sönüm: Vucetic and Dobry (1991), I_p =% 45
Bakırköy **	24	Mat 4	G/G_{max} and Sönüm: Kaya için EERA ilişkileri
Gürpınar *	20	Mat 5	G/G_{max} : Vucetic and Dobry (1991), I_p =% 40 Sönüm: Vucetic and Dobry (1991), I_p =% 40
Gürpınar tabanı (kumlu çakıl)	21	Mat 6	G/G_{max} : Seed and Idriss (1970), Üst sınır Sönüm: Seed and Idriss (1970), ortalama
Kırklareli** (Anakaya)	26	-	-

*kil **kireçtaşı

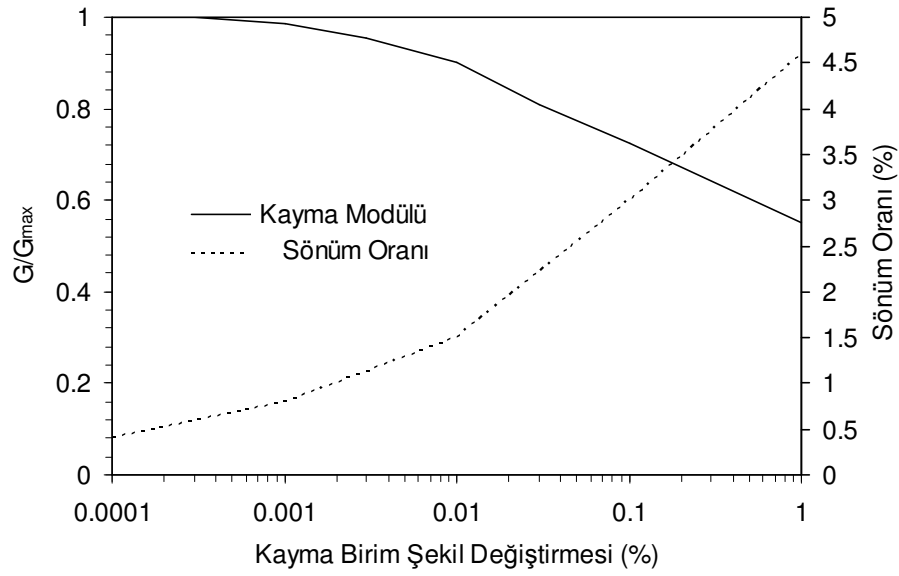
Şekil 5.2 ile Şekil 5.7 arasında sırasıyla Alüvyon, Bakırköy kili, Bakırköy kireçtaşı, Gürpınar kili, Gürpınar tabanı ve dolgu için G/G_{max} , kayma birim şekil değiştirmesi ve sönüm oranı ile kayma birim şekil değiştirmeleri arasındaki ilişkiler grafikler halinde verilmiştir.



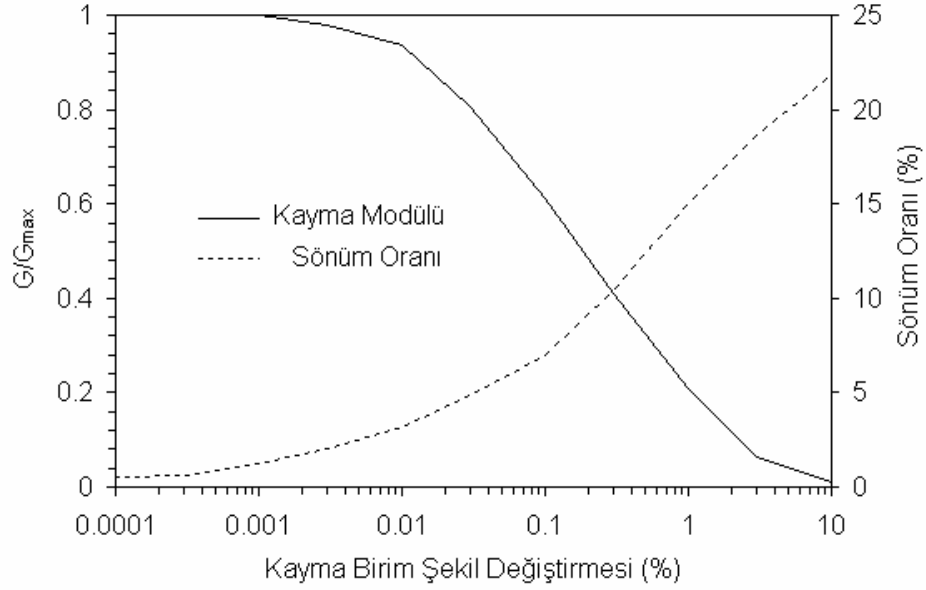
Şekil 5.2 Alüvyon için G/G_{max} , kayma birim şekil değiştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değiştirmesi ilişkileri



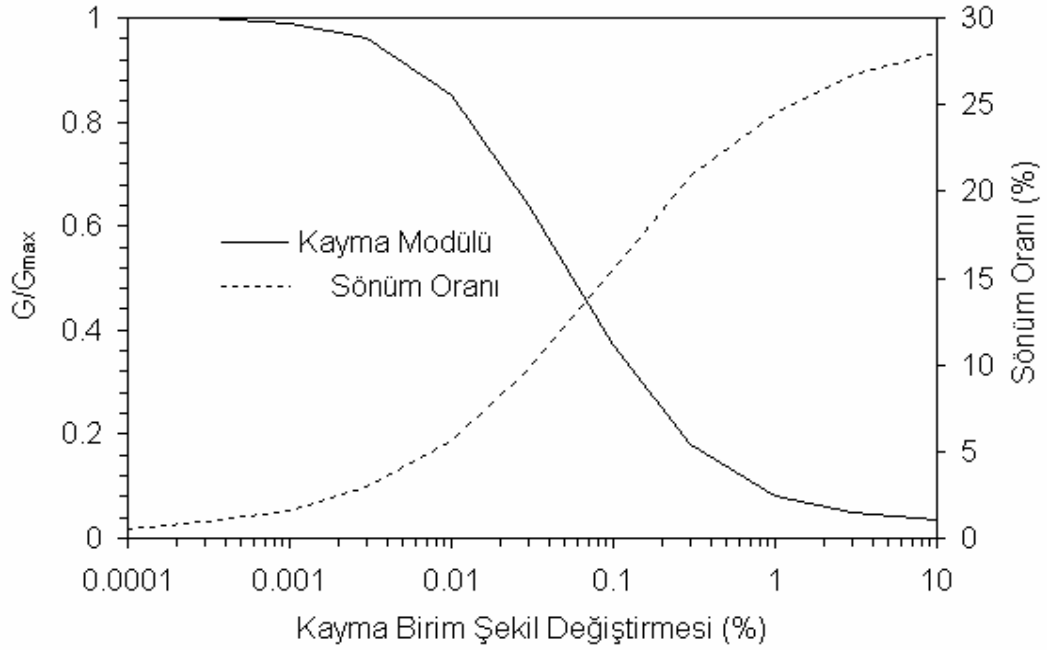
Şekil 5.3 Bakırköy Kili için G/G_{max} , kayma birim şekil değıştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değıştirmesi ilişkileri



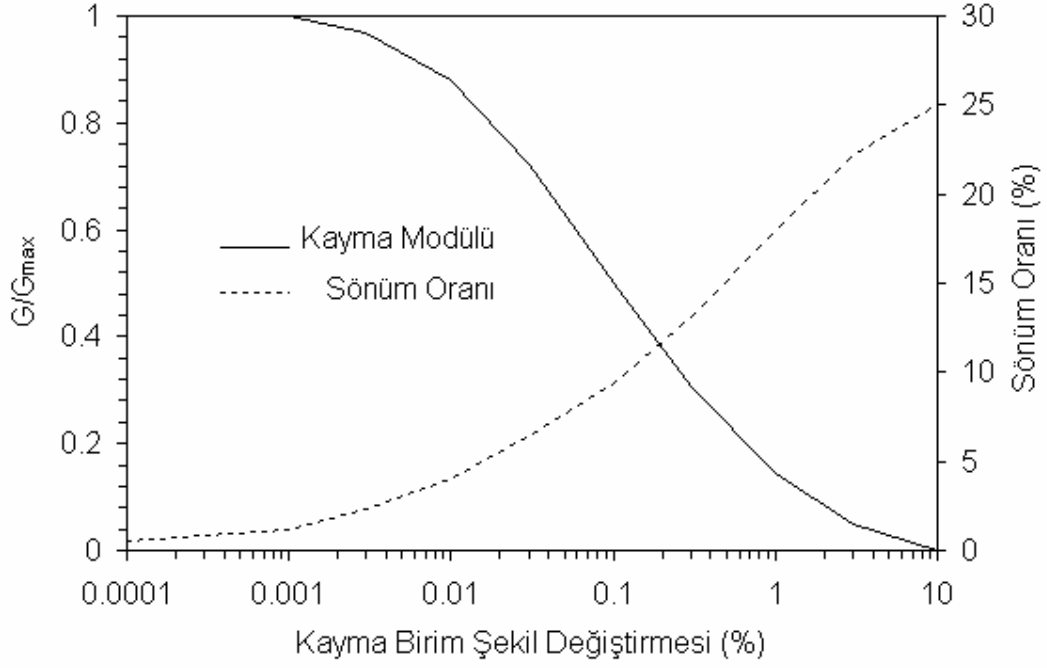
Şekil 5.4 Bakırköy Kireçtaşı için G/G_{max} , kayma birim şekil değıştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değıştirmesi ilişkileri



Şekil 5.5 Gürpınar Kili için G/G_{max} , kayma birim şekil değıştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değıştirmesi ilişkileri



Şekil 5.6 Gürpınar Tabanı (kum+çakıl) için G/G_{max} , kayma birim şekil değıştirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değıştirmesi ilişkileri Sönüm Oranı ilişkisi



Şekil 5.7 Dolgu için G/G_{max} , kayma birim şekil değişirmesi ve sönüm oranı, kayma birim şekil değişirmesi ilişkileri

Deepsoil ve EERA ile yapılan bir boyutlu analizlerde kullanılan kayma dalgası hızları (V_s) Çizelge 4.1’de verilen SPT N değerlerine göre (5.1) eşitliğinden belirlenen değerler ile PS logging ölçümlerinde elde edilen değerler kullanılarak belirlenmiştir. Çizelge 5.2’de formasyonlara göre belirlenen V_s değişimleri gösterilmiştir. İki boyutlu analizlerde ise V_s değerleri her bir tabaka için ortalama bir değer olarak girilmiştir. Çizelge 5.3’de iki boyutlu analizlerde kullanılan malzeme parametreleri her bir formasyon için gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 EERA ve Deepsoil’de kullanılan kayma dalgası hızları

Formasyon İsmi	V_s (m/sn)
Dolgu	140-170
Bakırköy	170-470
Gürpınar	240-555
Gürpınar T.	500-555
Kırlareli	300-550
Anakaya	700

Çizelge 5.3 Her bir formasyona için Plaxis'te kullanılan malzeme parametreleri

	γ_k (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	E_{50}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)	$\gamma_{0,7}$ (%)	G_0^{ref} (kPa)	V_s^* (m/sn)
Dolgu	18	19	1	25	1,126E+05	3,885E+05	0,1	3,347E+05	140
Bakırköy	21	22	12	25	9,257E+05	3,124E+06	0,1	3,429E+06	275
Gürpınar	20	21	1	25	7,052E+05	2,080E+06	0,1	1,131E+06	470
Gürpınar T.	21	21	1	35	6,022E+05	1,298E+06	0,1	2,322E+06	500
Kırklareli	21	22	1	35	7,022E+05	2,257E+06	0,1	6,482E+06	520
Anakaya	26	28	1	36	9,80E+05	2,940E+06	0,1	2,200E+06	700

Plaxis'de Mohr-Coulomb modeli, kayma dalgası hızı girildiğinde E_{50} değerini otomatik olarak hesaplamaktadır. Buradan elde edilen E_{50} değeri HSsmall modelinde yerine koyularak E_{ur}^{ref} ve G_0^{ref} hesaplanmıştır. Bu şekilde her bir formasyon için malzeme parametreleri elde edilmiş ve Çizelge 5.3'de gösterilmiştir. Deepsoil programında yapılan nonlineer analizlerden üretilmiş Rayleigh sönüm eğrisinden elde edilen ω_1 ve ω_2 açısal frekans değerlerine göre analizlerin yapılacağı noktalarda eşitlik (3.13)'ten hesaplanan Rayleigh α ve Rayleigh β değerleri A-A', B-B' ve C-C' kesitleri için sırasıyla Çizelge 5.4, 5.5 ve 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.4 A-A' Kesiti α ve β Değişimi

NOKTA	ω_1 ve ω_2	α	β
4	3-9	0.2250	0.0083
5	2-5	0.1420	0.0142
6	2-5	0.1420	0.0142
7	2-5	0.1420	0.0142
8	1-8	0.0890	0.0111
9	1-8	0.0890	0.0111
10	1-8	0.0890	0.0111
11	1-9	0.0900	0.0100
12	2-8	0.1600	0.0100
13	1-7	0.0875	0.0125
14	1-7	0.0875	0.0125
15	1-7	0.0875	0.0125
16	1-8	0.0890	0.0111
17	1-8	0.0890	0.0111

Çizelge 5.5 B-B' Kesiti α ve β Değişimi

NOKTA	ω_1 ve ω_2	α	β
4	1-8	0.089	0.0111
5	1-8	0.089	0.0111
6	1-8	0.089	0.0111
7	1-8	0.089	0.0111
8	1-8	0.089	0.0111
9	1-8	0.089	0.0111
10	1-8	0.089	0.0111
11	1-8	0.089	0.0111
12	1-8	0.089	0.0111
13	1-8	0.089	0.0111
14	1-8	0.089	0.0111
15	1-8	0.089	0.0111
16	1-8	0.089	0.0111

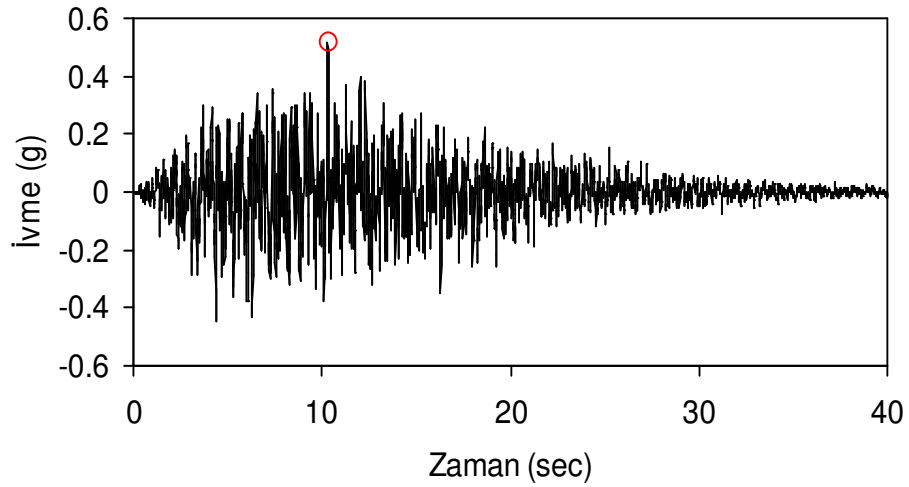
Çizelge 5.6 C-C' Kesiti α ve β Değişimi

NOKTA	ω_1 ve ω_2	α	β
2	1-8	0.0890	0.0111
3	1-8	0.0890	0.0111
4	1-8	0.0890	0.0111
5	1-7	0.0875	0.0125
6	1-8	0.0890	0.0111
7	1-8	0.0890	0.0111
8	1-8	0.0890	0.0111
9	1-8	0.0890	0.0111
10	1-8	0.0890	0.0111
11	1-8	0.0890	0.0111
12	1-8	0.0890	0.0111
13	1-8	0.0890	0.0111
14	1-8	0.0890	0.0111
15	1-8	0.0890	0.0111
16	1-8	0.0890	0.0111
17	1-8	0.0890	0.0111
18	1-8	0.0890	0.0111
19	1-8	0.0890	0.0111
20	1-8	0.0890	0.0111
21	1-8	0.0890	0.0111
22	1-8	0.0890	0.0111
23	1-8	0.0890	0.0111

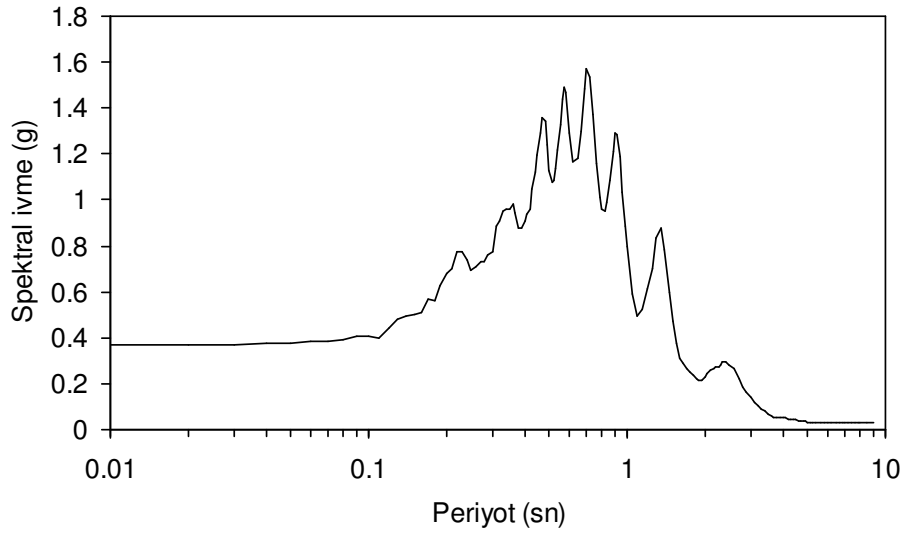
A-A', B-B' ve C-C' kesitlerinde belirtilen noktalarda Deepsoil ile yapılan bir boyutlu nonlieer analizlerden elde edilen modlara göre üretilmiş Rayleigh sönüm eğrisinden yararlanarak elde edilen viskoz sönüm parametrelerinin A-A' kesitinde değişim gösterdiği, B-B' ve C-C' kesitlerinde değişim göstermediği belirlenmiştir.

5.2 Anakaya Seviyesinde girilen Yer Hareketi

Dinamik analizlerde anakaya yer hareketi olarak olası İstanbul depremini temsil eden 475 yıllık tekrarlanma periyotlu sentetik ivme kayıtları kullanılmıştır. Bir boyutlu dinamik analizlerde Şekil 1.4’de görüldüğü gibi her bir analiz noktası için üretilen kayıtlar kullanılırken iki boyutlu Plaxis analizleri için ise tüm kayıtlar incelenmiş ve davranış olarak geneli temsil edebilecek bir kayıt seçilerek kullanılmıştır. İki boyutlu analizlerde kullanılan ivme-zaman değişimi ve ivme spektrumu sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



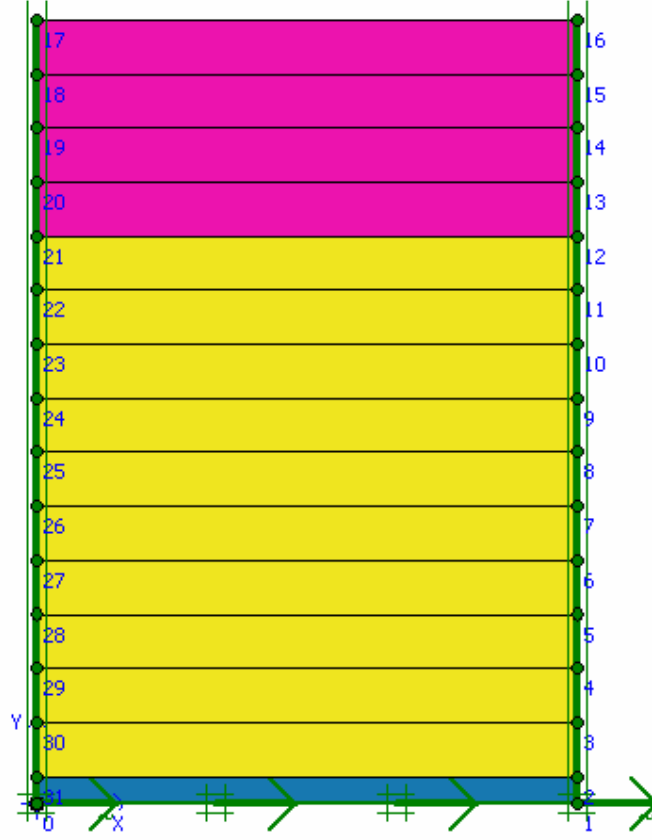
Şekil 5.8 İki boyutlu analizlerde kullanılan ivme-zaman davranışı



Şekil 5.9 İki boyutlu analizlerde kullanılan deprem hareketinin ivme spektrumu

6. ANALİZLERİN KALİBRASYONU

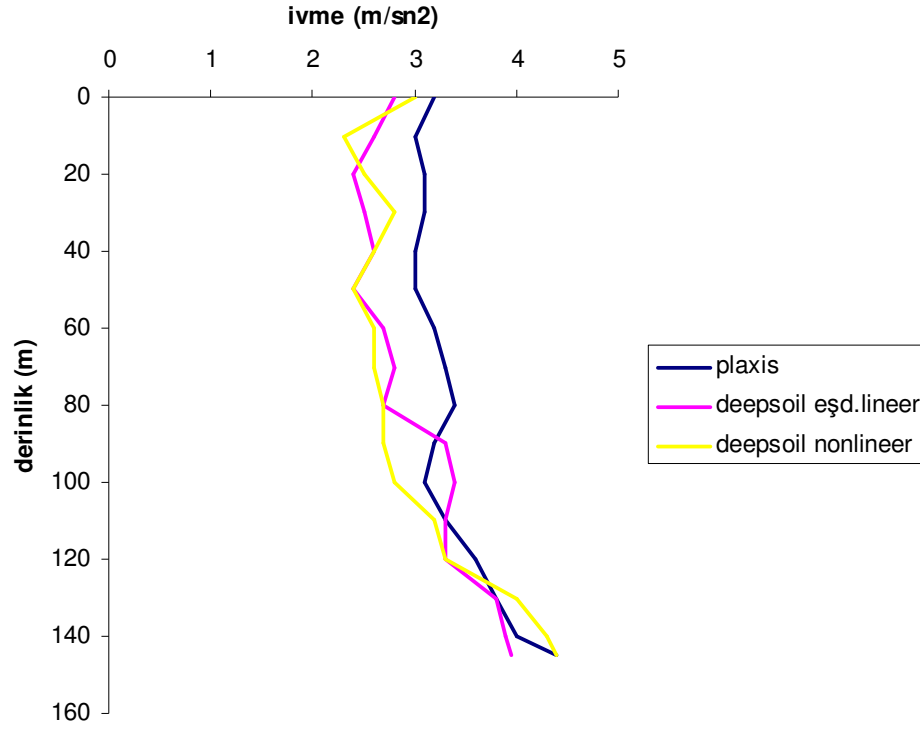
Bir ve iki boyutlu analizlerin kalibrasyonunu yapabilmek için önce yatay tabakalardan oluşan basit bir kesit üzerinde analizler yapılmıştır.



Şekil 6.1 Plaxis'te modellenen 100 m kalınlığında örnek kesit

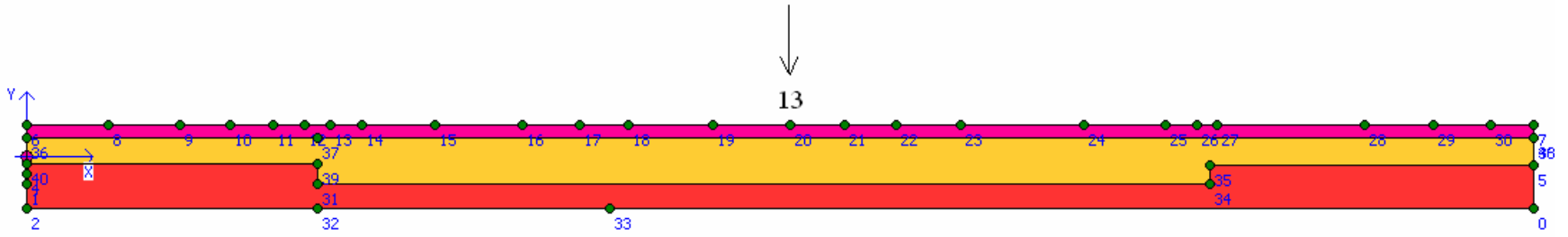
Şekil 6.1'de gösterilen 100 m genişlik ve 145 m derinlikte yatay tabakalardan oluşan örnek kesit 40 m Bakırköy formasyonu, 100 m Gürpınar formasyonu ve 5 m kalınlıkta Gürpınar tabanı formasyonlarından oluşmaktadır. Kesit malzeme özellikleri aynı olacak şekilde Deepsoil programına girilmiş ve eşdeğer lineer ve nonlineer analizler yapılmıştır. Her 10 m için hesaplanan ivme değerleri kullanılarak oluşturulan derinlik – ivme grafikleri her üç analiz için Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi Plaxis ile yapılan iki boyutlu analizlerden elde edilen maksimum zemin yüzü ivme değerleri Deepsoil eşdeğer lineer ve nonlineer analiz sonuçlarından elde edilenlerden biraz daha büyüktür. Topoğrafya ve malzeme sınır etkilerinin aynı olduğu bu analiz sonuçları arasındaki farklılıklardan, kullanılan

nümerik tekniklerin bir miktar farklı sonuçlar verdiği sonucu çıkarılabilir. Analizlerden elde edilen değerler arasındaki fark 100 m derinlikten sonra azalmaktadır.



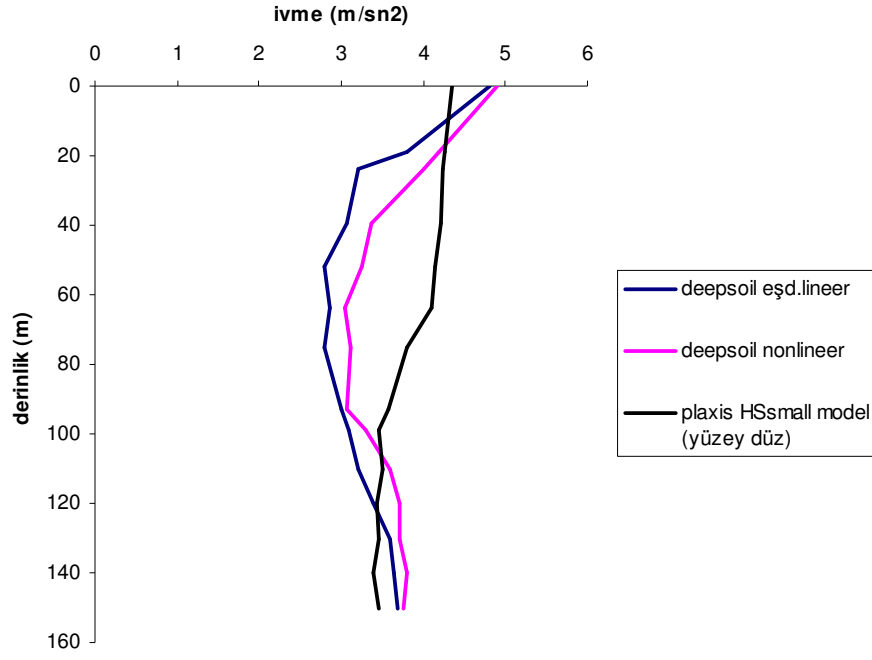
Şekil 6.2 100 m'lik kesitin derinlik – ivme değişimi

Yüzey topografyasının analiz sonuçlarına etkisini incelemek amacıyla seçilen B-B' kesiti için Şekil 6.3'de gösterildiği gibi yüzeyin ve malzeme sınırlarının düz olarak varsayıldığı basitleştirilmiş bir model oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Bu kesit üzerindeki 13 noktası için analiz sonuçları Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Buradan, yüzey topografyası ve malzeme sınırları düz alındığında dahi iki boyutlu analiz ve bir boyutlu analiz sonuçları arasında farklılıklar olabildiği görülmüştür. Dolayısıyla, Şekil 6.2'de olduğu gibi bir boyutlu analiz sonuçları ile iki boyutlu analiz sonuçları birbirinden farklıdır. Bu farklılıkların kullanılan nümerik tekniklerin farklılığından kaynaklandığı söylenebilir. Yine aynı model ve aynı noktada, Plaxis analizlerinde kullanılan HSsmall modeli ile Pekleşen Zemin Modeli (HS)'nin karşılaştırılması yapılmış ve analiz sonuçları Şekil 6.5'de verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere iki modelde elde edilen değerlerin yakın olduğu ancak bir boyutlu analiz sonuçları ile farklılıklar olduğu gözlenmiştir.

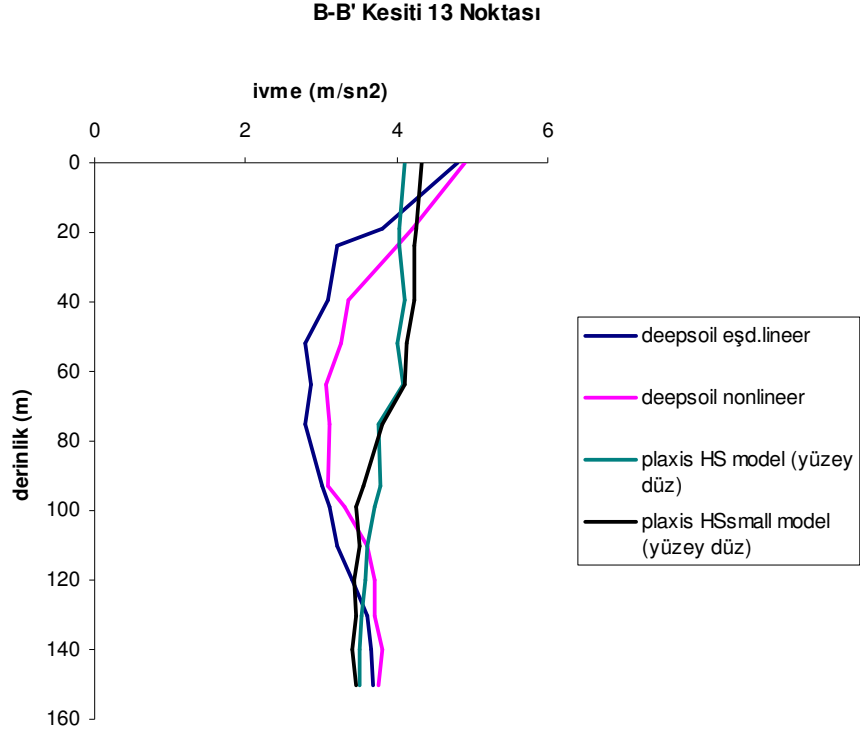


Şekil 6.3 Yüzey ve malzeme sınırlarının düz alındığı B-B' kesiti

B-B' Kesiti 13 Noktası



Şekil 6.4 Yüzey topografyasının etkisini incelemek amacıyla yapılan analiz sonuçları



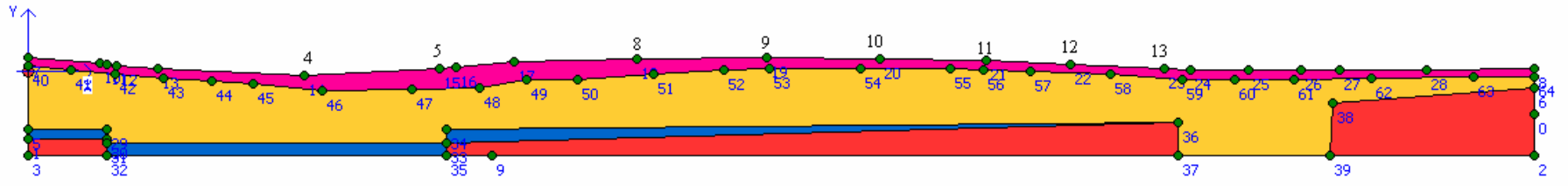
Şekil 6.5 HSsmall ve HS modellerinin karşılaştırılması

7. ANALİZLER VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

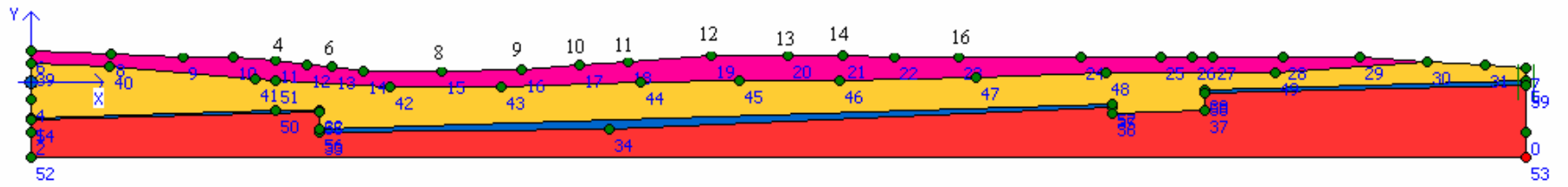
Çalışma kapsamında, İstanbul İli, Zeytinburnu İlçesi'nde Batı-Doğu doğrultusunda iki adet ($A-A'$ ve $B-B'$) enkesit ve Güneydoğu-Kuzeybatı doğrultusunda bir adet ($C-C'$) enkesit üzerinde bir ve iki boyutlu davranış analizleri yapılmıştır. Bir boyutlu analizler EERA ve Deepsoil programları ile iki boyutlu analizler ise Plaxis 8.5 programı ile yapılmıştır. Deepsoil programı frekans alanında lineer ve eşdeğer lineer çözüm yapabilirken, zaman alanında lineer ve nonlinear çözümler yapabilmektedir. Bu sebeple bir boyutlu analizler Deepsoil'in eşdeğer lineer ve nonlinear modları için ayrı ayrı yapılmıştır.

Her bir kesit için yüzey topoğrafyasının değiştiği kısımlarda ve düz alanlarda analiz sonuçlarını temsil ettiği düşünülen noktalar seçilmiştir. $A-A'$ kesitinde 7 nokta, $B-B'$ kesitinde 10 nokta ve $C-C'$ kesitinde 8 nokta üzerinde bir ve iki boyutlu analizler sonucunda belirlenen ivme ve spektral ivme değerlerinin değişimlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Kesitler ve seçilen noktalar Şekil 7.1-7.3'te gösterilmiştir. Çizelge 7.1, 7.2 ve 7.3'de ise bu noktaların kesitler üzerindeki koordinatları verilmiştir. Şekil 7.4, 7.5 ve 7.6'da sırasıyla $A-A'$, $B-B'$ ve $C-C'$ kesitlerinde zemin yüzünde analiz sonuçlarının özetlendiği noktalarda bir boyutlu ve iki boyutlu analizlerden elde edilen yüzey ivmelerinin kesit boyunca yatay mesafeyle değişimi gösterilmiştir. Şekil 7.4(a), Şekil 7.5(a) ve Şekil 7.6(a)'da önce bir ve iki boyutlu analizlerin hepsi birden karşılaştırılış, Şekil 7.4(b), Şekil 7.5(b) ve Şekil 7.6(b)'de bir ve iki boyutlu nonlinear analiz sonuçları karşılaştırılmış, daha sonra da Şekil 7.4(c), Şekil 7.5(c) ve Şekil 7.6(c)'de bir boyutlu analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekillerde kesit topoğrafyasıda gösterilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, iki boyutlu ve bir boyutlu analiz sonuçlarının (Şekil 7.4(b), Şekil 7.5(b) ve Şekil 7.6(b)) birbirinden oldukça farklı olduğu, $A-A'$ ve $B-B'$ kesitlerinde bir boyutlu analiz sonuçlarının birbiriyle yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Plaxis ve Deepsoil (nonlinear) programları ile yapılan analizler sonucu eğimin değiştiği noktalarda hesaplanan maksimum yüzey ivmesi değerlerinin birbirlerinden farklı olduğu gözlenmiştir. Bir boyutlu analizler kendi içinde karşılaştırıldıklarında değer olarak birbirine en yakın maksimum yüzey ivmeleri şevin topuk ve tepe noktalarında hesaplanmıştır. Benzer şekilde Şekil 7.7(a), Şekil 7.8(a) ve Şekil 7.9(a)'da bir ve iki boyutlu analizlerden zemin yüzünden belirlenen maksimum spektral ivme değerleri, Şekil 7.7(b), Şekil 7.8(b) ve Şekil 7.9(b)'de nonlinear analizlerden belirlenen değerler ve Şekil 7.7(c), Şekil 7.8(c) ve Şekil 7.9(c)'de bir boyutlu analizlerden belirlenen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buradan, analizlerden elde edilen tepki spektrumları incelendiğinde Deepsoil programı ile elde edilen değerlerin, EERA ile elde edilen değerlerden genellikle daha büyük olduğu

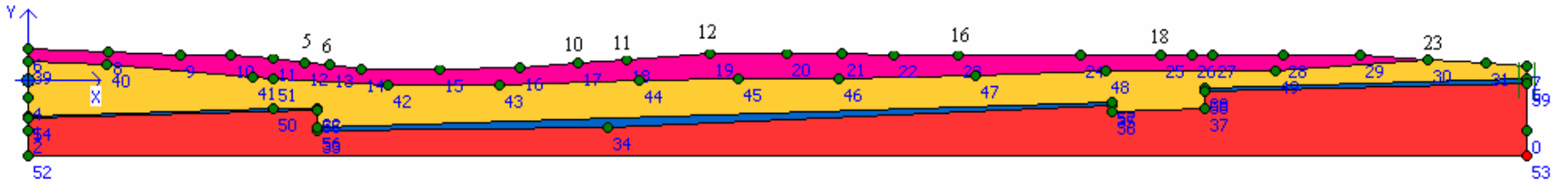
görülmüştür. İki boyutlu analizlerde kesit yüzeyi boyunca hesaplanan maksimum spektral ivmeler incelendiğinde şev topuğu ve şev tepe noktasında spektral ivmelerin arttığı görülmüştür. $A-A'$ kesiti üzerinde seçilen noktalar için hesaplanan bir ve iki boyutlu analizler sonucu elde edilen derinlik-ivme değişimi ile zemin yüzünde belirlenen ivme-zaman değişimi ve ivme spektrumlarının karşılaştırmaları Şekil 7.10 ile Şekil 7.16 arasında verilmiştir.



Şekil 7.1 A-A' Kesiti



Şekil 7.2 B-B' Kesiti



Şekil 7.3 C-C' Kesiti

Çizelge 7.1 A-A' Kesiti Nokta Koordinatları

NOKTA	FORMASYON	X (m)	Kot (m)	Konumu
5*	Bakırköy F.	976.90	6.00	Yamaç topoğu
6	Bakırköy F.	1015.40	11.00	Yamaç topoğu
7	Bakırköy F.	1153.90	24.00	Şev tepesi
8*	Bakırköy F.	1446.20	28.00	Şev tepesi
9*	Bakırköy F.	1753.90	32.00	Tepe düzlüğü
10*	Bakırköy F.	2023.10	28.00	Tepe düzlüğü
11*	Bakırköy F.	2277.00	25.00	Tepe düzlüğü
12*	Bakırköy F.	2477.00	17.00	Yamaç üstü
13*	Dolgu	2700.00	6.00	Alüvyon düzlüğü
14	Dolgu	2761.60	5.00	Alüvyon düzlüğü
15	Dolgu	2900.00	4.00	Alüvyon düzlüğü
16	Dolgu	3023.20	3.00	Alüvyon düzlüğü
17	Dolgu	3115.50	3.00	Alüvyon düzlüğü

* Şekil 7.10 – Şekil 7.16 arasında karşılaştırmalı sonuçları verilen noktalar

Çizelge 7.2 B-B' Kesiti Nokta Koordinatları

NOKTA	FORMASYON	X (m)	Kot (m)	Konumu
4*	Bakırköy F.	584.60	54.00	Yamaç üstü
5	Bakırköy F.	661.50	44.00	Yamaç üstü
6*	Bakırköy F.	723.00	38.00	Yamaç üstü
7	Dolgu	796.20	28.00	Düzlük
8*	Dolgu	984.60	28.00	Düzlük
9*	Dolgu	1176.90	32.00	Yamaç eteği
10*	Bakırköy F.	1315.40	44.00	Yamaç üstü
11*	Bakırköy F.	1430.80	49.00	Yamaç üstü
12*	Bakırköy F.	1630.80	64.00	Tepe düzlüğü
13*	Bakırköy F.	1815.80	64.00	Tepe düzlüğü
14*	Bakırköy F.	1946.20	64.00	Tepe düzlüğü
15	Bakırköy F.	2069.20	60.00	Tepe düzlüğü
16*	Bakırköy F.	2223.10	60.00	Tepe düzlüğü

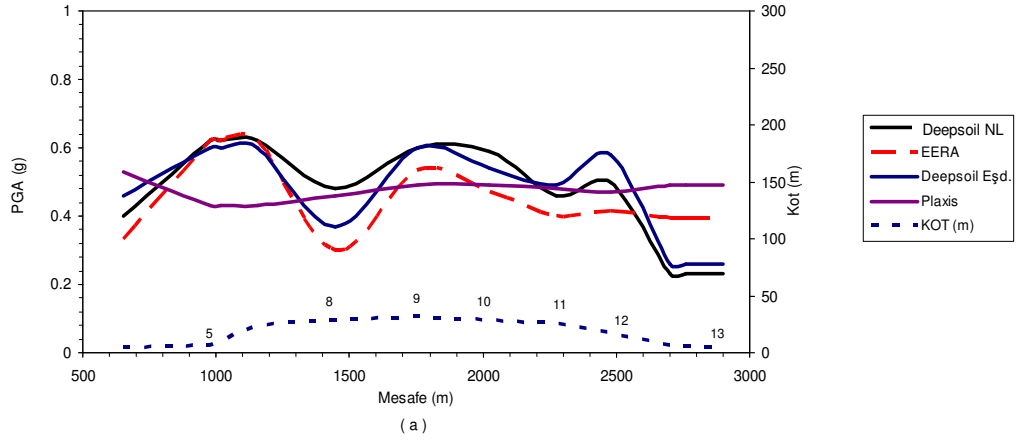
* Şekil 7.17 ile Şekil 7.26 arasında karşılaştırmalı sonuçları verilen noktalar

Çizelge 7.3 C-C' Kesiti Nokta Koordinatları

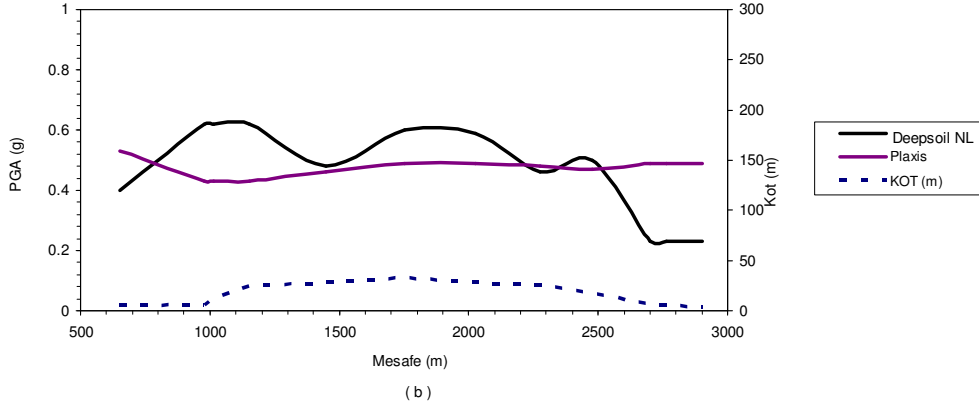
NOKTA	FORMASYON	X (m)	Kot (m)	Konumu
2	Bakırköy F.	258.30	0.00	Yamaç topuğu
3	Bakırköy F.	400.00	8.00	Yamaç eteği
4	Bakırköy F.	575.00	10.00	Yamaç eteği
5*	Bakırköy F.	883.30	18.00	Yamaç eteği
6*	Bakırköy F.	1208.30	20.00	Yamaç eteği
7	Bakırköy F.	1291.60	24.00	Yamaç eteği
8	Bakırköy F.	1466.60	27.00	Yamaç eteği
9	Bakırköy F.	1775.00	30.00	Düzlük
10*	Bakırköy F.	1908.30	38.00	Düzlük
11*	Bakırköy F.	2308.30	40.00	Düzlük
12*	Bakırköy F.	2983.30	40.00	Düzlük
13	Bakırköy F.	3283.30	40.00	Düzlük
14	Bakırköy F.	3391.60	44.00	Düzlük
15	Bakırköy F.	3808.30	44.00	Düzlük
16*	Bakırköy F.	4041.60	53.00	Yamaç tepesi
17	Bakırköy F.	4375.00	55.00	Yamaç eteği
18*	Bakırköy F.	4800.00	60.00	Yamaç tepesi
19	Bakırköy F.	5016.60	70.00	Düzlük
20	Bakırköy F.	5283.30	78.00	Düzlük
21	Bakırköy F.	5625.00	72.00	Yamaç üstü
22	Bakırköy F.	5700.00	64.00	Yamaç üstü
23*	Bakırköy F.	5775.00	58.00	Yamaç üstü

* Şekil 7.27 ile Şekil 7.34 arasında karşılaştırılmalı sonuçları verilen noktalar

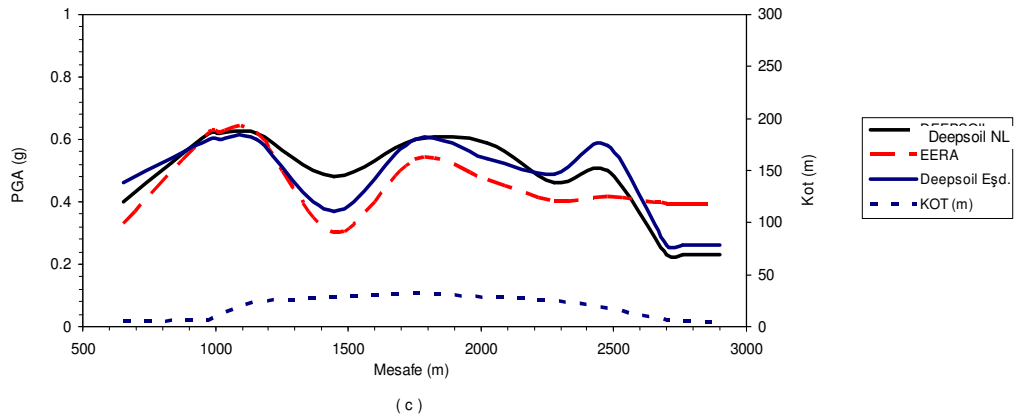
A-A KESİTİ



A-A KESİTİ

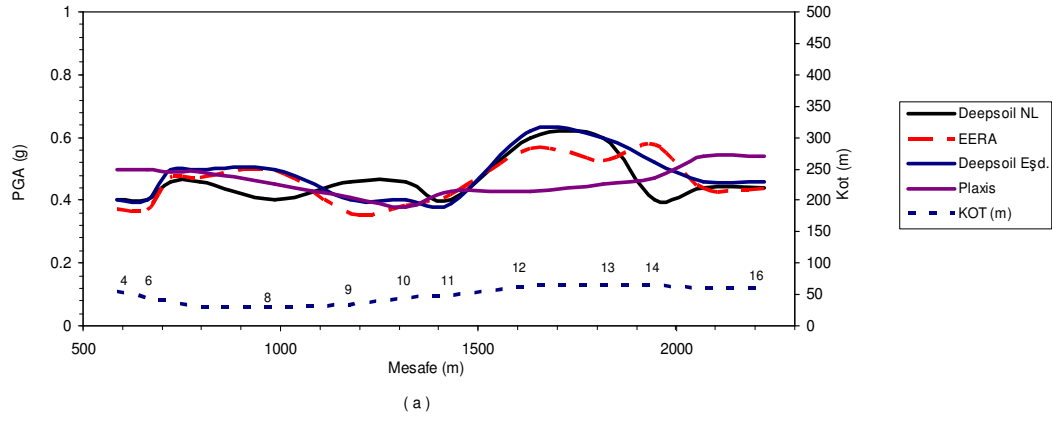


A-A KESİTİ

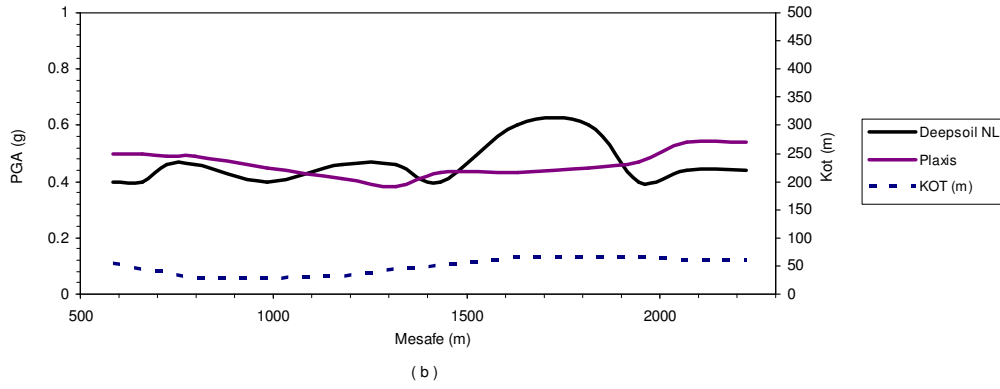


Şekil 7.4 A-A' Kesitinde yüzey topografyası ve hesaplanan maksimum yüzey ivmelerinin yatay mesafe ile değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması

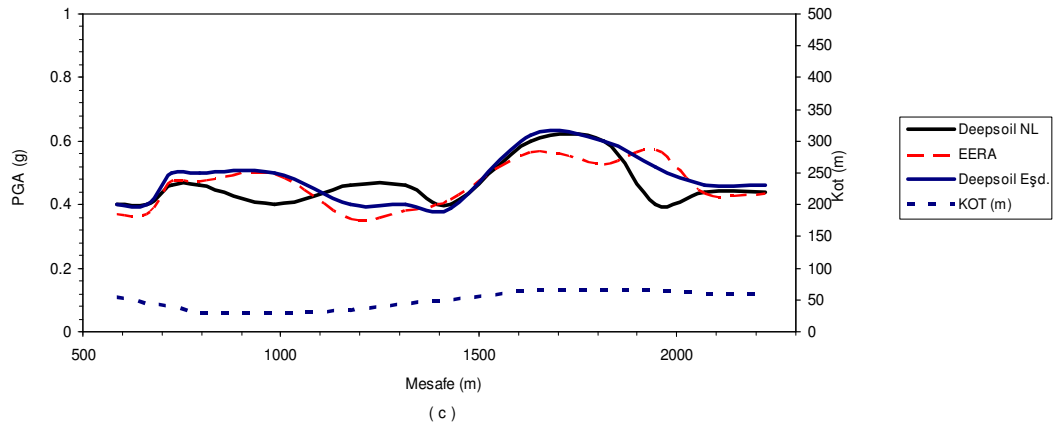
B-B KESİTİ



B-B KESİTİ

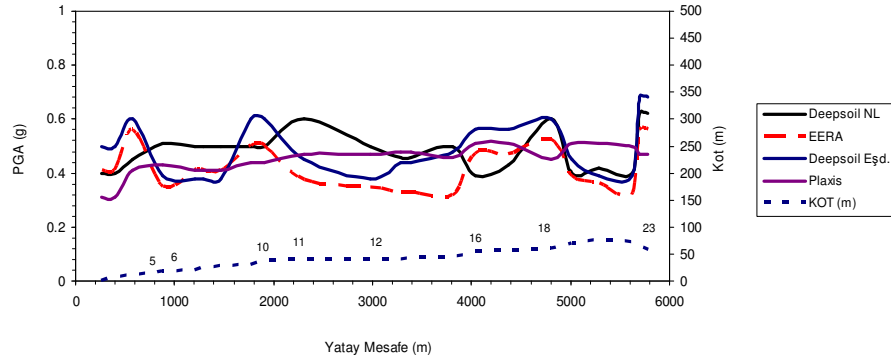


B-B KESİTİ



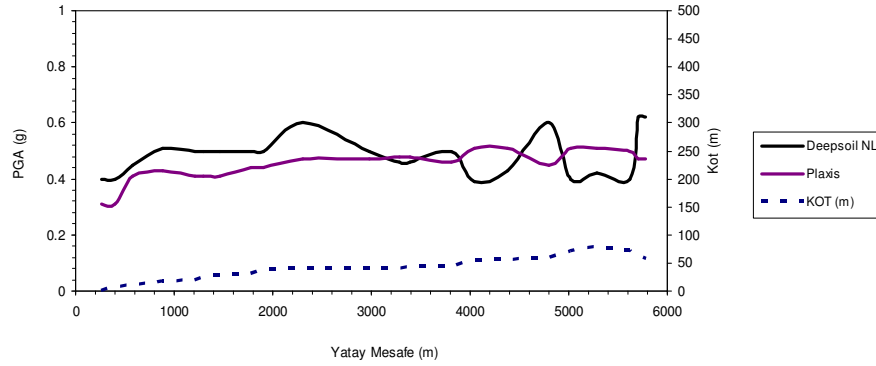
Şekil 7.5 B-B' Kesitinde yüzey topografyası ve hesaplanan maksimum yüzey ivmelerinin yatay mesafe ile değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması

C-C KESİTİ



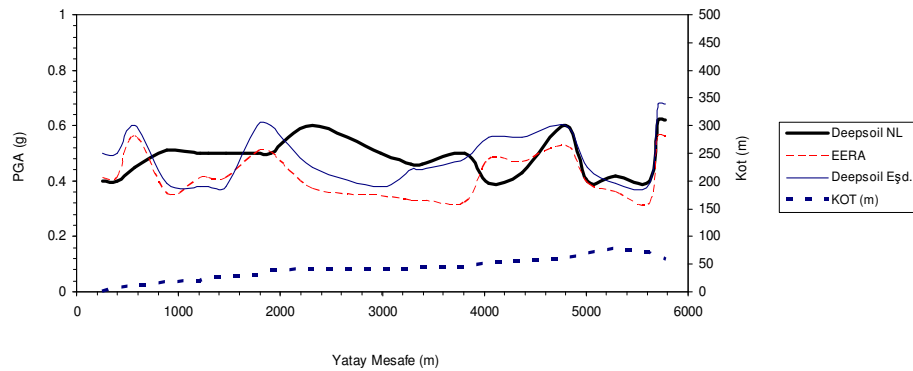
(a)

C-C KESİTİ



(b)

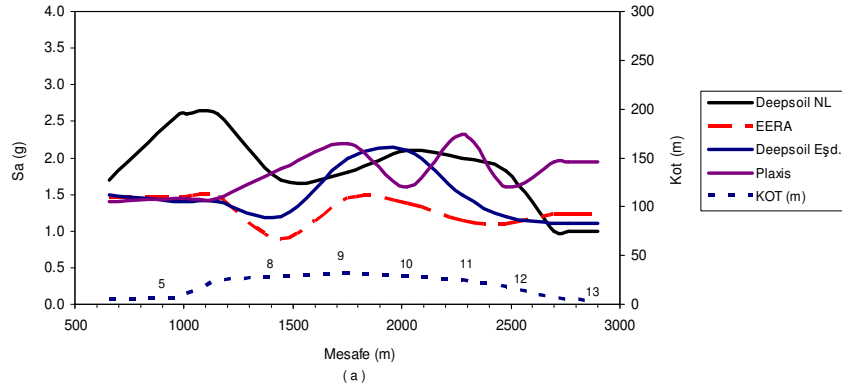
C-C KESİTİ



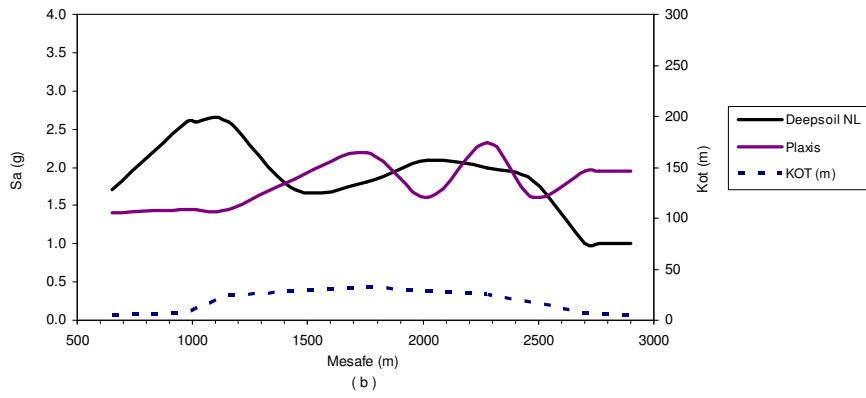
(c)

Şekil 7.6 C-C' Kesitinde yüzey topografyası ve hesaplanan maksimum yüzey ivmelerinin yatay mesafe ile değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması

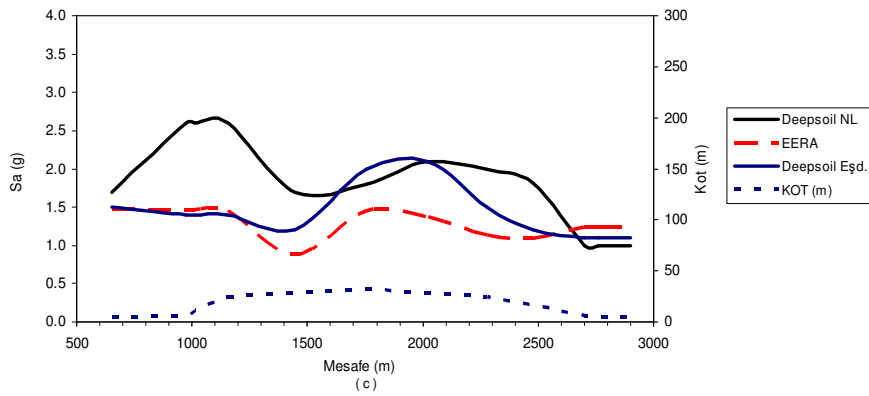
A-A KESİTİ



A-A KESİTİ

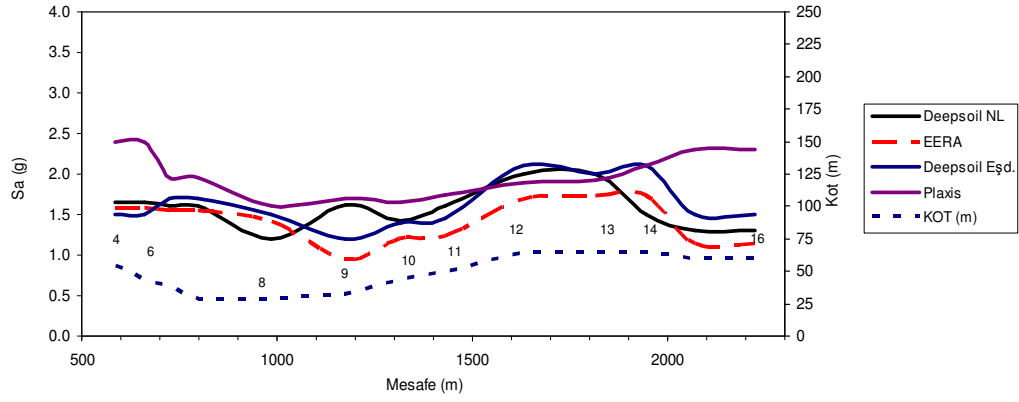


A-A KESİTİ



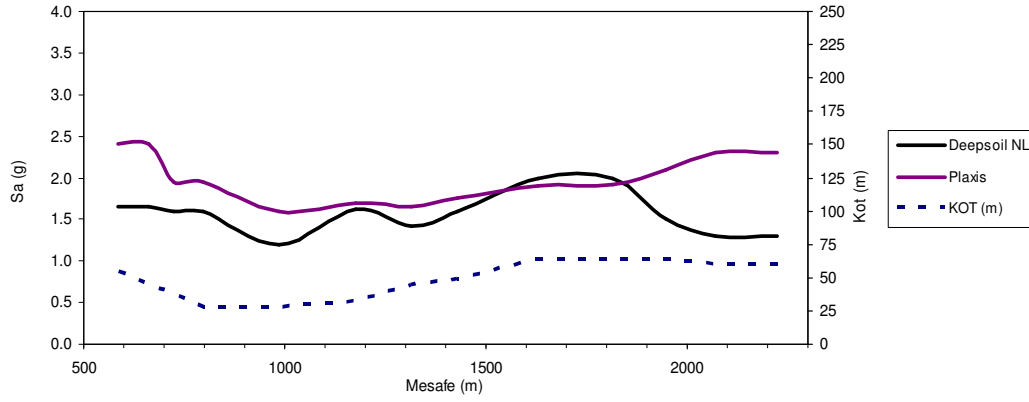
Şekil 7.7 A-A' Kesitinde yüzey topografyası ve maksimum spektral ivmelerin yatay mesafe ile değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması

B-B KESİTİ



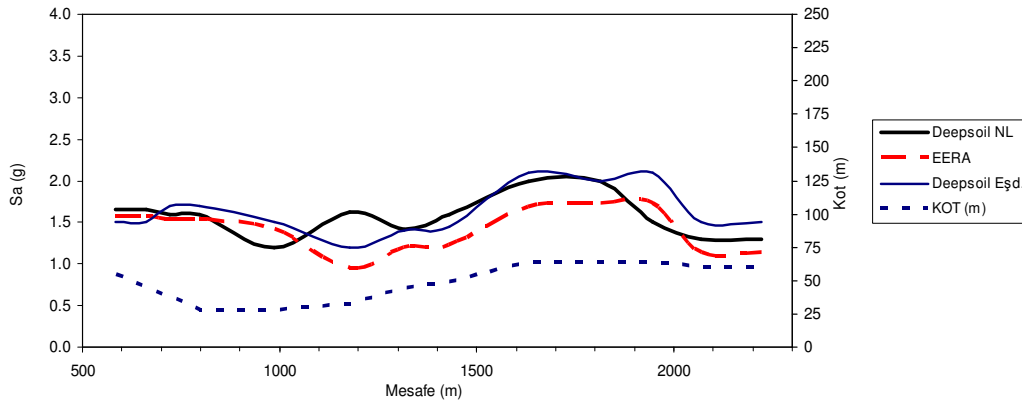
(a)

B-B KESİTİ



(b)

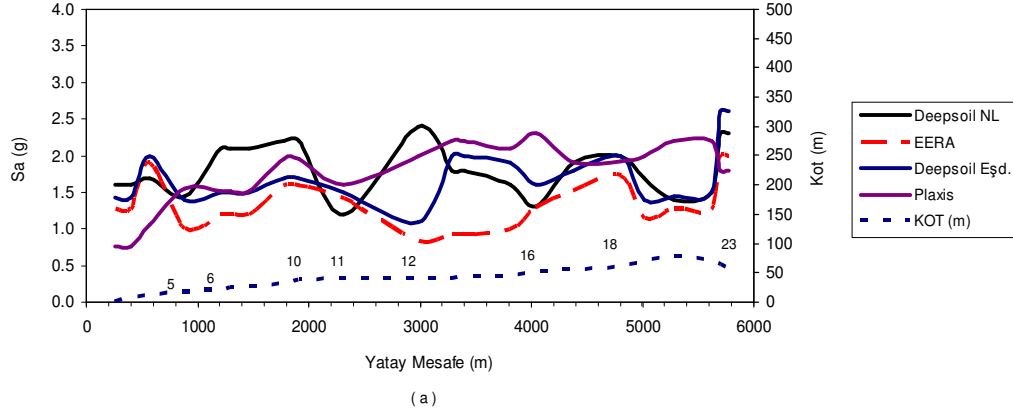
B-B KESİTİ



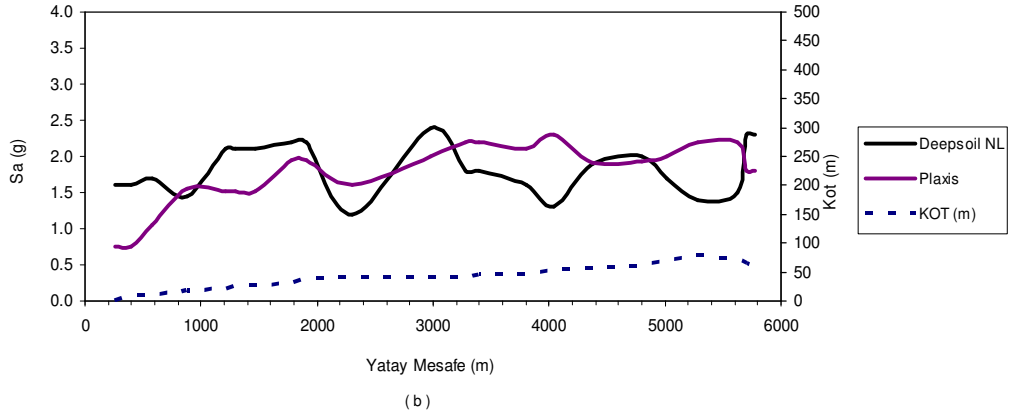
(c)

Şekil 7.8 B-B' Kesitinde yüzey topografyası ve spektral ivmelerin yatay mesafeye göre değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması

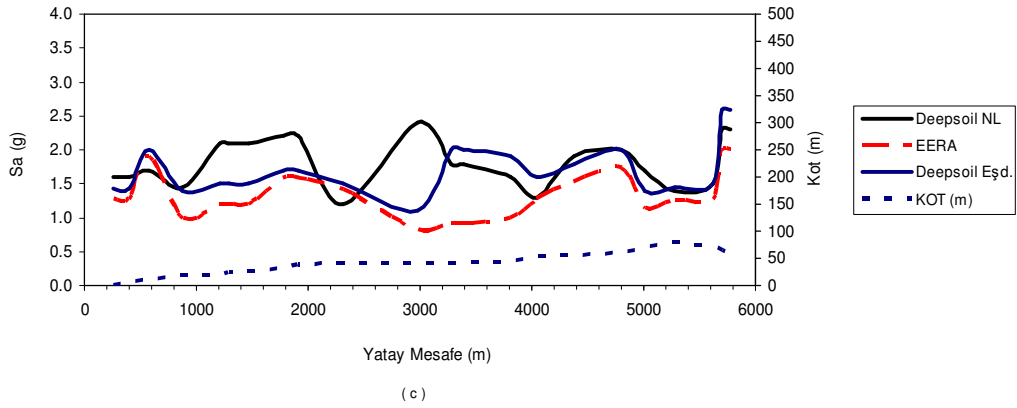
C-C KESİTİ



C-C KESİTİ



C-C KESİTİ



Şekil 7.9 C-C' Kesitinde yüzey topografyası ve spektral ivmelerin yatay mesafeye göre değişimi (a) bir ve iki boyutlu analizlerin karşılaştırılması, (b) bir ve iki boyutlu non-linear analizlerin karşılaştırılması, (c) bir boyutlu analizlerin karşılaştırılması

A-A' kesitinde şev topuğunda dolgu üzerinde yeralan 5 noktası için hesaplanan maksimum yüzey ivmesi ve derinlikle değişimi incelendiğinde (Şekil 7.10) tek boyutlu analizler ile hesaplanan maksimum yüzey ivmesi değerlerinin birbirine yakın ve iki boyutlu analiz sonuçlarından daha büyük olduğu, derinlikle bu farkın azaldığı ve yaklaşık 50 m derinlikten sonra bir ve iki boyutlu analiz sonuçlarının birbirine yaklaştığı gözlenmektedir. Zemin yüzü için hesaplanan ivme spektrumlarının da birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

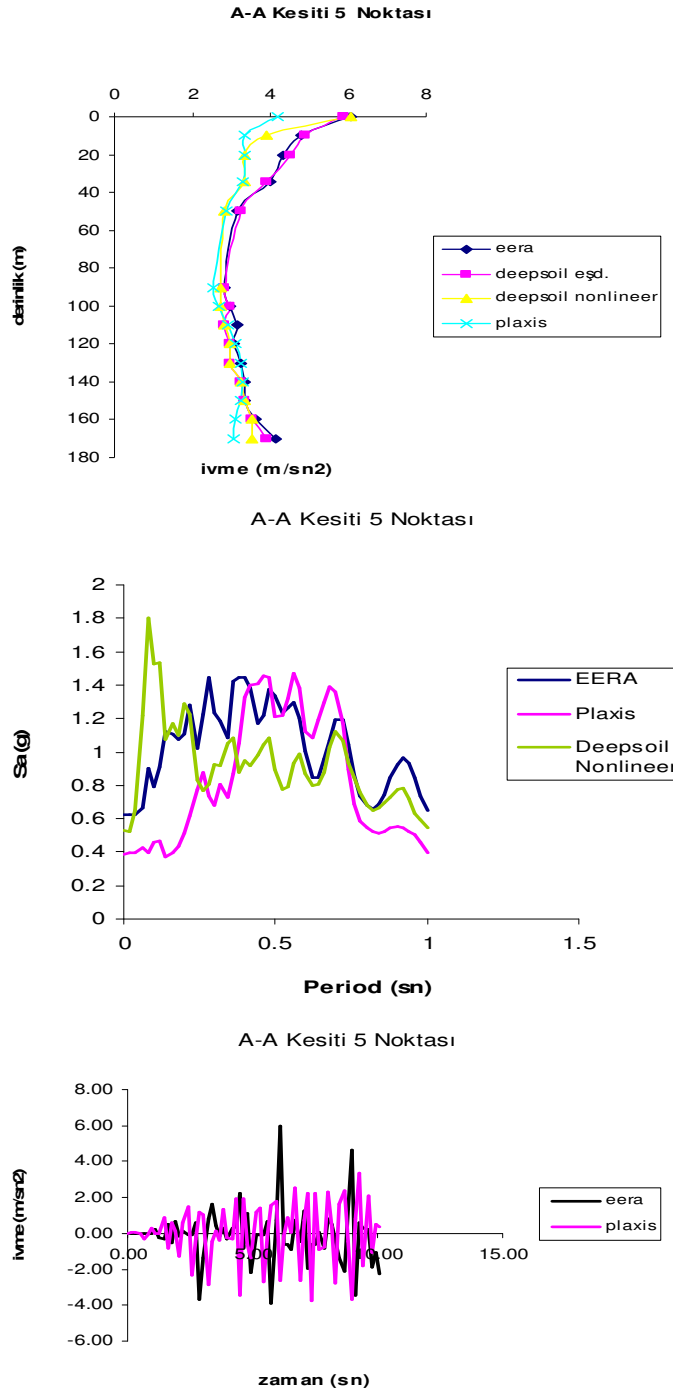
A-A' kesitinde şev tepesinde Bakırköy formasyonu üzerinde yeralan 8 noktası için hesaplanan maksimum yüzey ivmesi değerleri incelendiğinde (Şekil 7.11) bir boyutlu nonlinear ve iki boyutlu analiz sonuçlarının birbirine yakın olduğu ve bir boyutlu eşdeğer lineer analiz sonuçlarından büyük değerler elde edildiği, benzer farklılıkların yüzey ivme spektrumları arasında da görüldüğü gözlenmektedir. Maksimum ivmelerin derinlikle değişimi incelendiğinde ise, bir boyutlu eşdeğer analiz sonuçlarının birbirine yakın olduğu ancak bir boyutlu nonlinear ve iki boyutlu analiz sonuçlarının birbiri ile ve bir boyutlu eşdeğer lineer sonuçları ile farklılıklar gösterdiği gözlenmektedir.

A-A' kesitinin Bakırköy formasyonunun yüzeylendiği tepe düzlüğünde yeralan 9, 10 ve 11 noktaları için hesaplanan maksimum yüzey ivmeleri değerleri ve ivme spektrumları karşılaştırıldığında (Şekil 7.12, 7.13 ve 7.14) hesaplanan maksimum yüzey ivmelerinin birbirine oldukça yakın olduğu ancak ivme spektrumları arasında önemli farklılıklar görüldüğü, maksimum ivmelerin derinlik değişimi karşılaştırıldığında ise bir boyutlu analiz sonuçlarının birbiri ile daha uyumlu fakat iki boyutlu analiz sonuçlarına göre daha düşük değerler elde edildiği, yaklaşık 100 m derinlikten sonra bir ve iki boyutlu analiz sonuçlarının birbirine yakınlaştığı gözlenmektedir.

A-A' kesitinde şev üzerinde Bakırköy formasyonunda yeralan 12 noktası için analiz sonuçları karşılaştırıldığında (Şekil 7.15) bir ve iki boyutlu analizler sonucunda belirlenen maksimum yüzey ivmesi değerlerinin oldukça farklılık gösterdiği, derinlikle bir boyutlu analiz sonuçlarının birbirine yaklaştığı ve iki boyutlu analiz sonuçlarından daha düşük değerler verdiği, yaklaşık 80 m derinlikten sonra farklılıkların azaldığı gözlenmektedir.

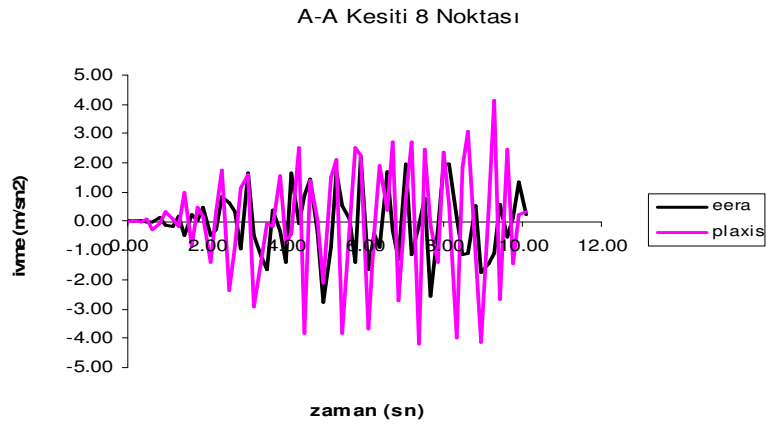
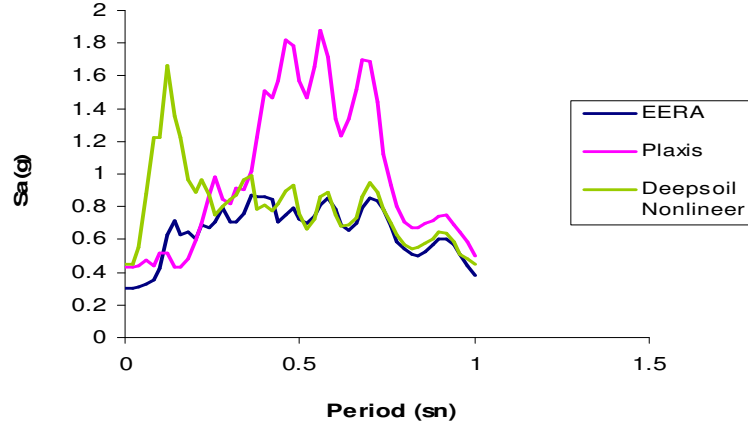
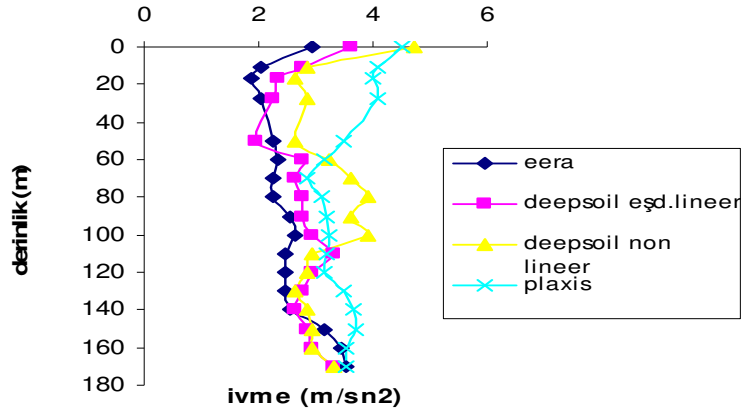
A-A' kesitinde alüvyal düzlükte dolgu üzerinde yeralan 13 noktası için hesaplanan maksimum yüzey ivmesi değerlerinin (Şekil 7.16) analiz yönteminden çok etkilendiği görülmektedir. Deepsoil eşdeğer lineer ve nonlinear analiz sonuçlarının birbirine yakın ve en küçük değerleri oluşturduğu, en büyük değerini iki boyutlu analiz sonuçları olduğu, yaklaşık 60 m derinlikten sonra bütün sonuçların birbirine yaklaştığı gözlenmektedir. Bir ve iki boyutlu analizlerde elde

edilen yüzey ivme spektrumları arasında da önemli farklılıklar göze çarpmaktadır.

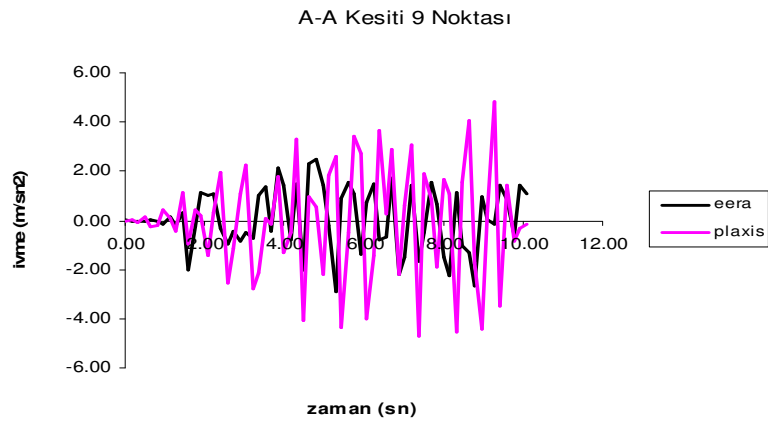
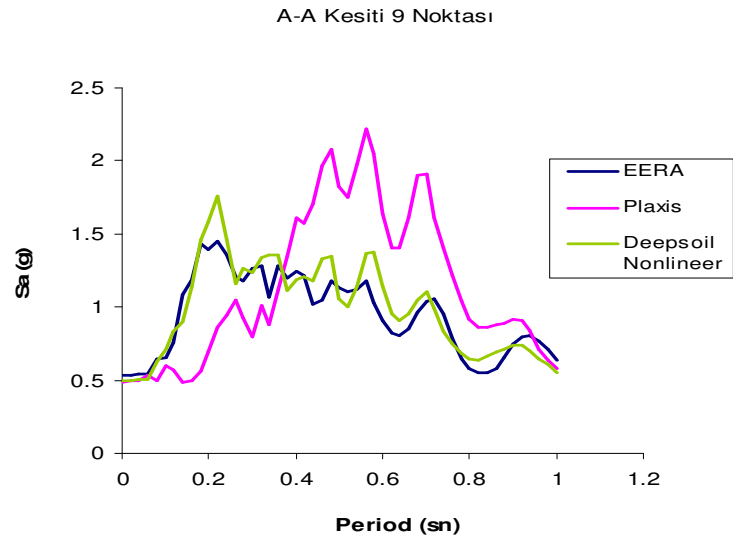
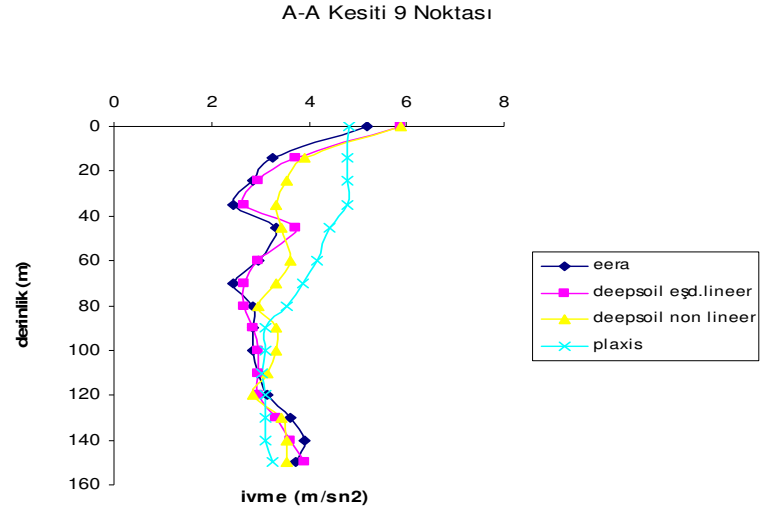


Şekil 7.10 A-A' Kesiti 5 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

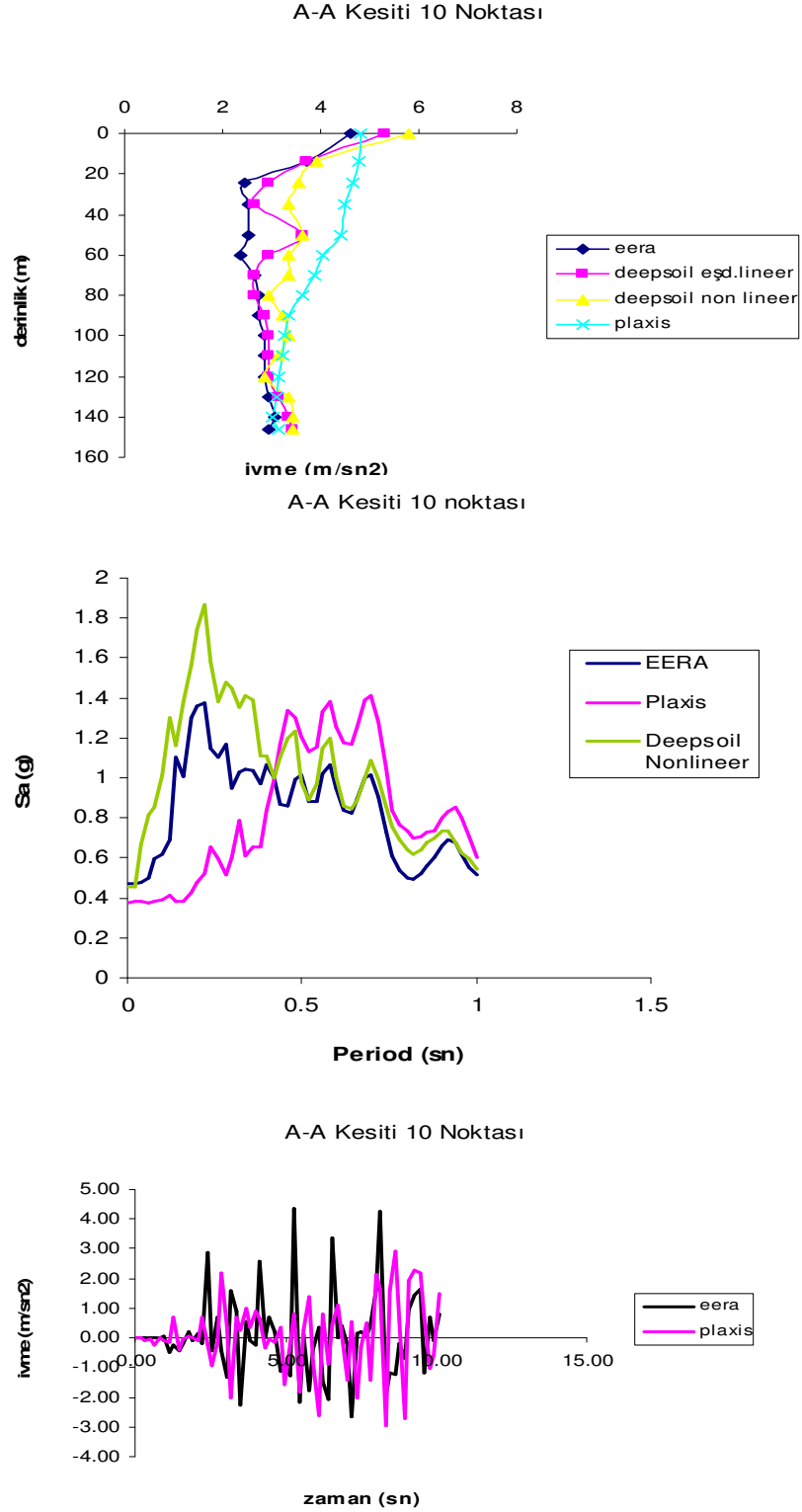
A-A Kesiti 8 Noktası



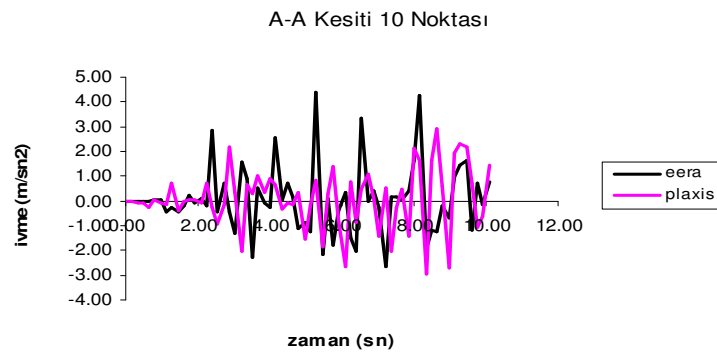
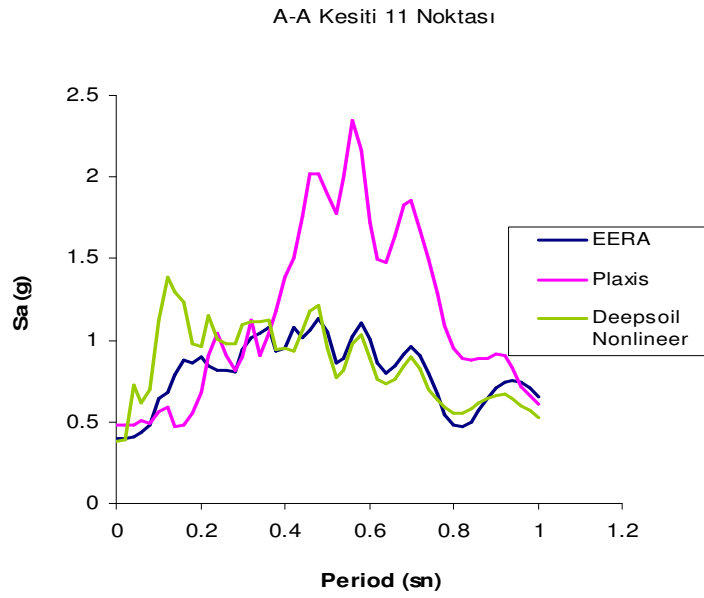
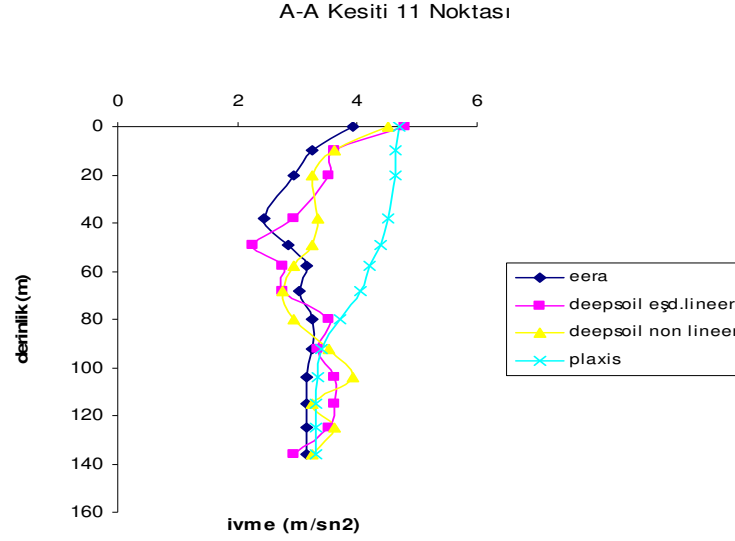
Şekil 7.11 A-A' Kesiti 8 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



Şekil 7.12 A-A' Kesiti 9 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

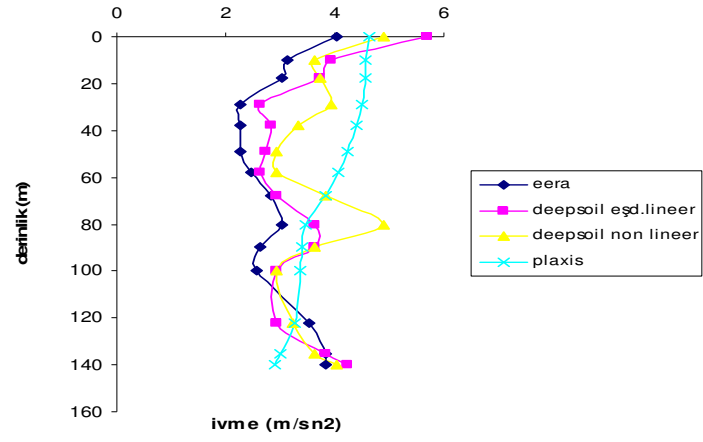


Şekil 7.13 A-A' Kesiti 10 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

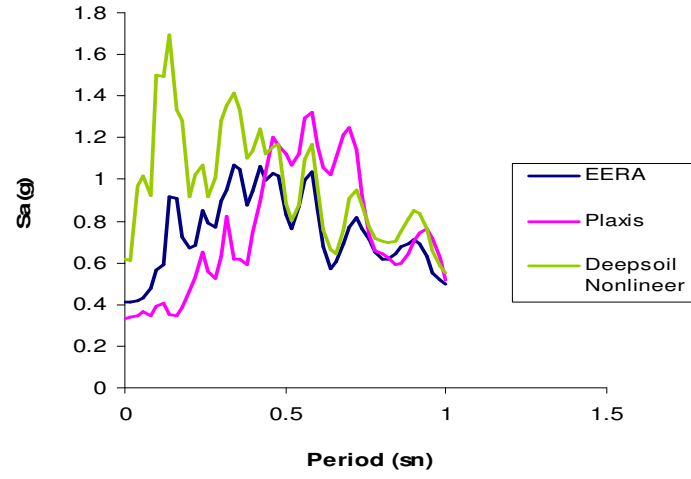


Şekil 7.14 A-A' Kesiti 11 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

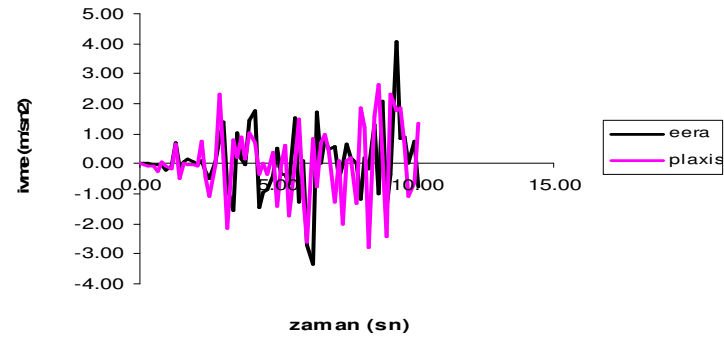
A-A Kesiti 12 Noktası



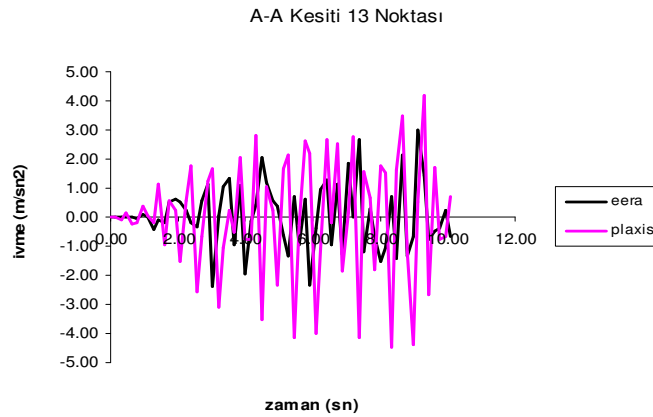
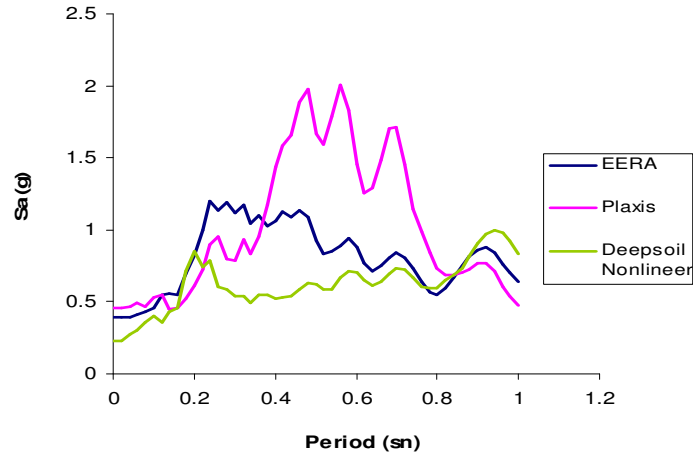
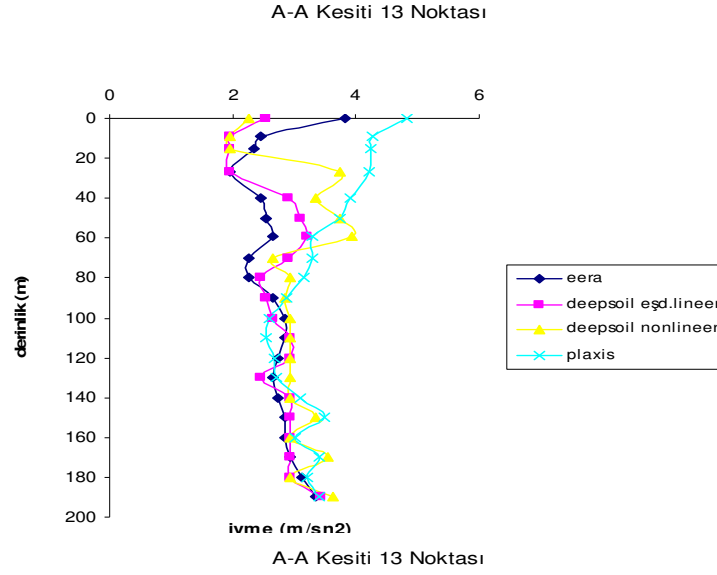
A-A Kesiti 12 Noktası



A-A Kesiti 12 Noktası



Şekil 7.15 A-A' kesiti 12 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



Şekil 7.16 A-A' Kesiti 13 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

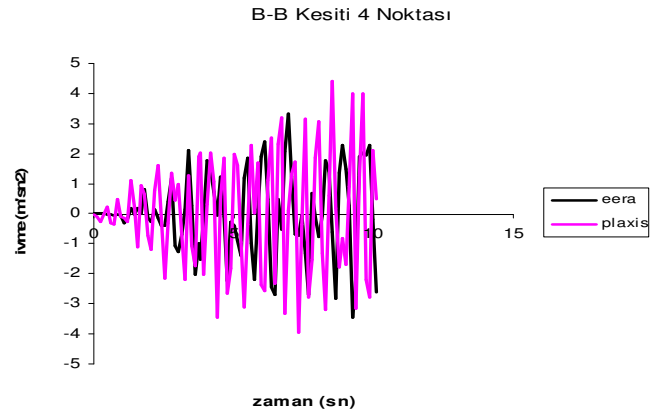
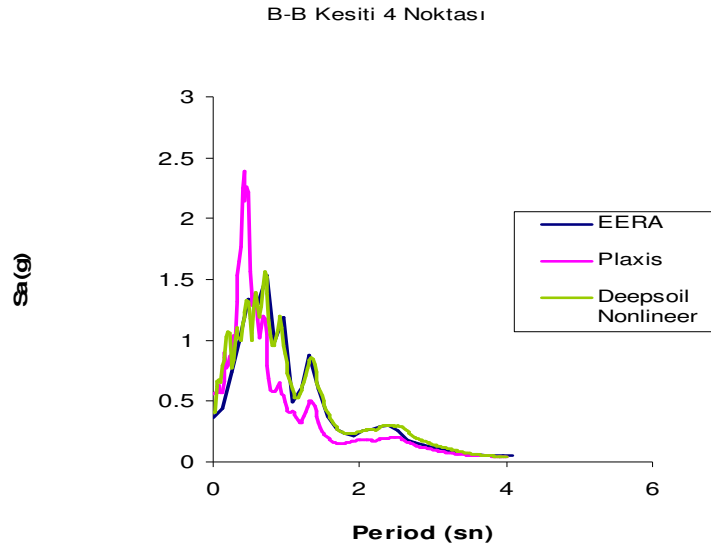
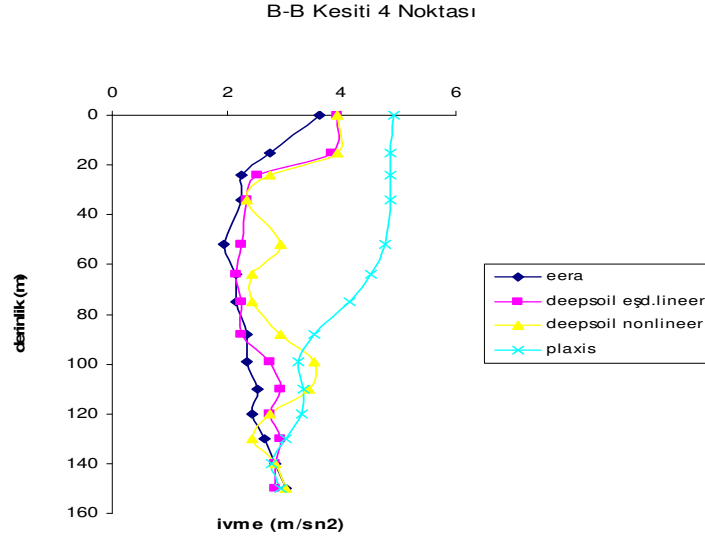
B-B' kesiti üzerinde yeralan noktalar için hesaplanan derinlik-ivme değişimi ile zemin yüzü ivme-zaman değişimi ve ivme spektrumlarının karşılaştırılması Şekil 7.17 ile Şekil 7.26 arasında verilmiştir.

İncelenen ikinci kesit olan B-B' kesiti üzerindeki 4 ve 6 noktaları batı-doğu doğru eğimli bir yamaç eteği üzerinde yer almaktadır. Bakırköy formasyonunun yüzeylendiği hafif eğimli yamaçtaki bu noktalar için hesaplanan maksimum yüzey ivmeleri (Şekil 7.17 ve 7.18) incelendiğinde, yamaç topuğundaki 6 noktasında bir ve iki boyutlu analiz sonuçlarının birbirine yakın olduğu (ivme spektrumlarının da benzer olduğu) ancak yamaç üzerindeki 4 noktasında iki boyutlu analizlerden elde edilen değerin bir boyutlu analiz sonuçlarına göre daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Her iki noktada da yüzeyden 80-100 m derinliklere kadar iki boyutlu analizle hesaplanan maksimum ivme değerlerinin tek boyutlu analiz sonuçlarından büyük olduğu, tek boyutlu analiz sonuçlarının ise derinlik boyunca birbirine yakın olduğu görülmektedir.

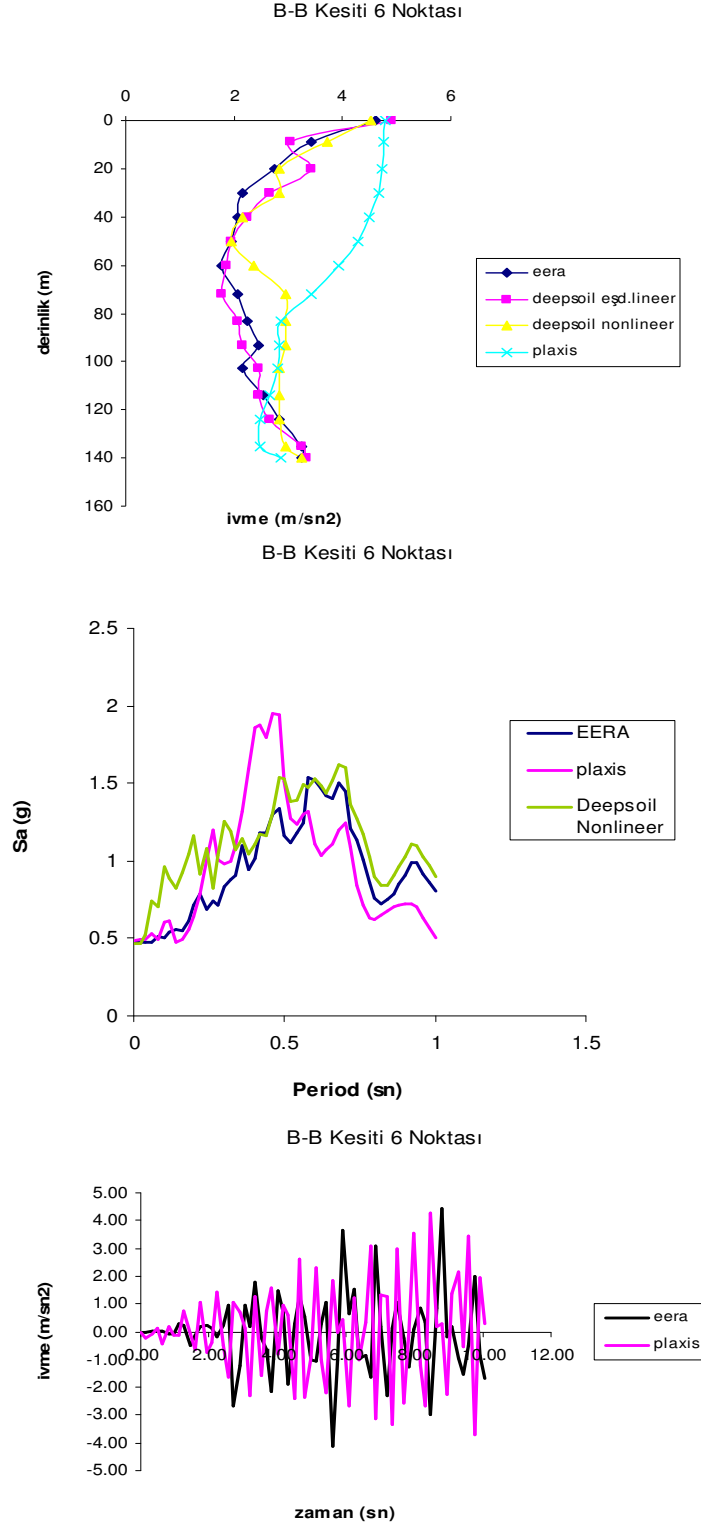
B-B' kesitindeki dolgu ile kaplı bir düzlükte yeralan 8 noktası için bir ve iki boyutlu analizlerle hesaplanan maksimum yüzey ivmesi ve ivme spektrumlarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmektedir (Şekil 7.19). Derinlik boyunca tek boyutlu analiz sonuçları birbirine yakın değerler verirken, iki boyutlu analizlerde 60-70 m derinliğe kadar daha büyük, daha derinlerde ise daha küçük değerler elde edilmiştir.

B-B' kesitindeki 9, 10 ve 11 noktaları hafif bir eğimle yükselen bir yamaç üzerinde yer almaktadır. 9 noktası yamaç topuğunda dolgu ile kaplı bir alanda, 10 ve 11 noktaları Bakırköy formasyonunun yüzeylendiği yamaç üzerinde bulunmaktadır. Bu noktalar için bir ve iki boyutlu analiz sonuçları karşılaştırıldığında, yamaç topuğundaki 9 noktasında (Şekil 7.20) maksimum yüzey ivmeleri birbirine yakın olmakla birlikte ivme spektrumlarının oldukça farklı olduğu, 10 ve 11 noktalarında ise (Şekil 7.21 ve 7.22) hesaplanan davranışın birbirine daha yakın olduğu gözlenmektedir.

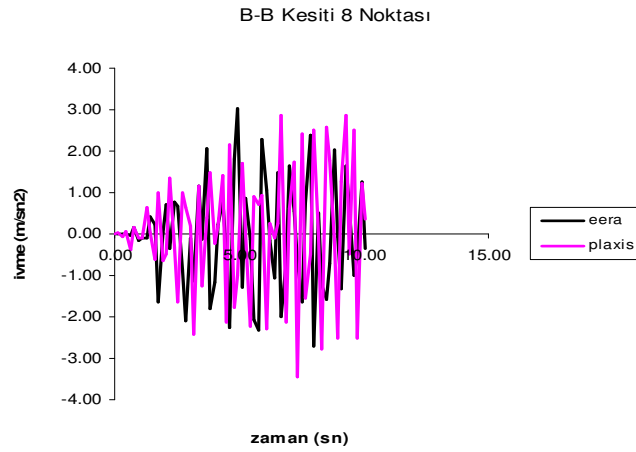
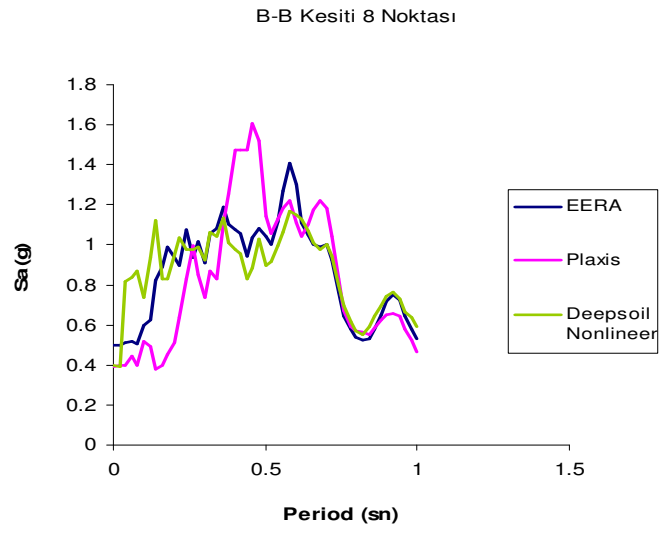
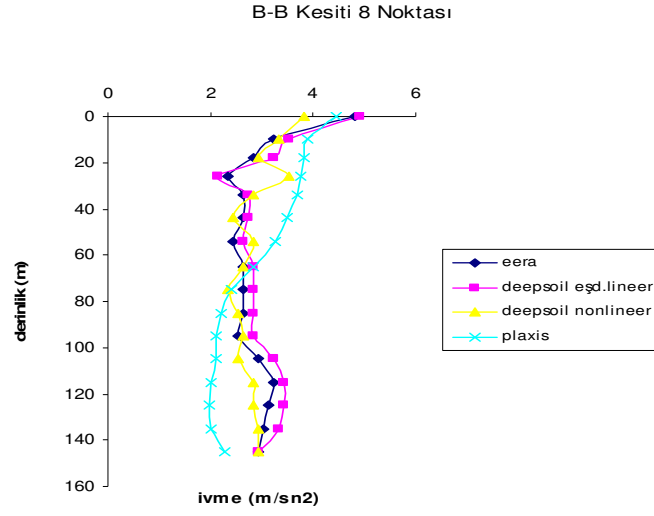
B-B' kesitindeki 12,13,14 ve 16 noktaları Bakırköy formasyonunun yüzeylendiği bir tepe düzlüğünde yer almaktadır. Bu noktalar için elde edilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında (Şekil 7.23, 7.24, 7.25 ve 7.26) bir boyutlu analiz sonuçlarının birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. İki boyutlu analiz sonucu elde edilen maksimum ivmeler yüzeyde bir boyutlu analiz sonuçlarına yakın veya daha küçük iken, 10 m ile 60-80 m arasında derinliklerde daha büyük, daha derinlerde ise birbirine çok yakın değerler almaktadır.



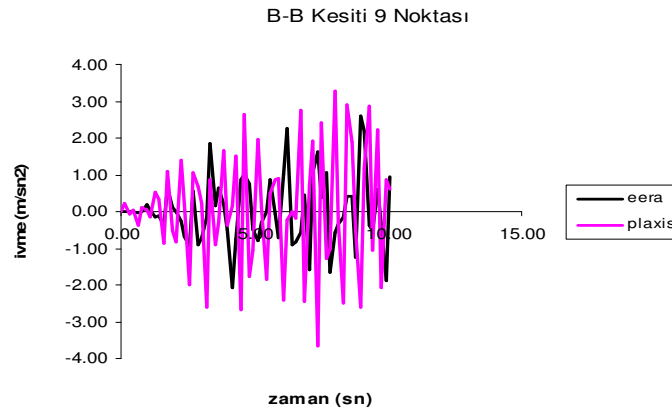
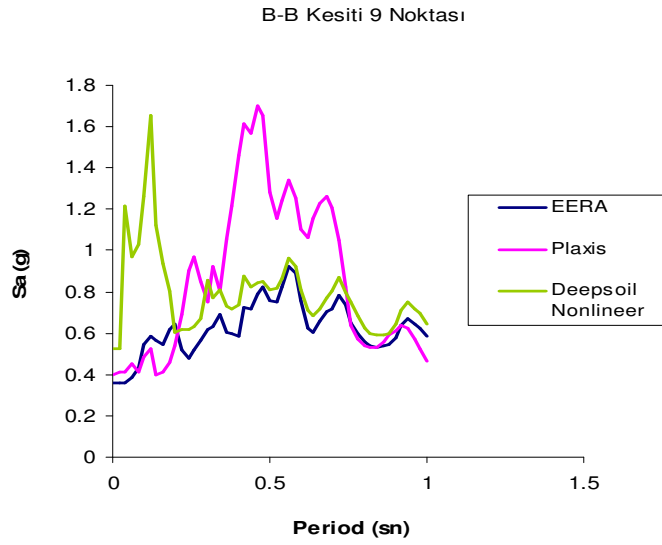
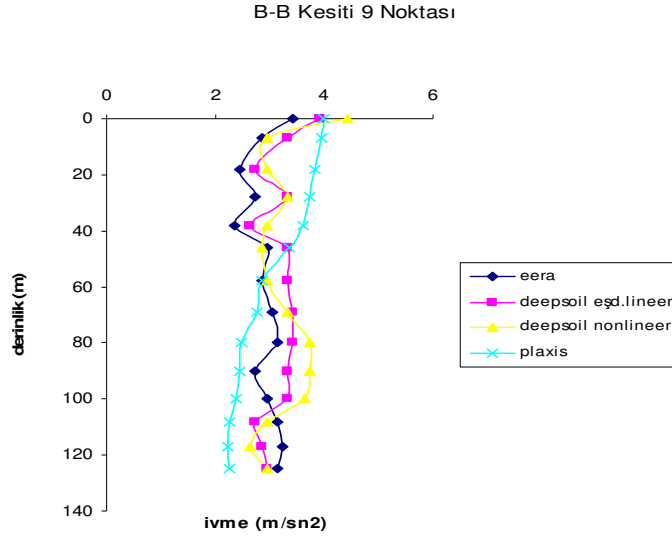
Şekil 7.17 B-B' Kesiti 4 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



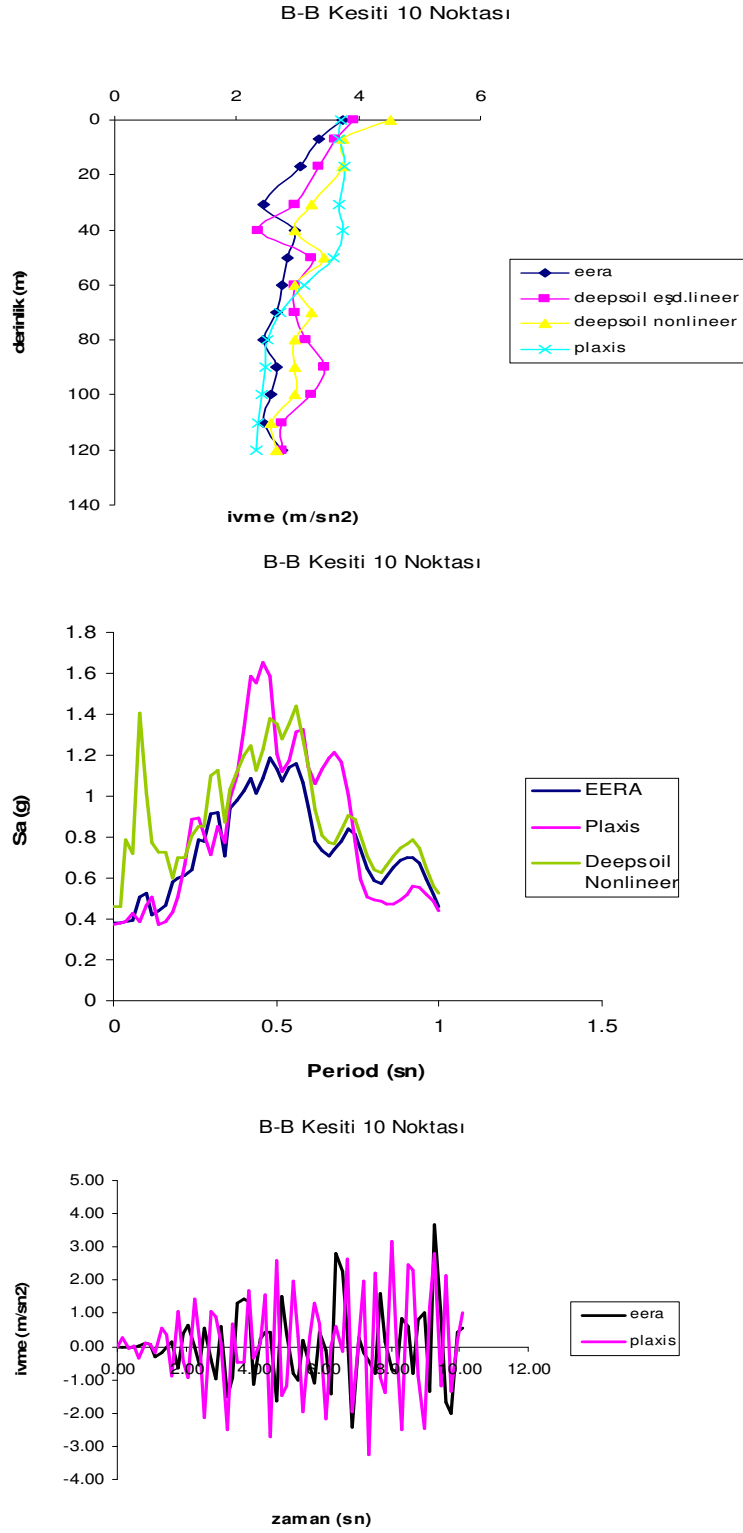
Şekil 7.18 B-B' Kesiti 6 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



Şekil 7.19 B-B' Kesiti 8 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

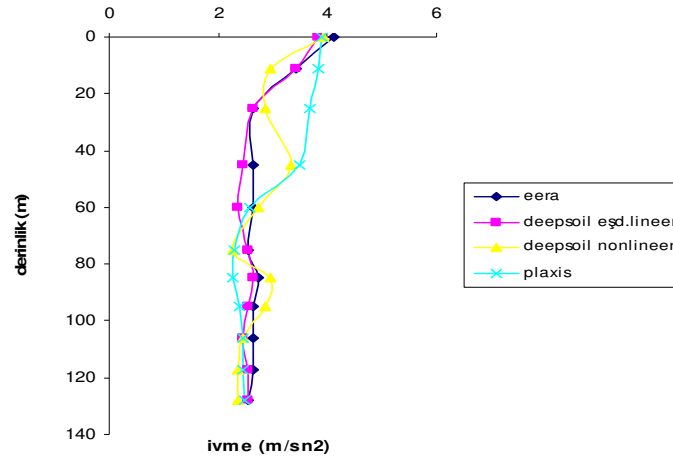


Şekil 7.20 B-B' Kesiti 9 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

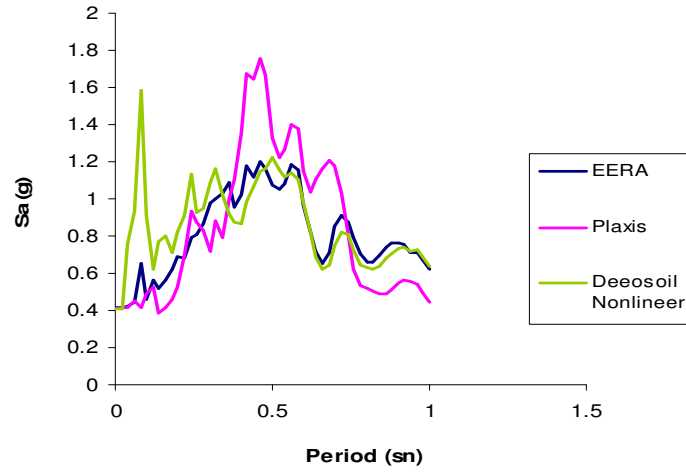


Şekil 7.21 B-B' Kesiti 10 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

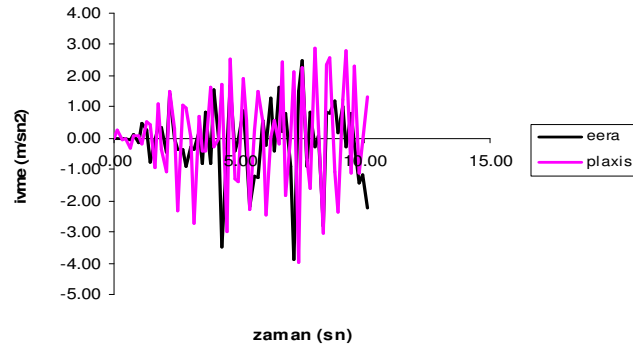
B-B Kesiti 11 Noktası



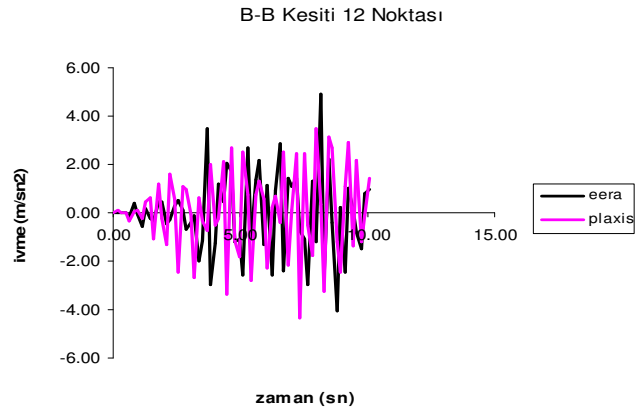
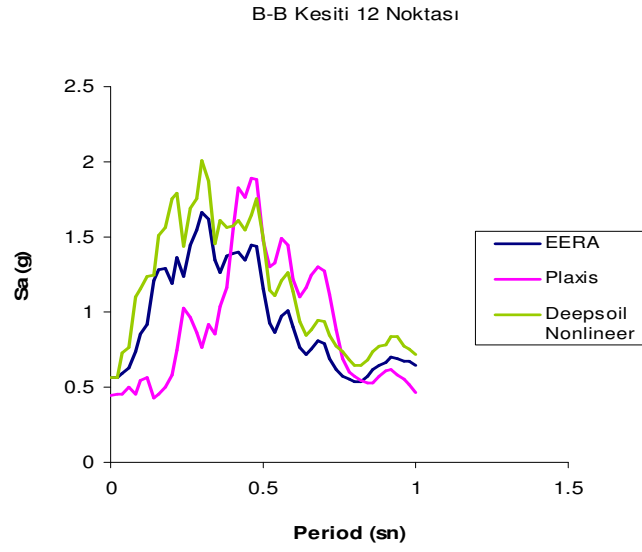
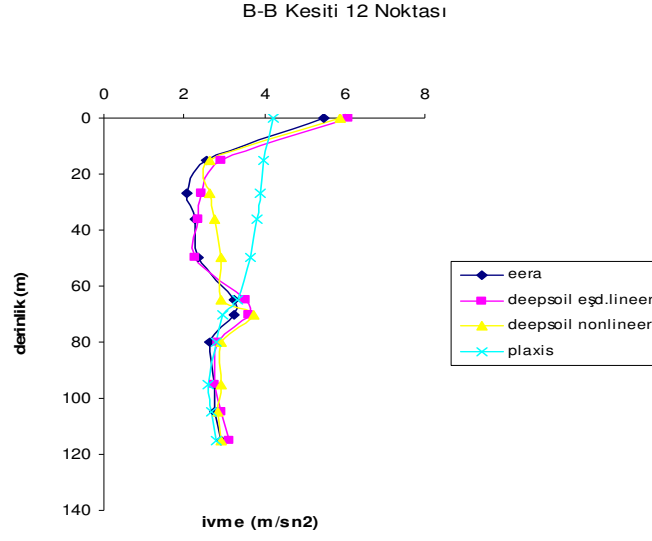
B-B Kesiti 11 Noktası



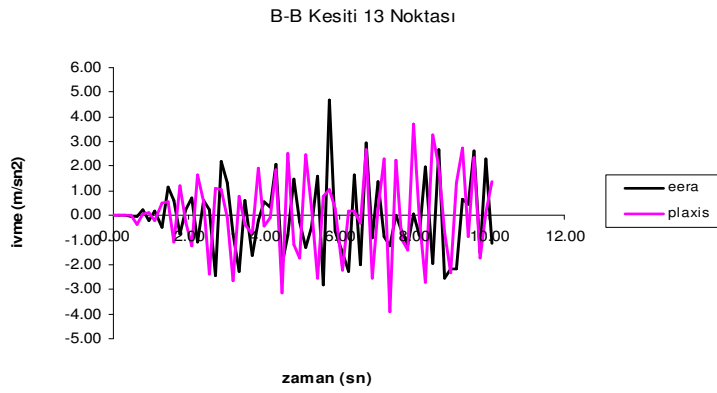
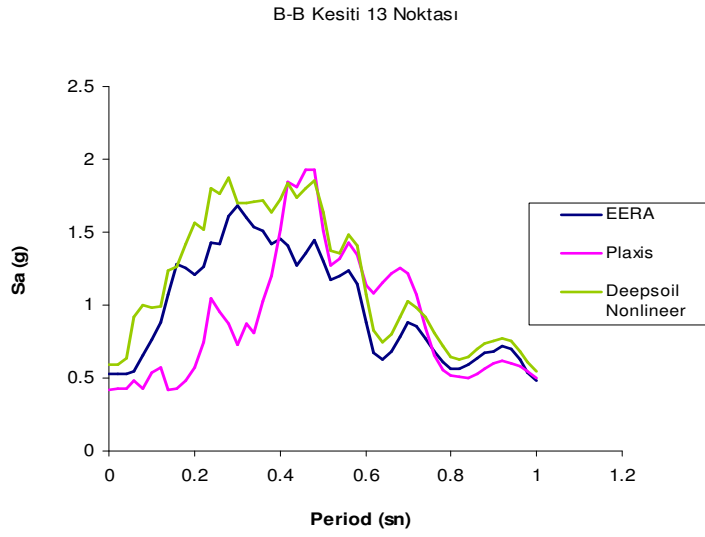
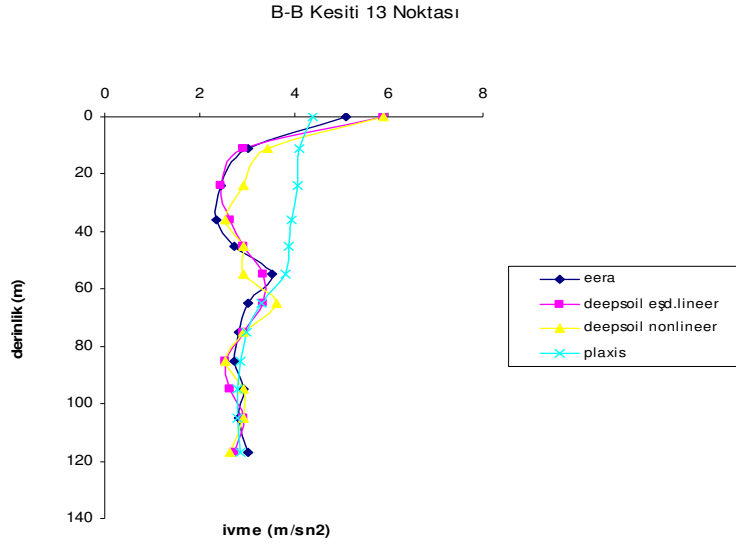
B-B Kesiti 11 Noktası



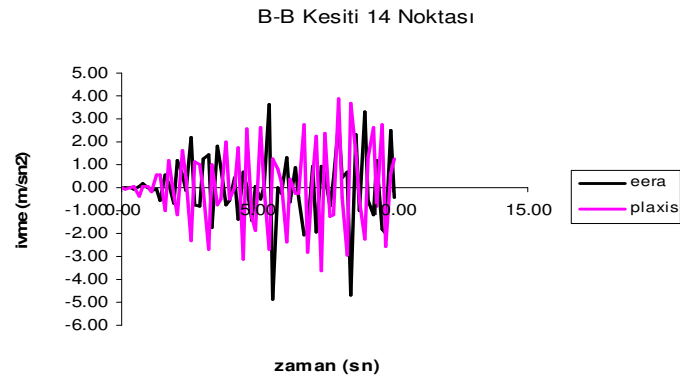
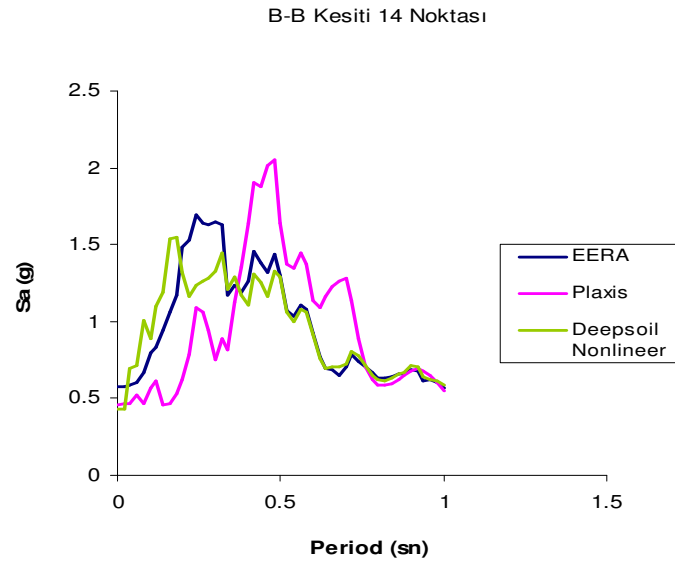
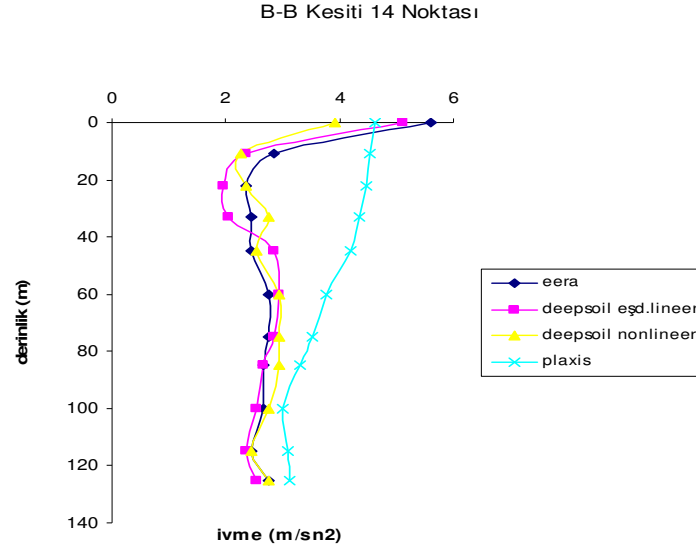
Şekil 7.22 B-B' Kesiti 11 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



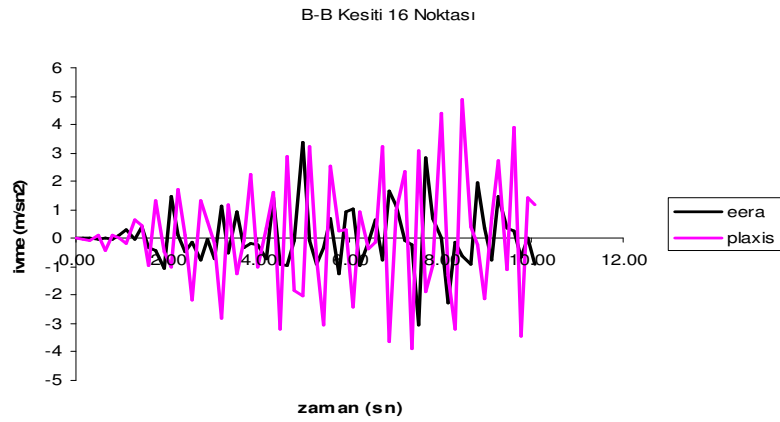
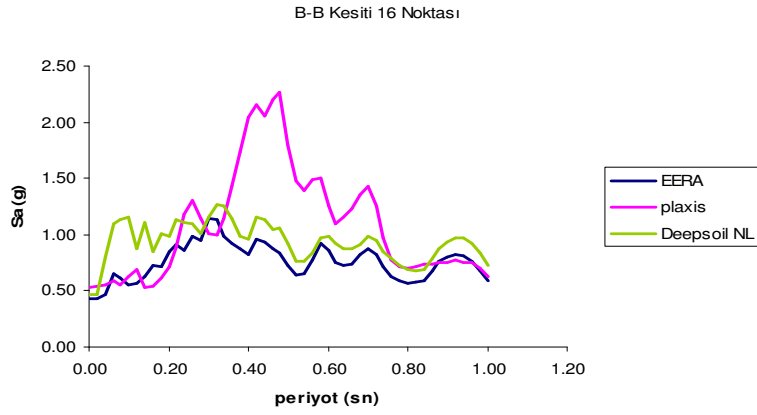
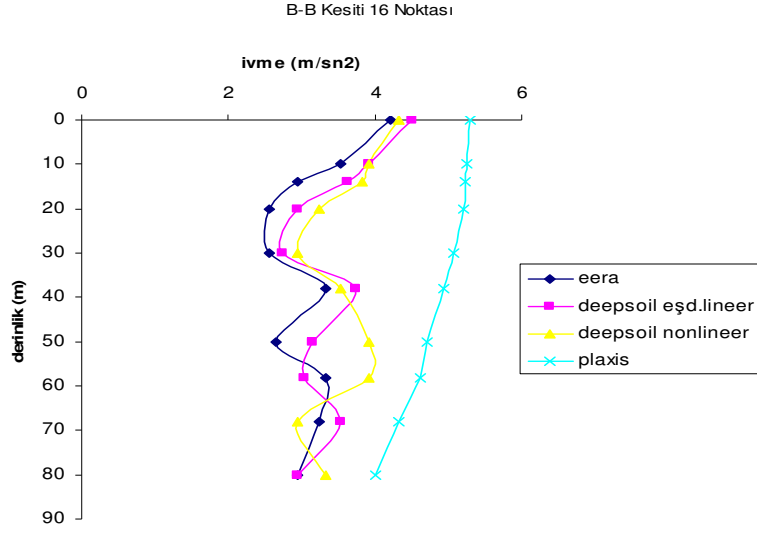
Şekil 7.23 B-B' Kesiti 12 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



Şekil 7.24 B-B' Kesiti 13 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



Şekil 7.25 B-B' Kesiti 14 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



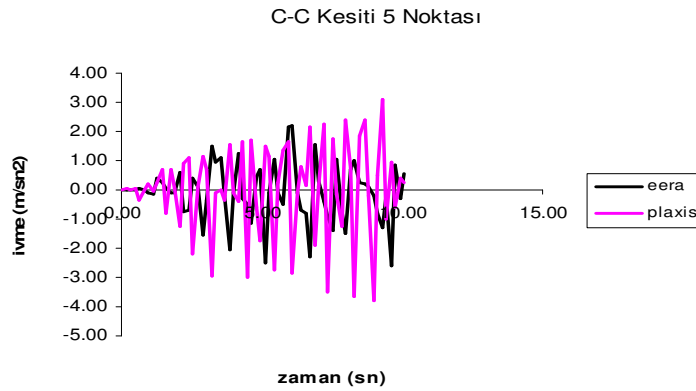
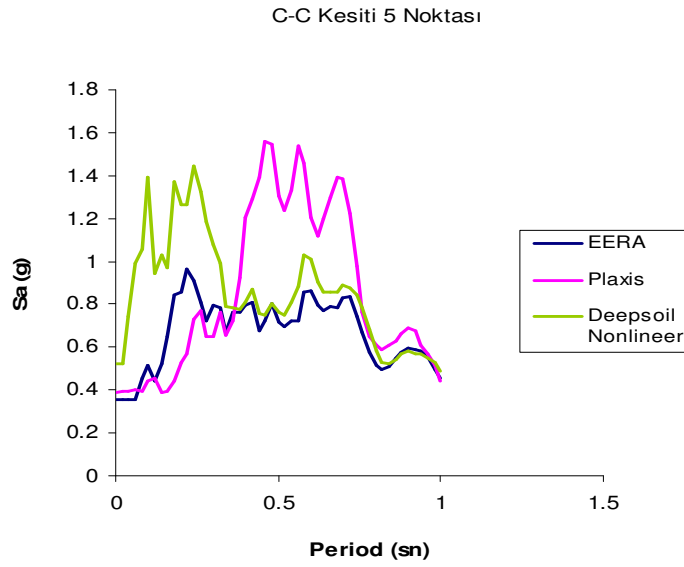
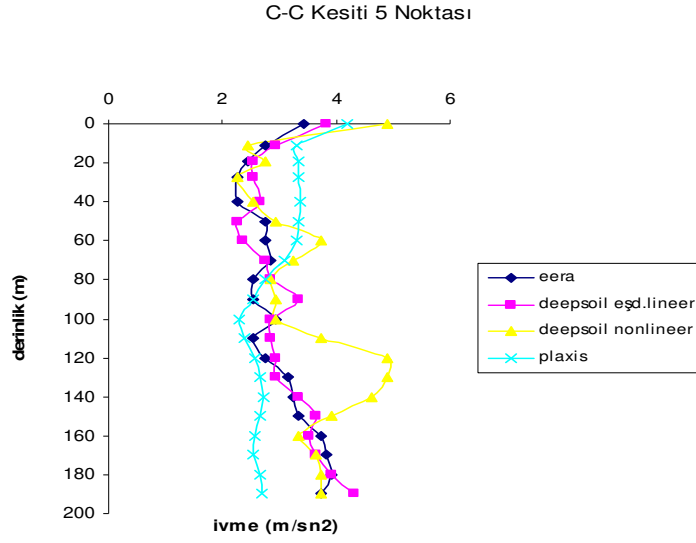
Şekil 7.26 B-B' Kesiti 16 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

C-C' kesitinde yeralan noktalar için hesaplanan ivme-derinlik ile zemin yüzü ivme-zaman değişimi ve ivme spektrumları Şekil 7.27 ile Şekil 7.34 arasında gösterilmiştir.

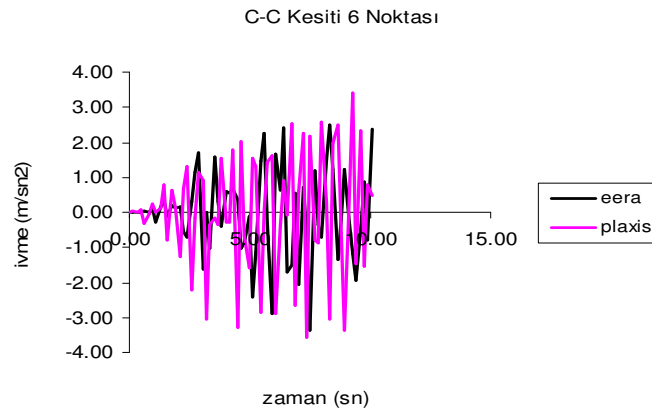
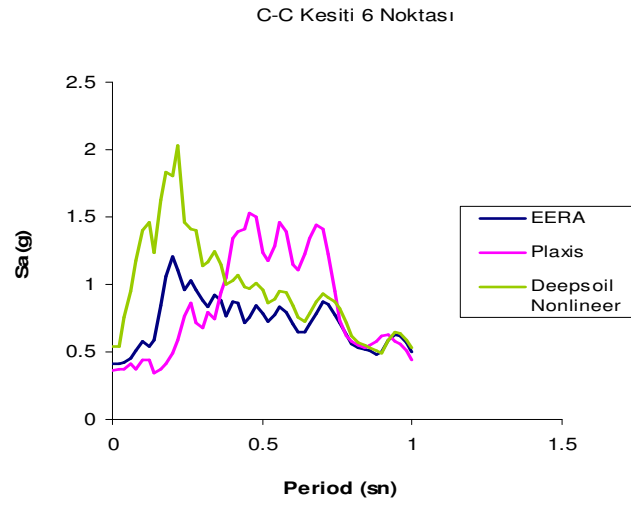
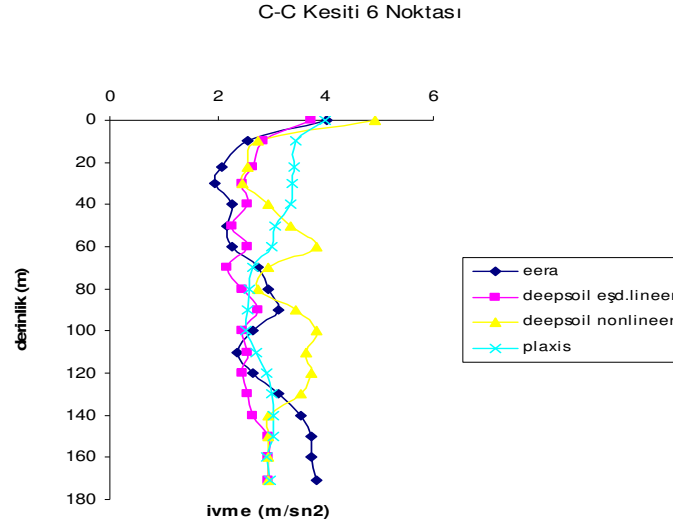
İncelenen üçüncü kesit olan C-C' kesiti güneyden kuzeye doğru hafif bir eğimle yükselen ve ara düzlükler içeren bir yamaç ve Bakırköy formasyonunun yüzeyletiği kesimde yer almaktadır. Hesap sonuçları sunuları 5 ve 6 noktaları güneyde Marmara Denizi sahiline yakın yamaç eteğinde yer almaktadır. Şekil 7.27 ve 7.28'de gösterilen hesap sonuçları bir ve iki boyutlu analizler sonucu elde edilen maksimum ivme değerlerinin birbirine oldukça yakın olmasına karşın, ivme spektrumları arasında önemli farklılıklar olduğu gözlenmektedir.

C-C' kesiti üzerindeki 10, 11 ve 12 noktaları yamaç üzerindeki bir ara düzlükte (taraçada) yer almaktadır. Şekil 7.29, 7.30 ve 7.31'de gösterilen analiz sonuçları incelendiğinde, bu noktalar için bir boyutlu analizlerle hesaplanan maksimum yüzey ivme değerleri ve derinlikle değişimlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. İki boyutlu analiz sonucu hesaplanan maksimum ivme değerleri yüzeyde bir boyutlu analizlerle hesaplanan değerlerden daha küçük veya daha büyük olabilirken, iki boyutlu analiz sonuçlarının yüzeyden 80-100 m derinliklere kadar daha büyük değerler verdiği, daha derinlerde ise bir ve iki boyutlu analiz sonuçlarının birbirine yaklaştığı gözlenmektedir. Bir ve iki boyutlu analizlerle hesaplanan yüzey ivme spektrumları arasında da önemli farklılıklar göze çarpmaktadır.

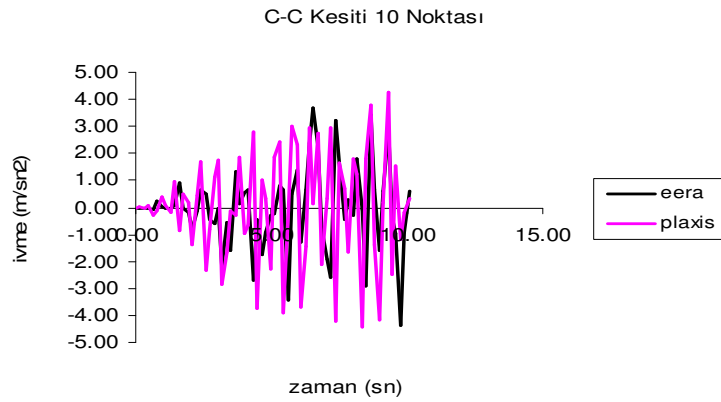
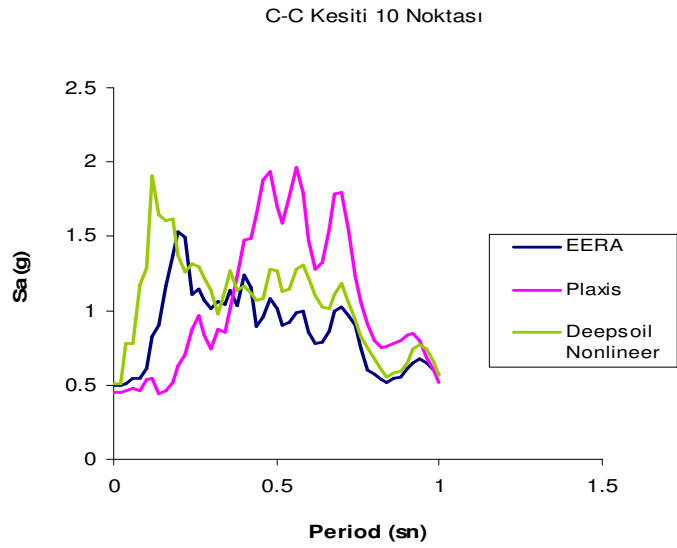
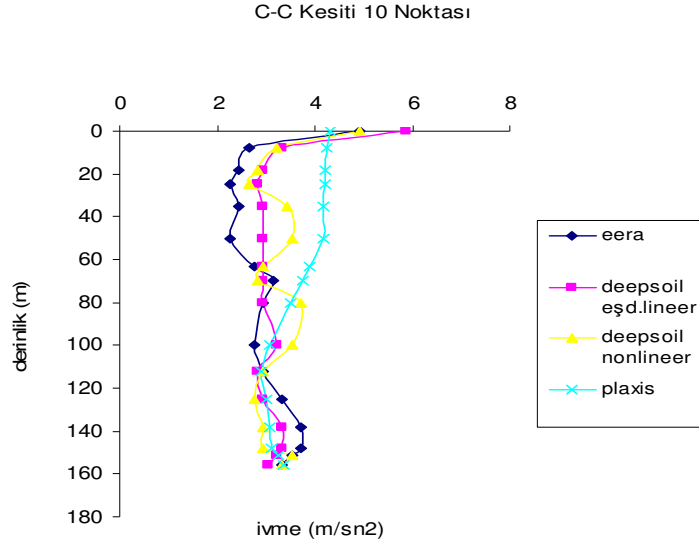
C-C' kesitinin yamaç üstünde yüksek kotlarda yeralan 16, 18 ve 23 noktaları hesap sonuçları Şekil 7.32, 7.33 ve 7.34'de gösterilmiştir. Bir ve iki boyutlu analizlerle hesaplanan maksimum yüzey ivmesi değerleri birbirine oldukça yakın iken özellikle 16 noktasında derinlikle değişen maksimum ivme değerlerinin ve yüzey ivme spektrumunun iki boyutlu analizde bir boyutlu analiz sonuçlarından daha büyük değerler verdiği, 60-80 m derinliklerden sonra farklılıkların azaldığı gözlenmektedir.



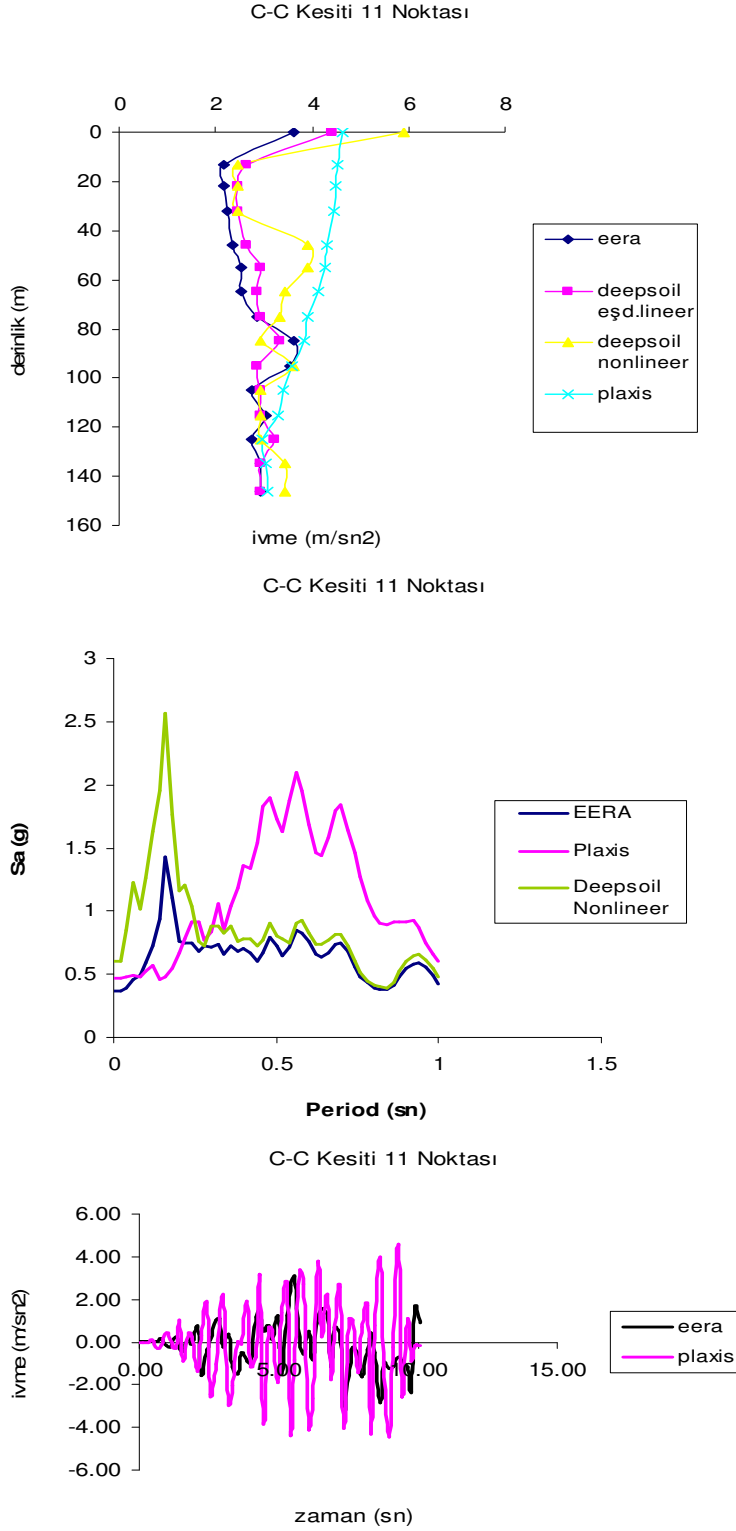
Şekil 7.27 C-C' Kesiti 5 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



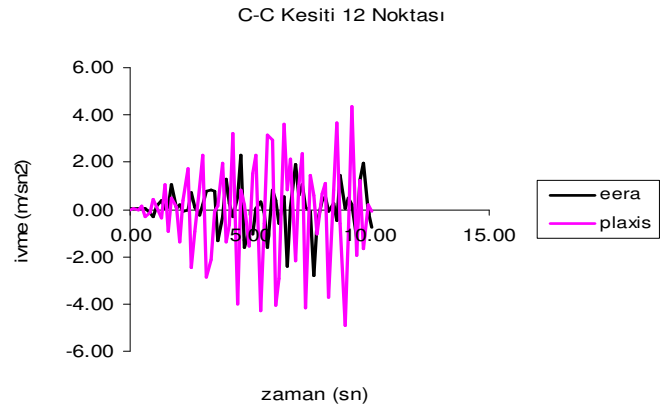
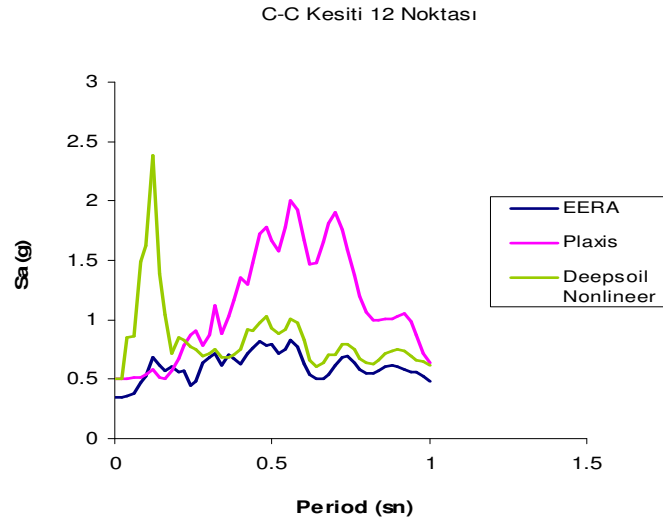
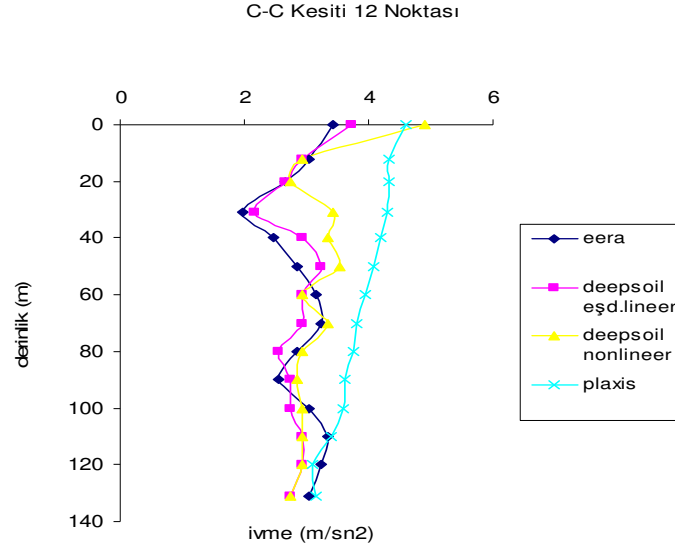
Şekil 7.28 C-C' Kesiti 6 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



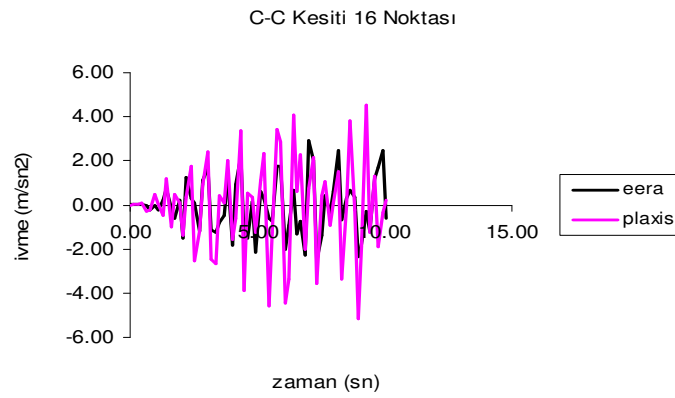
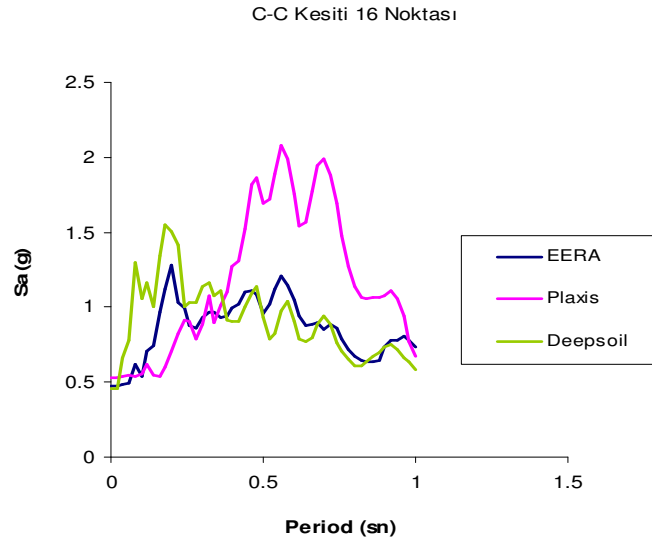
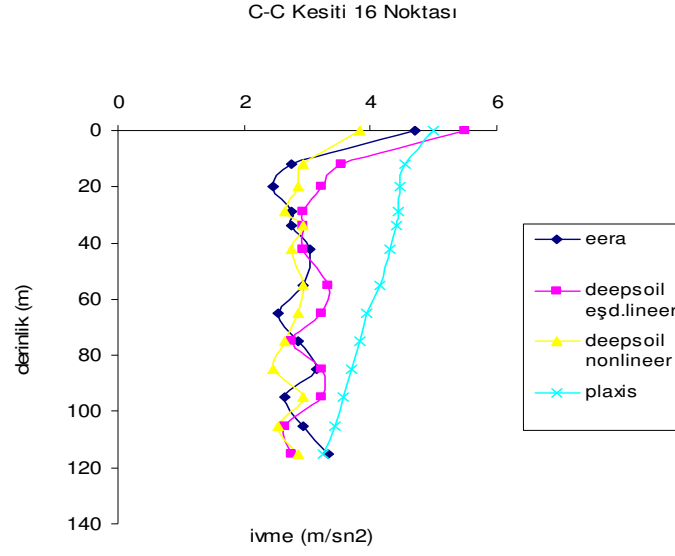
Şekil 7.29 C-C' Kesiti 10 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



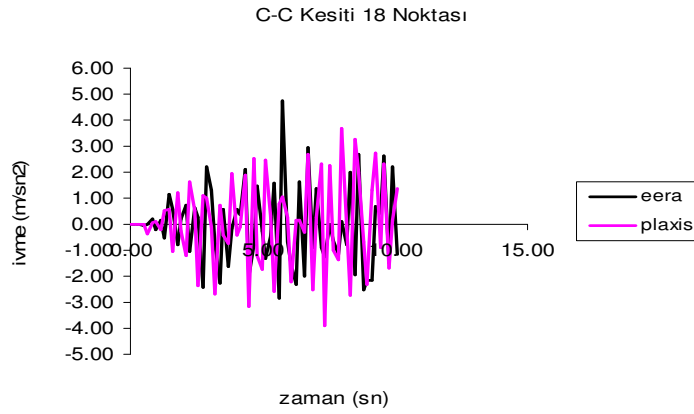
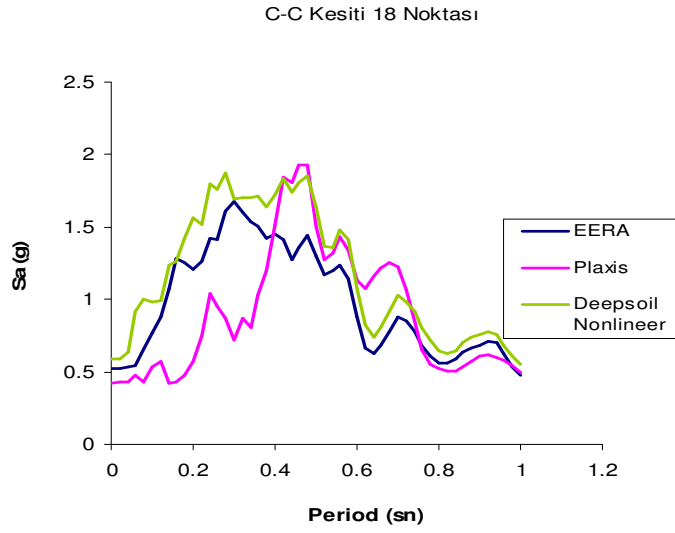
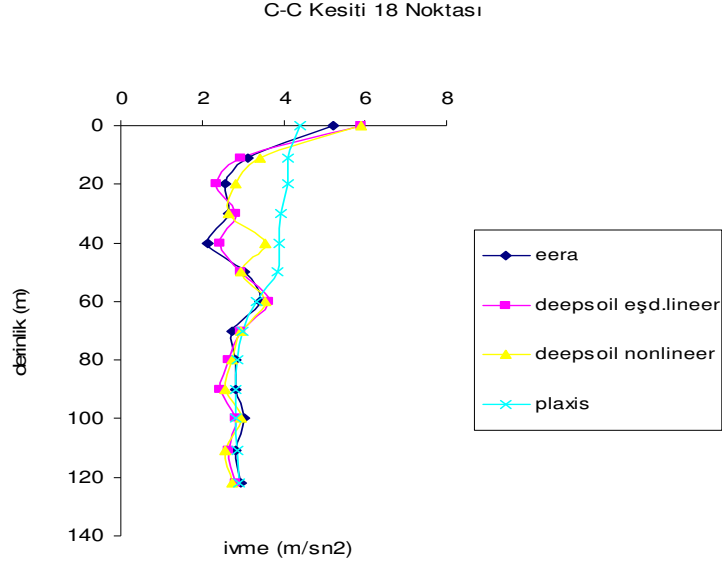
Şekil 7.30 C-C' Kesiti 11 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



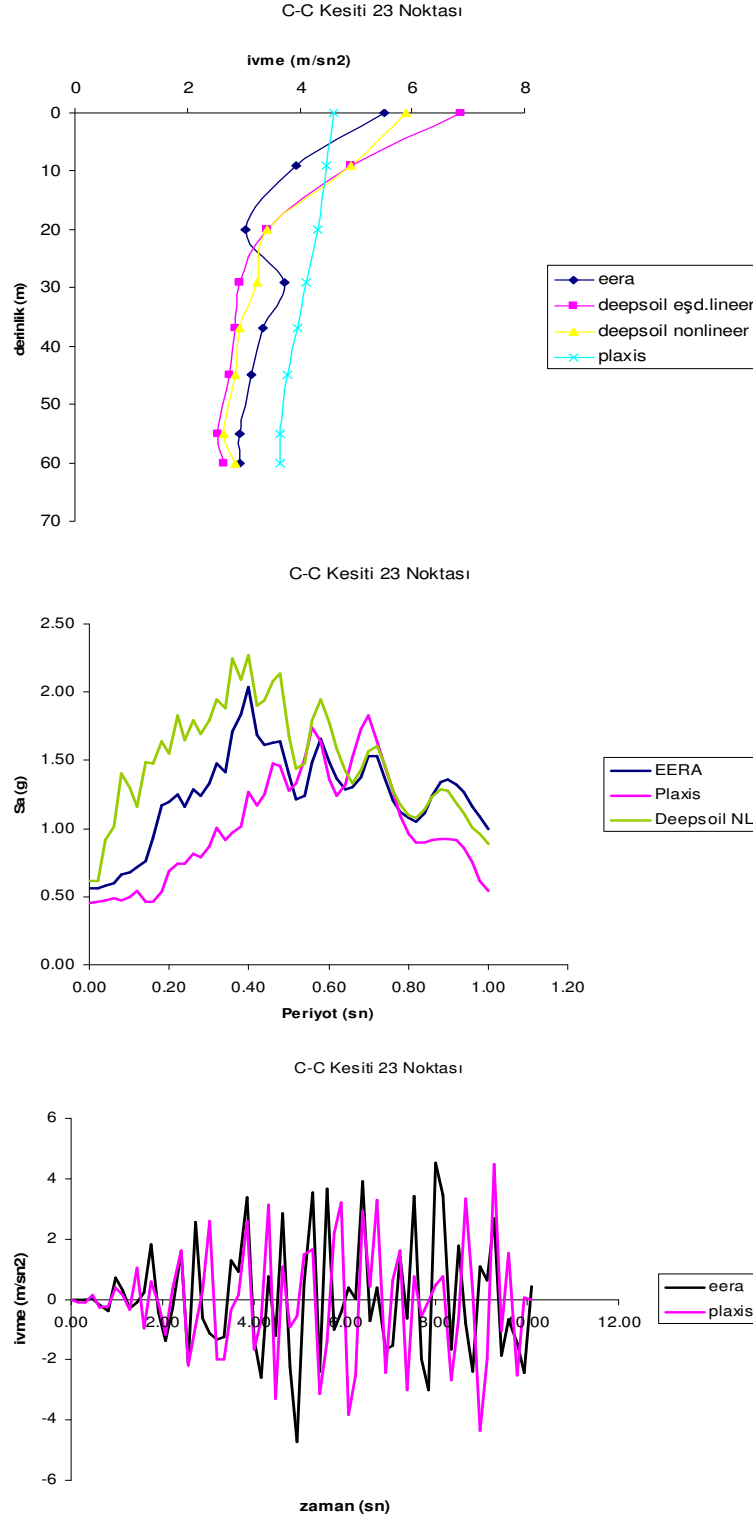
Şekil 7.31 C-C' Kesiti 12 Noktası için belirlenen analiz sonuçları



Şekil 7.32 C-C' Kesiti 16 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

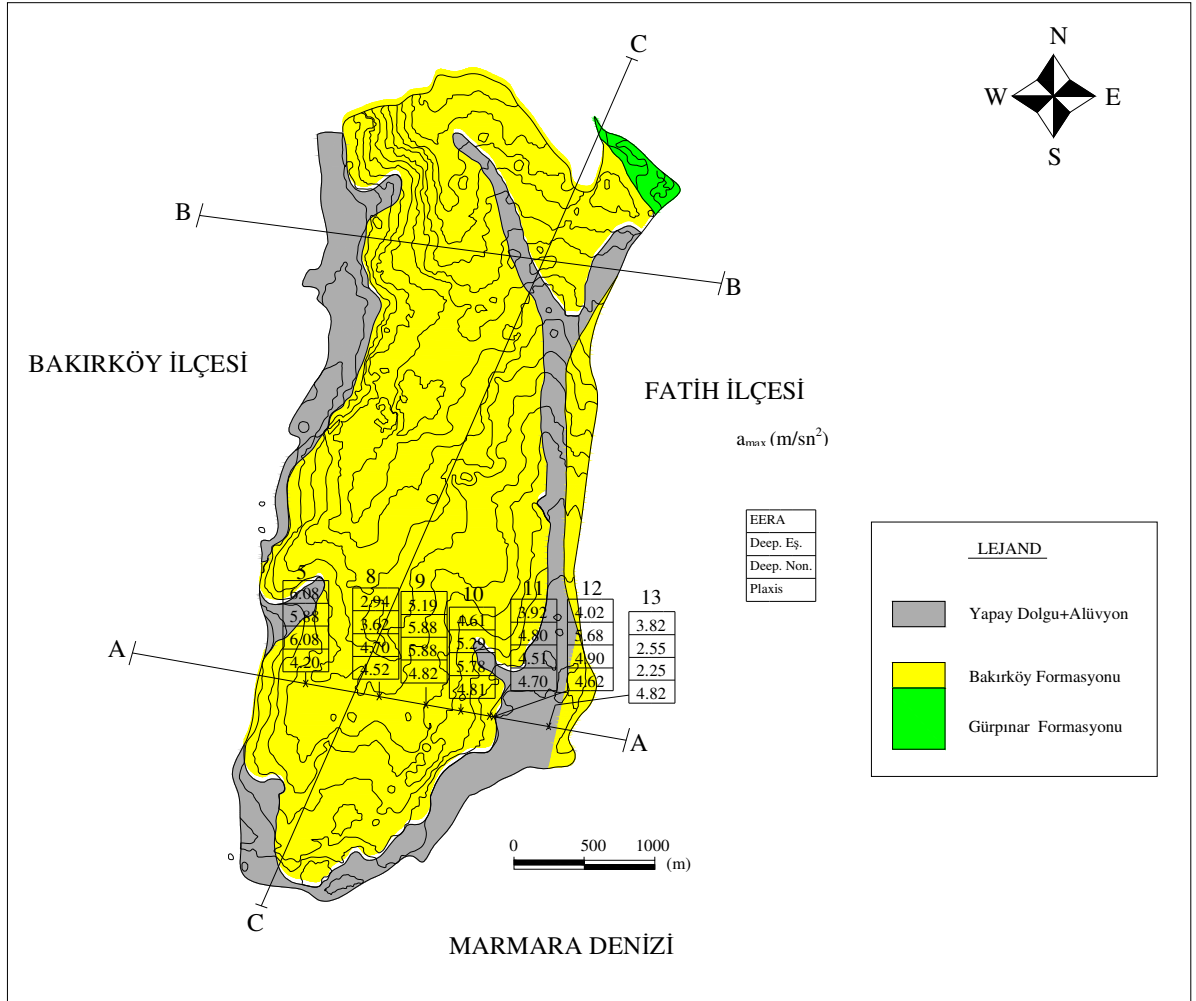


Şekil 7.33 C-C' Kesiti 18 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

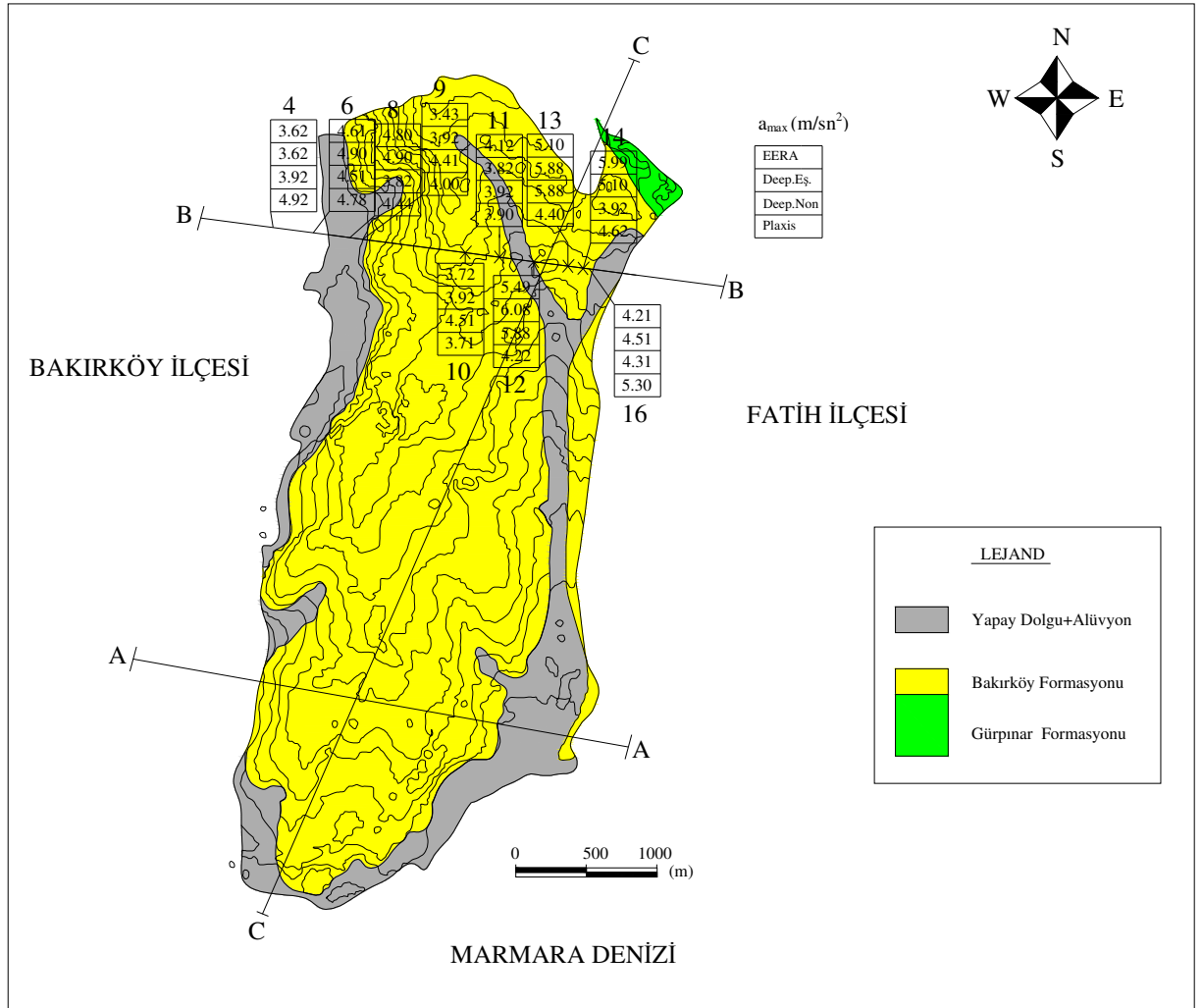


Şekil 7.34 C-C' Kesiti 23 Noktası için belirlenen analiz sonuçları

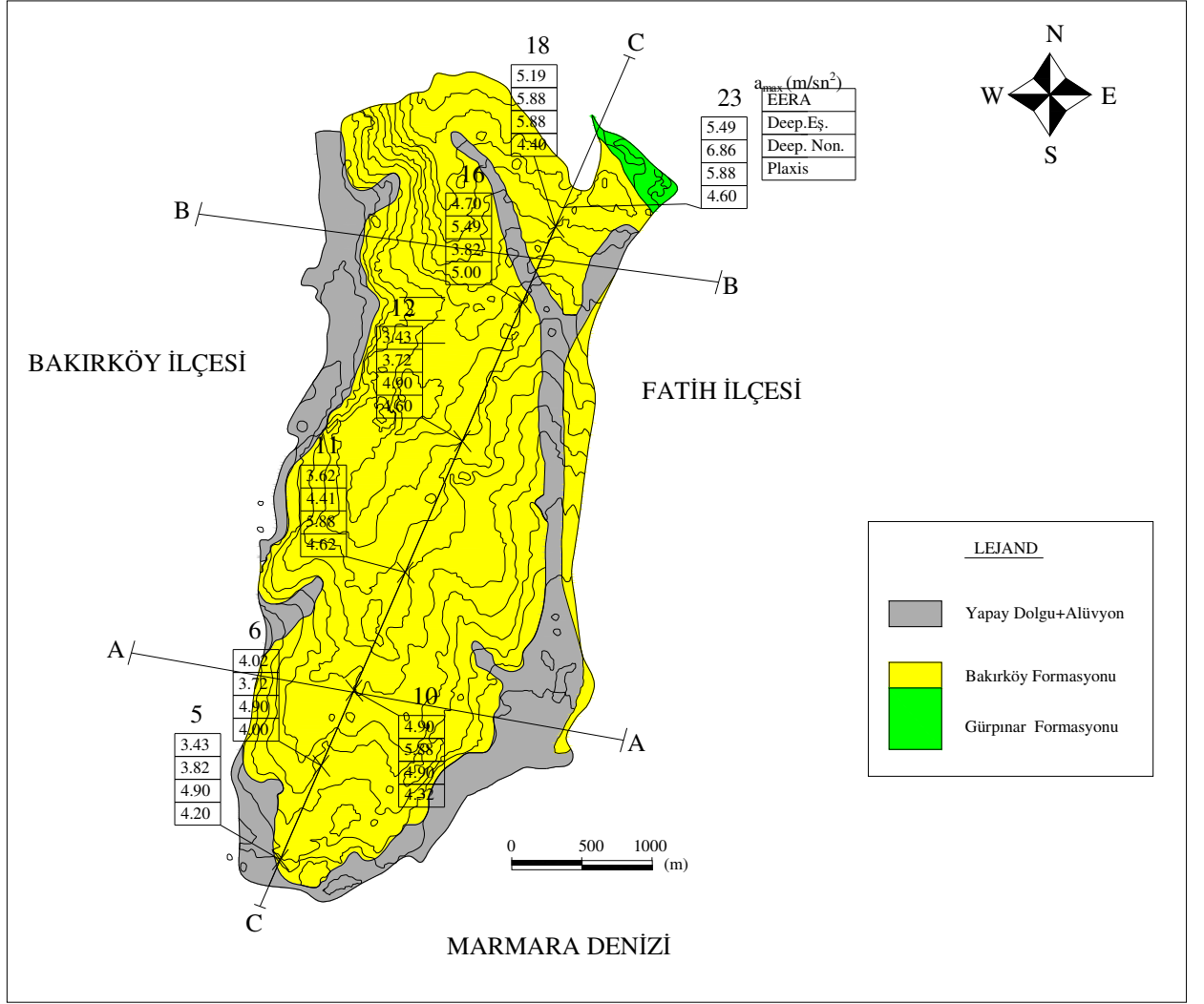
Analiz yapılan noktalarda elde edilen maksimum yüzey ivmeleri inceleme alanının mühendislik jeolojisi haritası üzerinde üç kesit için ayrı ayrı Şekil 7.35-7.37’de gösterilmiştir. Bu değerler her üç kesit içinde Çizelge 7.4-7.6’da özetlenmiştir.



Şekil 7.35 A-A’ kesiti mühendislik jeolojisi haritası üzerinde maksimum yüzey ivmelerinin gösterimi



Şekil 7.36 B-B' kesiti mühendislik jeolojisi haritası üzerinde maksimum yüzey ivmelerinin gösterimi



Şekil 7.37 C-C' kesiti mühendislik jeolojisi haritası üzerinde maksimum yüzey ivmelerinin gösterimi

Çizelge 7.4 A-A' Kesiti için elde edilen maksimum yüzey ivmeleri (m/sn^2)

NOKTA	4	5	8	9	10	11	12	13
EERA	3.23	6.08	2.94	5.19	4.61	3.92	4.02	3.82
Deepsoil Eşdeğer Lineer	4.51	5.88	3.62	5.88	5.29	4.80	5.68	2.55
Deepsoil Nonlineer	3.92	6.08	4.70	5.88	5.78	4.51	4.90	2.25
Plaxis	5.20	4.20	4.52	4.82	4.81	4.70	4.62	4.82

Çizelge 7.5 B-B' Kesiti için elde edilen maksimum yüzey ivmeleri (m/sn^2)

NOKTA	4	6	8	9	10	11	12	13	14	16
EERA	3.62	4.61	4.80	3.43	3.72	4.12	5.49	5.10	5.59	4.21
Deepsoil Eşdeğer Lineer	3.62	4.90	4.90	3.92	3.92	3.82	6.08	5.88	5.10	4.51
Deepsoil Nonlineer	3.92	4.51	3.82	4.41	4.51	3.92	5.88	5.88	3.92	4.31
Plaxis	4.92	4.78	4.44	4.00	3.71	3.90	4.22	4.40	4.62	5.30

Çizelge 7.6 C-C' Kesiti için elde edilen maksimum yüzey ivmeleri (m/sn^2)

NOKTA	5	6	10	11	12	16	18	23
EERA	3.43	4.02	4.90	3.62	3.43	4.70	5.19	5.49
Deepsoil Eşdeğer Lineer	3.82	3.72	5.88	4.41	3.72	5.49	5.88	6.86
Deepsoil Nonlineer	4.90	4.90	4.90	5.88	4.90	3.82	5.88	5.88
Plaxis	4.20	4.00	4.32	4.62	4.60	5.00	4.40	4.60

8. SONUÇLAR

Zeytinburnu İlçesi'nde Batı-Doğu doğrultusunda iki adet ($A-A'$ ve $B-B'$) enkesit ve Güneydoğu-Kuzeybatı doğrultusunda bir adet ($C-C'$) enkesit üzerinde bir ve iki boyutlu tepki analizleri yapılmıştır. Böylece depremler sırasında topografik konumun ve yerel zemin koşullarının zemin yüzü yer hareketi üzerindeki etkisi bir ve iki boyutlu dinamik davranış analizleri ile incelenerek, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bir boyutlu analizler eşdeğer lineer analiz prensibine dayalı olarak çalışan EERA programı ve frekans alanında lineer ve eşdeğer lineer, zaman alanında ise lineer ve nonlineer çözümler yapabilen Deepsoil Programı, iki boyutlu dinamik analizler ise PLAXIS 8.5 programı ile yapılmıştır.

Bir boyutlu dinamik davranış analizleri, her bir kesit üzerinde arazi topoğrafyası ve formasyonlar göz önünde bulundurularak seçilen noktalarda yapılmıştır. Bu noktalarda, zemin profili, tabaka kalınlıkları, geoteknik ve dinamik malzeme parametreleri tanımlanarak anakaya seviyesinde bölgenin sismisitesine göre belirlenen sentetik deprem kaydı etkiltilerek, tek boyutlu dinamik davranış analizleri yapılmış ve yüzey ivmesi değerleri belirlenmiştir.

İki boyutlu dinamik davranış analizlerinde ise inceleme bölgesini temsil eden kesitler topografik ve geoteknik özellikleri göz önüne alınarak modellenmiş ve bir boyutlu analizlerde kullanılan sentetik deprem kayıtlarını temsilen seçilen bir kayıt anakaya seviyesinde uygulanarak, dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kesitler üzerinde arazi topoğrafyası ve formasyonlar gözönünde bulundurularak ve bir boyutlu analizlerde incelenen noktalar ile çakışacak şekilde seçilen noktalarda maksimum yüzey ivme değerleri, ivme spektrumları ve derinlik – ivme değişimleri belirlenmiştir.

İncelenen üç kesit üzerinde seçilen noktalar için bir ve iki boyutlu analizler sonucu maksimum yüzey ivmeleri ve spektral ivmelerin topoğrafyaya göre değişimi belirlenmiştir. Analiz sonuçlarının toplu olarak değerlendirilmesi ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

En Büyük Yüzey İvmelerinin Karşılaştırılması

Bir boyutlu analiz yöntemleri ile hesaplanan maksimum yüzey ivmesi değerleri karşılaştırıldığında;

- (a) EERA ve Deepsoil eşdeğer lineer analiz yöntemleri ile hesaplanan değerlerin topoğrafyaya bağlı değişimi benzer şekilde yansıttığı,
- (b) EERA ile bulunan değerlerin Deepsoil eşdeğer lineer analiz ile bulunanlardan biraz daha küçük olduğu,

- (c) Deepsoil nonlinear analiz yöntemi ile hesaplanan değerlerin Deepsoil eşdeğer lineer hesap yöntemi ile elde edilen değerlere genel olarak yakın olmakla birlikte, topografik konumu ve zemin koşullarına bağlı olarak, biraz daha küçük olabildiği görülmektedir.

Bir boyutlu ve iki boyutlu analiz yöntemleri ile hesaplanan maksimum yüzey ivmesi değerleri karşılaştırıldığında;

- (a) İki boyutlu analiz sonuçları ile yüzey topoğrafyası arasında daha iyi bir uyum gözleendiği,
- (b) Bir boyutlu analizler sonucu hesaplanan değerlerin topoğrafik konumuna göre aşırı ve düzensiz değişkenlikler gösterebildiği,
- (c) İki boyutlu analiz sonucu elde edilen değerlerin, şev topuklarında bir boyutlu, analiz sonuçlarına göre daha büyük olduğu, ancak diğer noktalarda genellikle bir boyutlu analizlerle hesaplanan değerlerin alt sınırına yakın değerler aldığı görülmektedir.

Spektral İvmelerin Karşılaştırılması

Bir boyutlu analiz yöntemleri ile hesaplanan zemin yüzü deprem hareketinden elde edilen ivme spektrumları karşılaştırıldığında;

- (a) Deepsoil ile hesaplanan maksimum spektral ivmelerin EERA ile hesaplanan değerlerden genellikle daha büyük olduğu, Deepsoil nonlinear analiz ile elde edilen sonuçlarda bu farkın daha belirgin olduğu,
- (b) Deepsoil nonlinear ile hesaplanan maksimum spektral ivmelerin Deepsoil eşdeğer lineer ile hesaplanan değerlerden bir miktar daha büyük olduğu, özellikle yamaç eteklerinde ve topuklarında aradaki farkın daha belirgin olduğu

gözlenmektedir.

Bir boyutlu ve iki boyutlu analiz yöntemleri ile hesaplanan ivme spektrumları karşılaştırıldığında;

- (a) İki boyutlu analizler sonucu hesaplanan maksimum spektral ivme değerleri ile yüzey topoğrafyası arasında daha iyi bir uyum gözleendiği,
- (b) Genel olarak iki boyutlu analizlerde bir boyutlu eşdeğer lineer analizlerde elde edilen değerlerden daha büyük değerler hesaplandığı,
- (c) Bir boyutlu nonlinear analiz ile şev topuklarındaki noktalar için hesaplanan değerlerin iki boyutlu analiz ile elde edilen değerlerden büyük olabildiği görülmektedir.

Özet olarak, depremler sırasında yapılara etkiyecek kuvvetleri belirlemede önemli bir yer tutan maksimum yüzey ivmesi ve spektral ivme değerlerinin kestirimi için geliştirilen arazi tepki analizleri bir çok belirsizlikler içermektedir. Uygulamada sıkça kullanılan bir boyutlu eşdeğer lineer analiz yöntemi yatay tabakalardan oluşan düz sahalar için geliştirilmiş olup, eğimli bölgelerde özellikle şev etekleri ve topuğa yakın kesimlerde güvenli yönde olmayan sonuçlar verebilmektedir. Diğer taraftan, iki boyutlu analiz yöntemlerinin de tam açıklığa kavuşmamış yanları bulunmaktadır. Sınır koşullarının doğru tanımı ve sönüm katsayılarının sağlıklı belirlenmesi için ek araştırmalara gereksinim duyulmaktadır. Nümerik analiz sonuçlarının arazide gerçek depremlerde kaydedilmiş zemin hareketleri ile karşılaştırılmasının analiz yöntemlerinin kalibrasyonu için çok yararlı olacağına inanılmaktadır.

KAYNAKLAR

Bardet, J.P., Ichii, K. and Lin, C.H.,(2000), "EERA: A Computer Program for Equivalent-Linear Earthquake Response Analyses of Layered soil Deposits", University of Southern California, Los Angeles.

Britton, Jr., Harris, J.B., Hunter, J.A., Luternauer, J.L.(1995), "The Bedrock Surface Beneath the Fraser River Delta from Seismic Measurement" Geological Survey Canada

Dobry R., Vucetic M., (1987), "Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits", International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City, Vol. 2, pp.51-87.

Hardin B.O., Drnevich V.P., (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils: Desing Equations and Curves", J. Soil Mech. Found., ASCE 98 (SM7), pp. 289-324.

Idriss I.M., Seed H.B., (1968), "An Analysis of Ground Motions During the 1957 San Francisco Earthquake", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 6, pp. 2013-2032.

Joyner W.B., Warrick R.E., Oliver A.A., (1976), "Analysis of seismograms from a downhole array in sediments near San Francisco Bay ", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 66, No. 5, pp. 937-958.

Kramer S.L., (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA

Ktenidou O.J., Raptakis D., Apostolidis P., Pitilakis K., (2007), "Aspects of Surface Topography and Site Effects-Experimental and Numerical Studies at Aeigon, Greece", 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, pp. 1656, 25-28 Haziran, Selanik, Yunanistan.

Hashash Y., Park D., (2001), "Non-linear One-dimensional Seismic Ground Motion Propagation in the Mississippi Embayment", Engineering Geology vol 62, p.185-206.

Ishibashi I., Zhang X., (1993), "Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay", Soil Found. 33, 182-191.

Kılıç H., Tohumcu Özener P., Ansal A., Yıldırım M., Özaydın K., Adatepe Ş., (2006) "Microzonation of Zeytinburnu Region with respect to Soil Amplification: A Case Study "Engineering Geology 86 (2006), İstanbul, pp. 238-255.

Kodner R.L., Zelasko J.S., (1963), "Hyperbolic stres-strain formulation of sands", Proc. 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sao Paulo, Brazil pp. 289-324.

Laird J.P., Stokoe K.H., (1993), "Dynamic roperties of Remolded and Undisturbed Soil Samples Test at High Confining Pressure", Geotechnical Engineering Report GR93-6, Electrical Power Research Institute.

Matasovic N. (1993), Seismic Response of Composite Horizontally Layered Soil Deposits. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of California at Los Angeles.

Seed H.B., Idriss I.M., (1970), "Soil Moduli and Damping factors for Dynamic Response analyses", Report EERC 70-10, Earthquake Research Centre, University of California, Berkeley.

Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu T., (1986), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE 112 (SM11), 1016-1032.

Özaydın K., Ansal A., Erdik M., Yıldırım M., Kılıç H., Adatepe Ş., Tohumcu Özener P., Tonaroğlu M., Şeşetyan K., Demircioğlu M., (2004) "Sismik Mikrobölgeleme Amaçlı Jeolojik ve Geoteknik Değerlendirme ve Yer Sarsıntısı Tehlikesi Mikrobölgeleme Raporu", Yıldız Teknik Üniversitesi Geoteknik Anabilim Dalı, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Plaxis 8.4, (2002), "Finite Element Program", Dynamics Manual, Delft University, Netherlands

Romo M.P., Seed H.B., (1986), "Analytical modelling of dynamic soil response in the Mexico earthquake of September 19, 1985", Proceedings, ASCE International Conference on the Mexico Earthquakes-1985, Mexico City, pp. 148-162.

Seed R.B., Dickenson S.E., Reimer M.F., Bray J.D., Sitar N., Mitchell J.K., Idriss I.M., Kayen R.E., Kropp A., Harder L.F., Power M.S. (1990), "Preliminary report on the principal geotechnical aspects of the October 17, 1989 Loma Prieta earthquake", Report UCB/EERC-90/05, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 137 pp.

Stone W.C., Yokel F.Y., Celebi M., Hanks T., Leyendecker E.V. (1987), "Engineering aspects of the September 19, 1985 Mexico earthquake," NBS Building Science Series 165, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 207 pp.

Vucetic M., Dobry R., (1991), "Effects of Soil Plasticity on Cyclic Response", J. Geotech Eng, ASCE 117 (1),89-107.

Yıldırım M., Savaşkan E., (2003), "İstanbul Bölgesi Tersiyer Çökellerinin Stratigrafisine Yeni Bir Yaklaşım ve Çökellerin Mühendislik Özellikleri", İstanbul'un Jeolojisi Sempozyumu, 87-102, İstanbul.

W.D.Liam Finn, E. Zhai, T. Tharavaj, X.-S. Hao, C.E. Ventura (2001) "1-D and 2-D Analyses of Weak Motion Data in Fraser Delta from 1966 Duvall Earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol 23, p.323,329

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	07.06.1982	
Doğum yeri	Bursa	
Lise	1993-2000	Ulubatlı Hasan Anadolu Lisesi
Lisans	2000-2004	Eskişehir Osman Gazi Üniv. Mühendislik Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2004-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Geoteknik Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

2005 – 2006 Serim Mühendislik A.Ş.