

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YEREL ZEMİN SINIFI VE DEPREM ÖZELLİKLERİNİN TEK BOYUTLU
DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tolgahan FEYİZOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YEREL ZEMİN SINIFI VE DEPREM ÖZELLİKLERİNİN TEK BOYUTLU
DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tolgahan FEYİZOĞLU
(501171315)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep İYİSAN

TEMMUZ 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501171315 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Tolgahan FEYİZOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YEREL ZEMİN SINIFI VE DEPREM ÖZELLİKLERİNİN TEK BOYUTLU DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Recep İYİSAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Assist. Prof. Dr. E. Ece BAYAT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet M. BERİLGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 3 Haziran 2020
Savunma Tarihi : 6 Temmuz 2020





Aileme ve Sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Mühendislik yapıları tasarlanırken zemin tabakalarının fiziksel ve dinamik özelliklerinin iyi bilinmesi ve sismik hareketler altında zemin yüzeyinde oluşacak etkilerin öngörülebilmesi gerekmektedir. Depremler sonucunda oluşan sismik dalgalar yüzeye doğru ilerlerken zemin tabakaları ile karşılıklı etkileşime girmektedirler. Bu etkileşim deprem dalgalarına ait özelliklerin değişmesine ve zemin tabakalarında deformasyonlar oluşmasına neden olmaktadır. Üstyapılarda oluşacak hasarı tetikleyen deprem zemin etkileşimi serbest saha davranışı analizleri gerçekleştirilerek incelenmektedir. Serbest saha davranışı analizleri ile yüzey tepki spektrumları, zemin büyütmesi, zemin tabakalarında meydana gelen deplasman ve şekil değiştirmeler elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada anakaya derinliği, yerel zemin sınıfı, zemin cinsi, anakaya özellikleri gibi yerel zemin koşullarının, maksimum yer ivmesi, frekans içeriği, Arias şiddeti gibi deprem özelliklerinin ve analiz türünün zeminlerin dinamik davranışına olan etkileri gerçekleştirilen tek boyutlu analizler ile incelenmiştir. Çalışma sonuçları anakayanın derinde olmadığı sahalarda kuvvetli yer hareketiyle oluşacak etkiler için öngörü niteliğinde kullanılabilir.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince benimle bilgi ve deneyimini paylaşan kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr Recep İyisan'a teşekkürlerimi borç bilirim. Tez çalışmamı gerçekleştirdiğim süreç boyunca benden yardımlarını esirgemeyen Sayın Ar. Gör. Bilal Özasan'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan annem Sevilay Feyizoğlu, babam Ahmet Feyizoğlu, ağabeyim Çağlar Feyizoğlu ve tez çalışmam süresince desteklerini benden esirgemeyen Cansu Çakmak ile Yasin Karakuş'a sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Temmuz 2020

Tolgahan FEYİZOĞLU
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam	3
2. DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİ VE KUVVETLİ YER HAREKETİ	5
2.1 Zeminlerin Dinamik Yükler Altındaki Gerilme Şekil Değiştirme Davranışı	7
2.2 Kayma Modülü ve Sönüm Oranı Azalım İlişkileri	11
2.3 Dinamik Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi	17
2.4 Deprem Özellikleri ve Deprem Kaydı Seçimi	19
3. DİNAMİK DAVRANIŞ ANALİZLERİ	23
3.1 Saha Davranış Analiz Yöntemleri	24
3.1.1 Doğrusal analiz	26
3.1.2 Eşdeğer doğrusal analiz	27
3.1.3 Doğrusal olmayan analiz	28
3.2 Zemin Büyütmesi	30
3.3 Yerel Zemin Sınıfları ve Tasarım Spektrumları	31
3.4 Zemin Koşulları ve Deprem Özelliklerinin Saha Davranışı Analizine Etkisi..	34
4. ZEMİN MODELLERİ VE TEK BOYUTLU DİNAMİK ANALİZLER	39
4.1 Analizlerde Kullanılan Zemin Modelleri	41
4.2 Analizlerde Kullanılan Deprem İvme Kayıtları	49
4.3 Bir Boyutlu Dinamik Analiz Aşamaları	57
5. TEK BOYUTLU DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI	63
5.1 Eşdeğer Doğrusal Analiz Sonuçları	64
5.2 Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları	91
5.3 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	108
5.4 Analiz Sonuçlarının TBDY 2018 ile Belirlenen Tasarım Spektrumları ile Karşılaştırılması	120
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	123
KAYNAKLAR	127
EKLER	133
ÖZGEÇMİŞ	211



KISALTMALAR

AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
CPT	: Koni Penetrasyon Testi
DD-2	: Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2
DMT	: Dilatometre Deneyi
DO	: Doğrusal Olmayan
ED	: Eşdeğer Doğrusal
KZ	: Kondner-Zelasko Modeli
MKZ	: Modifiye Kondner-Zelasko Modeli
PGA	: Maksimum Yer İvmesi
PGD	: Maksimum Yer Değiştirme
PGV	: Maksimum Yer Hızı
PMT	: Presiyometre Testi
PSA	: Maksimum Spektral İvme
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği



SEMBOLLER

A_g	: Spektral zemin büyütmesi
c	: Vizkoz sönüm matrisi
c_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
C_u	: Serbest basınç direnci
$(C_u)_{30}$	: Üst 30 metrede ortalama drenajsız kayma dayanımı
D	: Sönüm oranı
D_r	: Rölatif sıkılık
F_s	: Kısa periyot için yerel zemin etki katsayısı
F_1	: 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
f	: Frekans
G	: Dinamik kayma modülü
G_0	: Başlangıç kayma modülü
G^*	: Kompleks kayma modülü
G_{maks}	: Maksimum kayma modülü
G/G_{maks}	: Normalize kayma modülü
G_{sek}	: Sekant kayma modülü
G_{tan}	: Tanjant kayma modülü
H	: Tabaka kalınlığı
I_p	: Plastisite indisi
I_a	: Arias şiddeti
K	: Rijitlik matrisi
M	: Kütle matrisi
N	: Çevrim sayısı
N_{60}	: Standart penetreasyon testi darbe sayısı
$(N_{60})_{30}$	: Üst 30 metredeki enerji düzeltmesi yapılmış ortalama darbe sayısı
S_{DS}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
S_{D1}	: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
S_s	: Kısa periyot için harita tasarım spektral ivme katsayısı
S_1	: 1.0 saniye periyot için harita tasarım spektral ivme katsayısı
T	: Periyot

T_0	: Zemin hakim periyodu
V_s	: Kayma dalgası hızı
$(V_s)_{30}$	: 30 metre derinlik için ortalama kayma dalgası hızı
w	: Su muhtevası
α	: Empedans oranı
ρ	: Zemin yoğunluğu
τ	: Kayma gerilmesi
τ_0	: Başlangıç kayma gerilmesi
τ_c	: Çevrimsel kayma gerilmesi
τ_{maks}	: Maksimum kayma gerilmesi
γ	: Kayma deformasyonu
γ_c	: Kayma birim şekil değıştirmesi
γ_r	: Referans kayma deformasyonu
γ_n	: Birim hacim ağırlık
ΔW	: Çevrimsel bir döngüde kaybolan enerji
W_e	: Döngüde depolanan maksimum deformasyon enerjisi
σ_o	: Toprak basıncı
σ'	: Efektif gerilme
σ_{ref}	: Referans gerilme
η	: Sönümleyici
$\ddot{u}$	: Relatif ivme
$\dot{u}$	: Relatif hız
u	: Relatif deplasman

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : G_{maks} için arazi deneyleri ile geliştirilen bağıntılar (Kramer, 1996).	9
Çizelge 3.1 : Zeminin dinamik davranışı ve deformasyon seviyeleri (Ishihara, 1996)	24
Çizelge 3.2 : Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018).	32
Çizelge 3.3 : Kısa periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018).	34
Çizelge 3.4 : 1 sn periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018).	34
Çizelge 4.1 : İlk aşamada belirlenen zemin modellerine ait parametreler.....	42
Çizelge 4.2 : Zemin modellerine ait ayrıntılar.....	43
Çizelge 4.3 : Deprem kayıtlarına ait parametreler.....	52
Çizelge 5.1 : Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar.	109
Çizelge 5.2 : Tasarım spektrumu alınan noktalar.....	120



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Zeminlerin tekrarlı yüklemeler altındaki davranışı.	7
Şekil 2.2 : Omurga eğrisi (Kramer, 1996).	8
Şekil 2.3 : Histeresis döngüsü ve enerji sönümlenmesi.	10
Şekil 2.4 : G/Gmaks- γ ve sönüm oranı- γ azalım eğrileri (Seed ve Idriss, 1970). ...	12
Şekil 2.5 : G/Gmaks- γ ve sönüm oranı- γ azalım eğrileri (Vucetic ve Dobry, 1991).	13
Şekil 2.6 : G/Gmaks- γ azalım eğrileri (Ishibashi, 1992).	14
Şekil 2.7 : Azalım eğrileri: (a) G/Gmaks- γ . (b) D- γ (Darendeli, 2001).	14
Şekil 2.8 : G/Gmaks- γ ve sönüm oranı- γ azalım eğrileri (Roblee & Chiou, 2004).	15
Şekil 2.9 : G/Gmaks- γ ve sönüm oranı- γ azalım eğrileri (Menq, 2003).	15
Şekil 2.10 : Rijitlik azalım eğrileri (Okur ve Ansal, 2007).	16
Şekil 2.11 : Sönüm oranı azalım eğrileri (Okur ve Ansal, 2007).	16
Şekil 2.12 : Titreşimlerin ve deneylerin kayma deformasyonu mertebeleri.	17
Şekil 2.13 : Deprem kayıtlarının alınması.	20
Şekil 3.1 : Zemin tepki tanımlaması (Kramer, 1996).	25
Şekil 3.2 : Kelvin-Voight katısı modeli.	26
Şekil 3.3 : Kaya ve yumuşak zemin tabakalarında ivme değişimi.	37
Şekil 4.1 : ZM1, ZM4, ZM7 ve ZM8 zemin modelleri.	44
Şekil 4.2 : ZM2A, ZM2B, ZM2C ve ZM2D zemin modelleri.	45
Şekil 4.3 : ZM3A, ZM3B, ZM3C ve ZM3D zemin modelleri.	46
Şekil 4.4 : ZM5A, ZM5B, ZM5C ve ZM5D zemin modelleri.	47
Şekil 4.5 : ZM6A, ZM6B, ZM6C ve ZM6D zemin modelleri.	48
Şekil 4.6 : 0.1 g'ye ölçeklendirilen depremlere ait ivme-zaman, Arias şiddeti-zaman grafikleri ve ivme spektrumları.	53
Şekil 4.7 : 0.2 g'ye ölçeklendirilen depremlere ait ivme-zaman, Arias şiddeti-zaman grafikleri ve ivme spektrumları.	54
Şekil 4.8 : 0.3 g'ye ölçeklendirilen depremlere ait ivme-zaman, Arias şiddeti-zaman grafikleri ve ivme spektrumları.	55
Şekil 4.9 : 0.4 g'ye ölçeklendirilen depremlere ait ivme-zaman, Arias şiddeti-zaman grafikleri ve ivme spektrumları.	56
Şekil 4.10 : Deepsoilde analiz yöntemi seçme.	58
Şekil 4.11 : Zemin parametrelerinin Deepsoil'e tanımlanması.	58
Şekil 4.12 : Rijitlik azalım ve sönüm oranı eğrilerinin seçilmesi.	59
Şekil 4.13 : Kuvvetli yer hareketi kayıtlarının seçilmesi.	60
Şekil 4.14 : Viskoz sönüm matrisinin belirlenmesi.	60
Şekil 4.15 : Analiz öncesi son parametrelerin seçimi.	61
Şekil 5.1 : ZM4'ün 5 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak yapılan analize göre deplasmanın derinlikle değişimi.	64
Şekil 5.2 : ZM4'ün 2 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak yapılan analize göre deplasmanın derinlikle değişimi.	65

Şekil 5.3 : ZM4'ün 5 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak yapılan analize göre şekil değiştirmenin derinlikle değişimi.	66
Şekil 5.4 : ZM4'ün 2 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak yapılan analize göre şekil değiştirmenin derinlikle değişimi.	66
Şekil 5.5 : ZM1 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	68
Şekil 5.6 : ZM1 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama. ...	69
Şekil 5.7 : ZM1 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	71
Şekil 5.8 : ZM1 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	72
Şekil 5.9 : ZM2B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	74
Şekil 5.10 : ZM2B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama. ...	75
Şekil 5.11 : ZM2B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	77
Şekil 5.12 : ZM2B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	78
Şekil 5.13 : ZM3D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	79
Şekil 5.14 : ZM3D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama. ...	81
Şekil 5.15 : ZM3D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	82
Şekil 5.16 : ZM3D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	84
Şekil 5.17 : ZM6C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	86
Şekil 5.18 : ZM6C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama. ...	87
Şekil 5.19 : ZM6C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	89
Şekil 5.20 : ZM6C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	90
Şekil 5.21 : ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	92
Şekil 5.22 : ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama. ...	94

Şekil 5.23 : ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama	95
Şekil 5.24 : ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	96
Şekil 5.25 : ZM3D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	98
Şekil 5.26 : ZM3D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama. ...	99
Şekil 5.27 : ZM3D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	101
Şekil 5.28 : ZM3D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	102
Şekil 5.29 : ZM6C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	104
Şekil 5.30 : ZM6C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama. .	105
Şekil 5.31 : ZM6C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	106
Şekil 5.32 : ZM6C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.	107
Şekil 5.33 : Eşdeğer doğrusal analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre deplasman değerinin değişimi.	113
Şekil 5.34 : Doğrusal olmayan analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre deplasman değerinin değişimi.	114
Şekil 5.35 : Eşdeğer doğrusal analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre şekil değiştirmenin değişimi.	115
Şekil 5.36 : Doğrusal olmayan analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre şekil değiştirmenin değişimi.	116
Şekil 5.37 : Eşdeğer doğrusal analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre spektral zemin büyütmesinin değişimi.	117
Şekil 5.38 : Doğrusal olmayan analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre spektral zemin büyütmesinin değişimi.	117
Şekil 5.39 : Geçiş tabakası kalınlığının analiz sonuçlarına etkisi.	119
Şekil 5.40 : ZM7-ZM8 modellerine ait sonuçların karşılaştırılması.	120
Şekil 5.41 : Yerel zemin sınıfı ZE olan kum zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.	122
Şekil A.1 : 15 deprem ivme kaydı ile yapılan analizlere göre deplasman-derinlik grafiği.	134
Şekil A.2 : 15 deprem ivme kaydı ile yapılan analizlere göre şekil değiştirme-derinlik grafiği.	134
Şekil B.1 : ZM4 ile 2 m kalınlığında alt tabakalar kullanarak yapılan eşdeğer doğrusal analize ait sonuçlar.	135

Şekil B.2 :	ZM4 ile 5 m kalınlığında alt tabakalar kullanarak yapılan eşdeğer doğrusal analize ait sonuçlar.	136
Şekil B.3 :	ZM4 ile tek tabaka halinde yapılan eşdeğer doğrusal analize ait sonuçlar.	137
Şekil C.1 :	ZM2A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	138
Şekil C.2 :	ZM2C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	140
Şekil C.3 :	ZM2D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	142
Şekil C.4 :	ZM3A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	144
Şekil C.5 :	ZM3B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	146
Şekil C.6 :	ZM3C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	148
Şekil C.7 :	ZM4 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	150
Şekil C.8 :	ZM5A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	152
Şekil C.9 :	ZM5B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	154
Şekil C.10 :	ZM5C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	156
Şekil C.11 :	ZM5D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	158
Şekil C.12 :	ZM6A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	160
Şekil C.13 :	ZM6B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	162
Şekil C.14 :	ZM6D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	164
Şekil C.15 :	ZM7 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	166
Şekil C.16 :	ZM8 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.	168
Şekil D.1 :	ZM2A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.	170
Şekil D.2 :	ZM2B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.	172
Şekil D.3 :	ZM2C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.	174
Şekil D.4 :	ZM2D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.	176
Şekil D.5 :	ZM3A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.	178
Şekil D.6 :	ZM3B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.	180
Şekil D.7 :	ZM3C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.	182

Şekil D.8 :	ZM4 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	184
Şekil D.9 :	ZM5A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	186
Şekil D.10 :	ZM5B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	188
Şekil D.11 :	ZM5C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	190
Şekil D.12 :	ZM5D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	192
Şekil D.13 :	ZM6A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	194
Şekil D.14 :	ZM6B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	196
Şekil D.15 :	ZM6D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	198
Şekil D.16 :	ZM7 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	200
Şekil D.17 :	ZM8 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.....	202
Şekil E.1 :	Yerel zemin sınıfı ZC olan kum zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.	204
Şekil E.2 :	Yerel zemin sınıfı ZD olan kum zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.	205
Şekil E.3 :	Yerel zemin sınıfı ZC olan kil zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.	206
Şekil E.4 :	Yerel zemin sınıfı ZD olan kil zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.	207
Şekil E.5 :	Yerel zemin sınıfı ZE olan kil zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.	208
Şekil E.6 :	Yerel zemin sınıfı ZB olan kaya zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.....	209



YEREL ZEMİN SINIFI VE DEPREM ÖZELLİKLERİNİN TEK BOYUTLU DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ

ÖZET

Depremler tekrarlı yüklemelere neden olarak zemin tabakalarının özelliklerini etkilemekte, yeryüzünde deplasmanlara neden olmakta ve üst yapılarda hasara yol açabilmektedir. Üstyapı tasarımlarında kullanılacak tasarım spektrumlarının elde edilebilmesi, zemin tabakalarında oluşacak deplasman ve şekil değiştirmelerin belirlenebilmesi amacıyla serbest saha davranışı analizleri gerçekleştirilmektedir. Doğrusal, doğrusal olmayan veya eşdeğer doğrusal olarak gerçekleştirilebilen analizlerde zeminlerin genel olarak yatay tabakalandığı durumlarda tek boyutlu dinamik analizler yeterli olmaktadır. Serbest saha davranışları ile zemin cinsi, yerel zemin sınıfı ve anakaya derinliği gibi zemin koşullarının yanında maksimum yer ivmesi ve frekans içeriği gibi deprem özelliklerinin zeminlerin dinamik davranışına olan etkileri belirlenebilir.

Bu çalışmada yerel zemin sınıflarının ve deprem özelliklerinin tek boyutlu dinamik davranış üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla 16 adet anakaya mostrasında alınan kuvvetli yer hareketi ivme kaydı ile farklı yerel zemin sınıfına sahip 20 zemin modeli kullanılarak bir boyutlu saha tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. 1 boyutlu dinamik analizler Deepsoil v6.1 yazılımında frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zemin modelleri TBDY 2018 kapsamında anakaya özelliklerinin farklı olduğu ZB yerel zemin sınıfına dahil olan 2 adet kaya, ZC yerel zemin sınıfına dahil olan birer adet kum ve kil, ZD ve ZE yerel zemin sınıflarına dahil olan ve anakaya derinliğinin etkilerini görebilmek için oluşturulan dörder adet kum ve killerden oluşmaktadır. Depremlere ait maksimum yer ivmesi değerlerinin zeminlerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini görebilmek amacıyla analizlerde kullanılan 16 deprem ivme kayıtları her biri dörder tane olmak üzere 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g maksimum yer ivmesi değerlerine ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirilen bu kayıtlar 20 farklı zemin modeline TBDY 2018'e göre yerel zemin sınıfı ZB ve ZA olan anakaya tabakasından etkiltilmiştir. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler olarak gerçekleştirilen bir boyutlu dinamik analizler sonucunda her zemin modeli için yüzey tepki spektrumları, hakim periyot değerleri, en büyük spektral zemin büyütmeleri değerleri, zemin tabakalarında meydana gelen deplasman ve şekil değiştirmelerin derinlikle değişimi elde edilmiştir. Ayrıca TBDY 2018 kullanılarak maksimum spektral ivme değerleri 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g olan 4 ayrı noktadan alınan tasarım spektrumları ile yapılan analizler sonucunda elde edilen yüzey tepki spektrumları karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen analizlerin sonuçları incelendiğinde maksimum yer ivmesi ile zemin tabakalarında oluşan şekil değiştirme ve yüzeyde meydana gelen deplasmanlar arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Maksimum yer ivmesi değerleri ile spektral zemin büyütme arasında belirgin bir ilişki kurulamazken zeminlerin

rijitlikleri azaldıkça büyötmelerin ve periyotların yükseldiği saptanmıştır. Ayrıca aynı yerel zemin sınıfına sahip kum zeminlerde deplasman ve şekil değiştirmenin, kil zeminlerde ise spektral zemin büyötmesinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



EFFECTS OF LOCAL SOIL CONDITIONS AND EARTHQUAKE PROPERTIES ON ONE DIMENSIONAL DYNAMIC BEHAVIOR

SUMMARY

Earthquakes could affect the properties of the soil layers by causing cyclic loading, create displacements on the surface and damages to the superstructures. Therefore, the dynamic behavior of soils during strong ground motion is important in earthquake-safe construction design. Dynamic behavior of the soil layers is defined by the stress-strain properties depending on the deformation level that occurs under cyclic loads. Stress-strain behavior of soils and dynamic properties of soils like shear wave velocity (V_s), damping ratio (D), and shear modulus (G) are determined using various laboratory and field experiments.

In addition to the effects of earthquakes on the soil layers, as the waves move from the bedrock to the ground surface, they interact with the soil layers. Stress increases due to earthquake motion can cause loss of strength, collapses, high deformations and liquefaction in the soil layers. At the same time, the properties of the soils affect the waves traveling to the ground, leading to an increase in their amplitude.

Dynamic ground response analyzes are carried out in order to obtain the design spectra which are used in superstructure designs and to determine the displacements and deformations that will occur in the soil layers. Ground response analysis can be performed as a linear, nonlinear, or equivalent linear analysis. In the linear analysis, the soil is defined as a material with Kelvin-Voigt solid properties and with a constant shear damping ratio and shear modulus. However, soils are not materials that exhibit linear stress-strain behavior. For this reason, it is necessary to use nonlinear analyzes in the time domain, especially at high strain levels, or equivalent linear analyzes in the frequency domain where nonlinear parameters are input by iterations.

The methods used in ground response analysis are carried out in one dimensional (1-D), two dimensional (2-D), and three dimensional (3-D). In areas where topographic effects and region geometry are prominent, it is recommended to select 2-D or 3-D analyzes, whereas in cases the soil layers are generally horizontal, one dimensional dynamic ground response analyzes are sufficient. Analyses in all dimensions have boundary conditions according to their extent. In one-dimensional analysis, it is assumed that the waves travel from the bedrock to ground surface in one-dimension and the soil layers settle horizontally unlimitedly. Through ground response analysis, besides the effects of earthquake properties such as peak ground acceleration (PGA) and frequency content, effects of local soil conditions as soil type, site class and bedrock depth on the dynamic behavior of soils can be determined.

In the Turkish Building Earthquake Resistant Design Regulation (TBDY) published in 2018, local site classes are determined by taking into account the regional characteristics of the soils as shear wave velocity, standard penetration test values and undrained shear strength. In line with TBDY, according to the shear wave velocity local site classes are ZA for higher than 1500 m/s, ZB for between 760 m/s-1500 m/s,

ZC for between 360 m/s-760 m/s, ZD for between 180 m/s-360 m/s and ZE lower than 180 m/s. In addition, dynamic ground response analyzes have been made compulsory in areas included in the ZF local site class. In TBDY, nonlinear analysis is recommended where the strain level exceeds 1%.

In this study, it was aimed to determine the effects of local soil conditions and earthquake properties on one-dimensional dynamic soil behavior. For this purpose, one-dimensional ground response analyzes were carried out using strong ground motion acceleration time history records taken from 16 bedrock outcrops and soil models with different local site classes. 20 models were used in the study. Firstly, in order to see the effect of local site class difference on the analysis results, 8 models were determined as their shear wave velocity values for 30 m thick soil layers near the surface to be included in the local site class ZB, ZC, ZD and ZE according to TBDY 2018. These models are 2 layers rocks which are included in the ZB local site class and had different bedrock properties, 3 sandy soils and 3 clayey soils which are included in the ZC, ZD and ZE local site classes. In order to see the effect of bedrock depth on the analysis results, 12 new models have been created in profiles with ZD and ZE local soil class with a bedrock depth of 30 m, 35 m, 40 m and 50 m and the number of models has been increased to 20. Thus, 2 rocks, 9 sandy soils and 9 clayey soils models were obtained.

In order to see the effects of peak ground acceleration values of the earthquake motion on the dynamic behavior of the soils, the 16 earthquake acceleration records used in the analyzes were scaled to 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g and 0.4 g peak ground acceleration values, for each. Chichi, Coyote, Nahanni and Northridge-2 earthquake acceleration histories were included D1 earthquake group by scaling 0.1 g PGA value, Imperial Valley, Kocaeli, Loma Prieta and Whittier Narrows acceleration records were included D2 earthquake group by scaling 0.2 g PGA value, Düzce, Northridge, Parkfield and San Fernando acceleration records were scaled to 0.3 g PGA value and included in the D3 earthquake group, Loma Prieta-2, Mammothlake, Manjil and Tottori acceleration records were included in the D4 earthquake group by scaling to 0.4 g PGA value. The magnitude of the randomly selected earthquake records varies between 5.7 M_w and 7.6 M_w . Besides peak ground accelerations, Düzce earthquake acceleration record stands out with 1.17 m/s in peak ground velocity values. If the Arias Intensity values were used in the interpretation of the earthquake effects were examined, it is seen that the Arias Intensity of Imperial Valley and Düzce acceleration records in the group D3 were high as well as the earthquakes records included group D4.

In the analysis, the bedrock was selected as elastic bedrock to actualize the conditions of ZB and ZA local site class according to TBDY. In the models used in the analyzes, the unit weight for bedrock was selected as $\gamma=22.0 \text{ kN/m}^3$. The shear wave velocity values of the bedrock in the models with rock were 1000 m/s and 1500 m/s, in other models it is 760 m/s. Shear wave velocity values for 30 m thick layers were chosen as 810 m/s for models with local site class ZB, 560 m/s for models with local site class ZC, 270 m/s for models with local site class ZD, and 150 m/s for models with local site class ZE. Shear wave velocities were chosen as the mean of the boundaries in the models where the local site classes were ZC and ZD, near the lower limit in the models with ZB, near the upper limit in the models with ZE. Shear wave velocity, unit weight and local site classes were kept the same on sandy and clayey soils, so the effect of soil type on the results was investigated. The selected materials were classified as dense, medium and loose sand, and stiff, medium plasticity and soft clay with respect to Turkish Building Earthquake Regulation. Relative density values for sand were 5%,

15% and 40%, respectively, and plasticity index value for clays was 5%, 15% and 40%, respectively.

One-dimensional dynamic ground response analyzes were carried out as equivalent linear analysis in frequency domain and nonlinear analysis in time domain using 20 models and 16 scaled earthquake acceleration records. Within the scope of the study, approximately 800 one-dimensional analyses were performed in Deepsoil V6.1, a C++ based seismic response analysis program. Deepsoil is a one dimensional analysis program with a self-defined degradation curves that allows linear, nonlinear and equivalent linear analysis. While performing the analyzes, soil profiles were divided into 5 m thick sublayers in the Deepsoil program and parameters were entered.

As a result of the analyzes, surface response spectra, dominant period values, maximum spectral soil amplification values, displacements and deformations occurring in the soil layers were obtained for each model. The results obtained were evaluated according to the analysis made by equivalent linear analysis or nonlinear analysis, according to the differences of the local site classes, according to the soil layers being composed of clay or sand, according to the thickness of the transition layers under the 30 m thick layers and the change of the peak ground acceleration. Then design spectra were drawn according to the TBDY for ZB, ZC, ZD and ZE types of soil and for 4 different points with peak ground acceleration values 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g and 0.4 g and earthquake level for DD-2 (with probability of exceeding the spectral accelerations over 50 years is 10% and the return period is 475 years). These design spectra were compared with the surface response spectra obtained from the analyzes of 16 bedrock outcrops.

As a result of the analyzes performed with models were created to determine the effect of bedrock depth and having ZD and ZE local site classes, it is seen that the bedrock depth has no significant effect on spectral soil amplification. The displacements obtained on the surface and strains occurred in the soil layers are examined. It was seen that these values increased with bedrock depth. In the analysis carried out to determine the effect of bedrock properties, the maximum soil amplification was 1.9 when the bedrock was in the local site class ZA, and 1.7 in the case of ZB. Soil amplification increased as the impedance ratio between bedrock and soil layers increased.

The maximum average displacement values obtained on the surface for the earthquake groups D1, D2, D3, and D4 were 2.7 cm, 2.9 cm, 1.8 cm and 4.3 cm respectively as a result of the equivalent linear analyses and, 2.6 cm, 2.9 cm, 1.9 cm and 4.4 cm as a result of nonlinear analysis. Maximum average strains occurred in soil layers for the earthquake groups were 0.14%, 0.18%, 0.13%, 0.29% for equivalent analyses and 0.20%, 0.24%, 0.16%, 0.38% for nonlinear analyses. It can be said that as the PGA value increased the deformation occurring in the soils increased when strain and displacement values were evaluated together. There was not a certain relationship between the change of peak ground acceleration and soil amplification but in general, higher soil amplifications were observed in earthquakes with lower PGA values.

Maximum spectral soil amplification values were obtained as 3.3 in clays where the local site class was ZE. This value was 2.2 for sands at the same site class. While maximum spectral soil amplification was in 1.0 s period in clays, it was in 1.7 s period in sands. From this, it can be concluded that soil amplification is higher in clays, but sands change the frequency content of the earthquake movement more. In cases where local site classes were the same, the maximum displacement on the surface was on

average 4.1 cm in clays and 4.3 cm in sands. Besides, the maximum strain values are 0.46% on sands, and 0.20% on clays. In general, if the local site class, shear wave velocities and unit weights are the same for sands and clays, sands are exposed to more deformation, while the clays enlarge the earthquake amplitudes more.

In addition to this, when the surface response spectra obtained as a result of the equivalent linear and nonlinear analyzes and the design spectrum determined within the scope of TBDY are compared, there is not major difference about spectral accelerations and dominant periods except for those obtained for sandy soils where the local soil site is ZE. In models created with sandy soils where the local site class is ZE, the values in the acceleration spectra were lower in the spectral acceleration values in the design spectra determined within the scope of TBDY.



1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının tasarımında zemin tabakalarının geoteknik özelliklerinin yanında dinamik davranış özelliklerinin de iyi bilinmesi gerekmektedir. Statik yüklemeler altında zemin davranışı klasik zemin mekaniği ile büyük oranda çözülebilmektedir fakat zeminlerin dinamik yüklemeler altındaki davranışının da bilinmesi üstyapı tasarımları için önemlidir. Bu durum Geoteknik Deprem Mühendisliği kavramını doğurmuştur. Depremler fayların hareket etmesi ile oluşuktan sonra yeryüzüne sismik dalgalar halinde ulaşmaktadır. Dalgalar yolculuklarının büyük bir bölümünü kayada katederken zemin tabakaları içinde katettiği yol süresince zeminler ile karşılıklı etkileşime girerler. Dinamik yüklemeler altında oluşan sismik dalgalar zemin tabakalarının rijitliğini azaltmaktadır. Buna karşılık deprem dalgaları yüzeye yakın zemin tabakalarından geçerken genlikleri artmaktadır ve bu durum zemin büyütmesi olarak tanımlanır (İyisan & Haşal, 2006). Deprem hareketi sonucunda zemin yüzeyinde meydana gelen kayma deformasyonları ile mühendislik yapılarında oluşacak hasar arasında ilişki kurulabilir. Ayrıca zemin tabakalarında dinamik yüklemeler altında oluşacak kayma birim şekil değiştirmeleri de yapılar üzerindeki hasarı büyük oranda etkilemektedir.

Zeminlerin tekrarlı dinamik yüklemeler altındaki davranışı çok karmaşıktır. Dinamik yüklemeler yüksek kayma deformasyonuna neden olan depremler ve düşük kayma deformasyonuna neden olan makine temelleri, trafik ve kompaksiyon gibi uygulamalar ile tanımlanabilir. Özellikle deprem etkisi altında zeminlerin davranışının saptanabilmesi ve davranışın etkilendiği özelliklerin bulunabilmesi önemlidir. Bu davranışı zemin cinsi ve çevre basıncının yanında zeminlerin kayma dalgası hızı, kayma modülü ve sönüm oranı gibi dinamik parametreler etkilemektedir. Zemin tabakalarının dinamik yüklemeler altındaki davranışı histeretik gerilme şekil değiştirme eğrisi ile açıklanmaktadır. Bu eğri rijitlik azalım ve sönüm oranı ilişkileri ile desteklenmektedir.

Zemin tabakalarının deprem sırasında göstereceği davranış ile birlikte zeminlerde oluşacak deplasman ve deformasyonların yanında zemin büyütmesi etkisi ile

mühendislik yapılarında oluşması öngörülen hasarların saptanarak yapıların tasarımında kullanılması amacıyla serbest saha davranışı analizleri yapılmaktadır. Serbest saha davranışı analizleri topoğrafyaya, arazinin eğimli olmasına ve sınır koşullarına göre 1 boyutlu, 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak gerçekleştirilebilirken zeminlerin genel olarak yatay tabakalandığı durumlarda 1 boyutlu (D) dinamik analiz yeterli olmaktadır. Sahaya özgü olarak gerçekleştirilen tepki analizleri dinamik yüklemeler altında doğrusal olmayan davranış gösteren zemin tabakalarına ait dinamik parametrelerin kullanımı ile yapılmaktadır. Analizler sonucunda yüzey tepki spektrumları, zemin büyütme, yüzeyde oluşacak deplasmanlar ve zemin tabakalarında meydana gelecek şekil değiştirmeler hesaplanabilmektedir.

Saha davranışı analizi sonuçları frekans, süre ve genlik içeriği gibi deprem özelliklerinin yanında zemin cinsi, kayma dalgası hızı, kayma modülü ve sönüm oranı gibi dinamik zemin özellikleri, tabaka kalınlığı, anakaya derinliği, gerçekleştirilen analizin türü ve boyutu gibi koşullardan etkilenmektedir. Bu çalışmada yerel zemin koşulları ve deprem özelliklerinin eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan bir boyutlu dinamik analizler ile zeminlerin dinamik davranışına olan etkileri incelenmiştir.

1.1 Amaç

Zemin tabakalarının kuvvetli yer hareketi sırasında göstereceği davranış saptayabilmek mühendislik yapılarında oluşabilecek hasarın önlenmesi açısından çok önemlidir. Bu kapsamda zemin tabakaları ve deprem özellikleri modellenerek serbest saha davranışı analizleri yapılmaktadır.

Bu çalışmada yerel zemin koşullarının ve deprem özelliklerinin zeminlerin dinamik davranış üzerindeki etkilerini belirlemek amaçlanmıştır. Bu amaçla 16 adet deprem ivme kaydı ile 20 adet zemin modeli kullanılarak bir boyutlu yerel saha tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Yerel zemin sınıfının dinamik davranış etkisini incelemek amacıyla yerel zemin sınıfı ZB, ZC, ZD ve ZE olarak tanımlanmış zemin modelleri seçilmiştir. Anakaya özelliklerinin analiz sonuçlarına etkisini görebilmek için kayma dalgası hızları farklı olan 2 anakaya ile yerel zemin sınıfı ZB olan 2 adet kaya model oluşturulmuştur. Kum ve kil zeminler ile oluşturulan modellerde yerel zemin sınıfının ZC, ZD ve ZE olduğu durumlar için birer adet kum ve birer adet kil zemin modelleri oluşturulduktan sonra anakaya derinliğinin analiz sonuçlarına olan etkisini görebilmek amacıyla ZD ve ZE yerel zemin sınıfları için kum ve kil modelleri sayıları 16'ya

yükseltilerek 20 zemin modeli tamamlanmıştır. Zemin modellerinde kum zeminler ile oluşturulan 9, kil zeminler ile oluşturulan 9 ve kaya ile oluşturulan 2 model olmasıyla zemin cinsinin analiz sonuçlarına etkisi incelenmiştir.

Belirlenen 16 deprem 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g maksimum yer ivmesine ölçeklendirilip analizlerde kullanılarak deprem özelliklerinin dinamik davranışa etkisi araştırılmıştır. Dinamik davranış analizleri eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler olarak gerçekleştirilerek analiz türünün sonuçlara etkisini görmek amaçlanmıştır.

1.2 Kapsam

Çalışma kapsamında deprem ve zemin özelliklerinin zeminlerin dinamik davranışına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ikinci bölümde zemin tabakalarının dinamik yüklemeler altındaki davranışını tanımlayabilmek için kullanılan dinamik zemin parametrelerinden ve bu parametreleri belirleyebilmek için gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan laboratuvar ve arazi deneylerine değinilmiştir. Saha davranış analizlerinde kullanılan depremlere ait özellikler ve kullanılacak kayıtlar seçilirken dikkat edilmesi gereken koşullar anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde zemin tabakalarının dinamik davranış sonucunda oluşacak etkileri görmek amacıyla gerçekleştirilen saha davranış analizi yöntemleri incelenmiştir. Bu kapsamda yerel saha davranış analizlerinin nasıl ve hangi şartlarda kullanıldığı anlatılmıştır. Saha davranış analizleri sonucunda yerel zemin etkililerinin yorumlanmasında kullanılan zemin büyütmesi kavramından bahsedilmiştir. Ülkemizde 2018 yılında yayımlanan ve saha davranış analizleri ile zeminlerin sınıflandırılmasını kurala bağlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin ilgili kısımları incelenmiştir. Daha önce saha davranış analizleri ile yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde bu çalışmada kullanılan zemin modelleri ve modellere ait parametreler, deprem ivme kayıtları ve deprem özellikleri belirtilmiştir. Ayrıca eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilme aşamaları gösterilmiştir.

Beşinci bölümde çalışma kapsamında yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlere ait sonuçlar ayrı ayrı verildikten sonra elde edilen sonuçlar depremlerin maksimum yer ivmesine, yerel zemin sınıfına, anakaya özelliklerine, geçiş tabakası kalınlıklarına ve analizin eşdeğer doğrusal veya doğrusal olmayan analiz olarak gerçekleştirilmesine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca analizler sonucunda elde edilen yüzey tepki spektrumları ile TBDY kapsamında belirlenen tasarım spektrumları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde analizler ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler sunulmuştur.



2. DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİ VE KUVVETLİ YER HAREKETİ

İnşaat mühendisliğinde en çok önem arz eden konuların başında depremler sonucunda mühendislik yapılarında oluşacak hasarların belirlenebilmesi gelmektedir. Bu hasarları üstyapılara ait özelliklerin yanısıra deprem dalgalarının yeryüzüne ulaşana kadar geçtiği zemin tabakaları da etkilemektedir. Bu nedenle yapıların doğru projelendirilebilmesiyle deprem sonucunda yapılarda oluşacak hasarları azaltarak can ve mal kaybını önlemek amacıyla zemin tabakalarının fiziksel ve dinamik özelliklerinin iyi bilinmesi ve sismik hareketler altında zemin yüzeyinde oluşacak etkilerin öngörülebilmesi gerekmektedir. Zemin tabakalarının statik ve dinamik yükler altındaki davranışının doğru modellenmesi için yetkili geoteknik mühendislerinin çalışmaları önem arzeder.

Zemin tabakaları sürekli olarak statik ve dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Dinamik yüklerin genlikleri zamanla artıp azalabilmektedir ve zeminlerde farklı seviyelerde deformasyona sebep olabilirler. Düşük deformasyonların ($\gamma \leq \%10^{-3}$) trafik, titreşimli çalışan makine ve kompaksiyon uygulamaları gibi sebepleri varken yüksek deformasyonlar ($\gamma \geq \%10^{-3}$) deprem yer hareketi gibi dinamik yükler altında oluşur (Aydın, 2018).

Depremler faylarda meydana gelen kırılmaların sismik dalgalar yaratması ile oluşmaktadır. Sismik dalgalar anakayadan zemin yüzeyine doğru ilerlerken zemin tabakaları ile karşılıklı olarak etkileşime girerler. Deprem hareketi sonucunda meydana gelen gerilme artışları zemin tabakalarında mukavemet kayıplarına, göçmelere, yüksek deformasyonlara ve sıvılaşmalara sebep olabilmektedir. Aynı zamanda zeminlerin özellikleri yeryüzüne ilerleyen dalgaları etkileyerek genliklerinde büyümelere yol açmaktadır. Bu karşılıklı etkileşimin sonuçlarının saptanabilmesi için yerel zemin koşullarının ve deprem kaynak özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Yerel zemin tabakalarının özelliklerinin belirlenebilmesi için arazide ve laboratuvar ortamında deneyler titizlikle yapılmalıdır.

Yapılacak arazi ve laboratuvar deneyleri ile elde edilen parametreler kullanılarak saha davranış analizlerinin gerçekleştirilmesi ve mühendislik tasarımlarının yer tepki

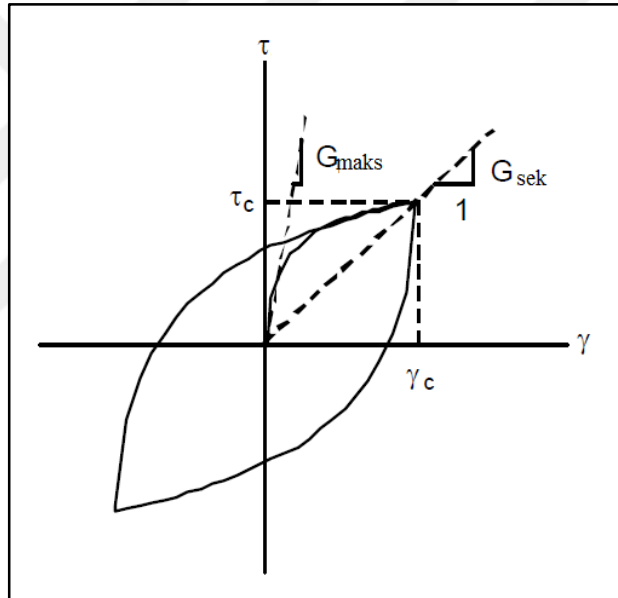
analizleri dikkate alınarak projelendirilmesi kuvvetli yer hareketi sonucunda oluşacak yapısal hasarların önüne geçilebilmesi için son derece önemlidir. Saha davranış analizi uygulamalarında zeminin çevrimsel yükleme altındaki gerilme şekil değiştirme davranışını etkileyen iki temel yaklaşım vardır. Birincisi, zeminin yaylar ve sürtünme elemanları olarak tanımlandığı Masing kuralına uygun olarak çevrimsel histeretik eğrilerin kullanıldığı yöntemdir. Bu model çevrimsel yüklemdeki azalım ve şekil değiştirmenin kayma modülü ve sönüm oranına bağımlı olmasını tam anlamıyla yansıtamamaktadır. Ayrıca Masing kuralının uygulanması da kayma modülü ve sönüm oranı değişimini tam karşılamaz. İkinci yaklaşımda, zemin tabakalarının sönümü sürtünme yerine vizkoz olarak tanımlanır. Bu yöntem, tekrarlı olarak değişen kayma modülünü ve sönüm oranını birim şekil değiştirmeye bağlı olarak tanımlamaktadır.

Tekrarlı yüklere maruz kalan zemin tabakaları sönüm özellikleri ile bu yüklere ait enerjinin bir kısmını azaltırken deforme olarak rijitliklerini kaybetmektedirler. Dinamik yükler plastisite indisi, rölatif sıkılık, su muhtevası, kohezyon ve boşluk oranı gibi zemin parametrelerini etkileyerek zeminlerin davranışını değiştirmektedir. Zemin tabakalarının dinamik yüklemeler altında gösterdiği histeretik gerilme şekil değiştirme davranışı hiperbolik denklemler ve azalım eğrileri ile açıklanır. Ayrıca deprem dalgalarının genlikleri anakayadan yeryüzüne ulaşana kadar zemin tabakalarının özelliklerinden dolayı değişime uğramaktadır. Bu nedenle zemin tabakalarının dinamik özelliklerinin ayrıntılı olarak bilinmesi önem arzeder.

Zemin tabakalarının deprem hareketiyle birlikte göstereceği davranış ve sonucunda oluşacak etkilerin saptanması dinamik saha tepki analizleri ile olmaktadır. Dinamik saha tepki analizleri zemin tabakalarının dinamik parametreleri ve deprem özelliklerinden etkilenmektedir. Gerçekleştirilecek olan saha tepki analizlerinde kullanılacak olan depremlere ait özelliklerin bilinmesi belirli bir bölge için deprem kaydı seçiminde önem arz etmektedir. Bu bölümde zemin tabakalarının dinamik yüklemeler altında gerilme şekil değiştirme davranışından ve zeminlerin rijitlik ve enerji sönümlenme kapasitelerini gösteren azalım eğrilerinden bahsedilecektir. Ayrıca zeminlere ait dinamik özelliklerin saptanması için gerçekleştirilen laboratuvar ve arazi deneyleri anlatılacak ve geoteknik deprem mühendisliği açısından depremlerin özellikleri ile saha tepki analizlerinde kullanılan depremlerin seçiminde dikkat edilmesi gereken unsurlar açıklanacaktır.

2.1 Zeminlerin Dinamik Yükler Altındaki Gerilme Şekil Değiştirme Davranışı

Zeminler deprem hareketi sırasında dinamik yükler altında meydana gelen kayma deformasyonu nedeniyle rijitliklerini kaybederken dinamik yüklemelere ait enerjinin bir kısmını sönümler. Zemin tabakalarının dinamik yüklemeler altındaki rijitliği kayma modülü (G) ile dalgaların enerjisini azaltabilmesi özelliği sönüm oranı (D) ile tanımlanmaktadır. Bu parametreler zemin tabakalarının kuvvetli yer hareketi ile oluşan davranışını göstermek için kullanılır. Zemin tabakaları tekrarlı olarak yüklemeye maruz kaldıklarında histeretik gerilme şekil değiştirme davranışı göstermektedirler. Bu davranış histeresis döngüsü ile tanımlanmaktadır. Zeminlerin tekrarlı yüklemeler altındaki gerilme şekil değiştirme davranışı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Zeminlerin tekrarlı yüklemeler altındaki davranışı.

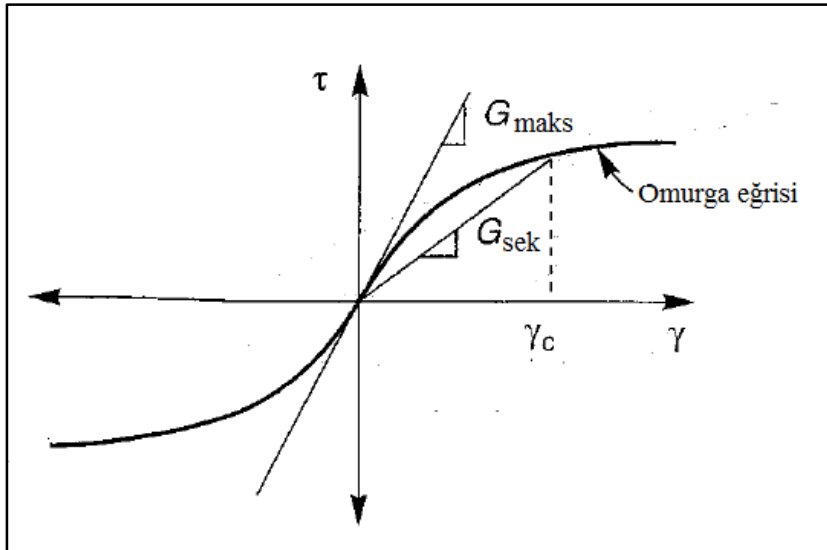
Zeminlerin dinamik tepkisi simetrik döngüsel yükleme koşullarına bağlı olarak ifade edilir. Çünkü çoğu zemin döngüsel gerilme şekil değiştirme ilişkisi barındırmaktadır. Döngüsel yüklemede kayma modülü genellikle sekant kayma modülü olarak açıklanmaktadır. Sekant kayma modülü de histeresis eğrisinin uç noktalarında sönüm oranının değişimine göre tanımlanmıştır (Seed ve Idriss, 1970). Şekil 2.1’de sekant kayma modülüne ait kayma gerilmesi ve kayma birim şekil değiştirmesi değerleri τ_c ve γ_c ile gösterilmiştir. Sekant kayma modülü histeresis döngüsünün eğimi olarak tanımlanabilir. Yüksek kayma deformasyonu ($\gamma > 10^{-3}$) seviyesindeki kayma modülü olarak gösterilen sekant kayma modülü Denklem 2.1 ile hesaplanmaktadır.

$$G_{sek} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2.1)$$

Zemin tabakalarının gerilme-şekil değiştirme davranışının doğrusal olduğu aralıktaki kayma modülü maksimum kayma modülü (G_{maks}) olarak tanımlanır (Cılız ve diğ., 2007). Düşük kayma deformasyonu ($\gamma < 10^{-3}$) seviyesindeki kayma modülü olarak gösterilen maksimum kayma modülü; kayma dalgası hızı ve zemin tabakalarına ait yoğunluğa bağlı olarak denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır.

$$G_{maks} = V_s^2 \rho \quad (2.2)$$

Histeresis eğrisi maksimum kayma modülü ve sekant kayma modülü dışında tanjant kayma modülünü (G_{tan}) de içermektedir. Histeresis döngüsünün herhangi bir noktadaki kayma modülü tanjant kayma modülü olarak tanımlanmaktadır. Tanjant kayma modülü düşük birim deformasyon seviyelerinde yüksektir. Farklı tekrarlı birim deformasyon genliklerinde histeresis döngülerinin uçlarının bulunduğu noktalar birleştirilerek oluşturulan omurga eğrisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Kramer, 1996). Omurga eğrisi dinamik yükler altında zemin davranışını tanımlayan gerilme birim şekil değiştirme eğrilerini idealize etmek için kullanılmaktadır (Özkan, 2017).



Şekil 2.2 : Omurga eğrisi (Kramer, 1996).

Zeminlerin histeretik davranışını ve omurga eğrisini modelleyebilmek için birçok matematiksel fonksiyon geliştirilmiştir. Kullanılan matematiksel fonksiyonlar genellikle Mohr-Coulomb kriterine uygun olarak basit bir şekilde histeretik davranışı tanımlayabilmeyi amaçlamıştır.

Omurga eğrisi Denklem 2.3 ile oluşturulur ve herhangi bir birim deformasyona karşılık gelen kayma modülü Denklem 2.4 ile hesaplanabilir. Burada τ_{maks} zemin kayma direncini, G_{maks} maksimum kayma modülünü, γ kayma birim deformasyonunu göstermektedir.

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_{maks}} + \frac{\gamma}{\tau_{maks}}} \quad (2.3)$$

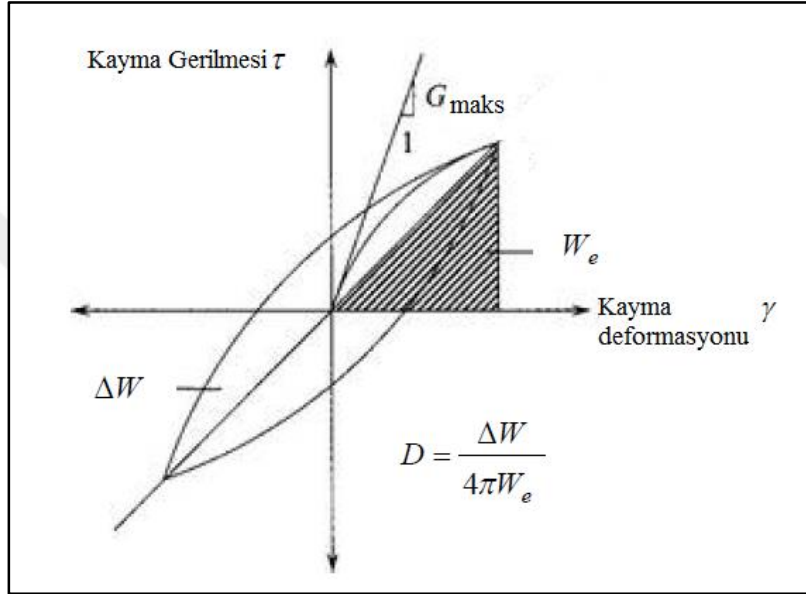
$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{1}{\frac{1}{G_{maks}} + \frac{\gamma}{\tau_{maks}}} \quad (2.4)$$

Maksimum dinamik kayma modülün belirlenebilmesi için bir çok araştırmacı arazi deneyleri sonuçlarına göre bağıntılar geliştirmiştir. Presiyometre (PMT), Dilatometre (DMT), Koni Penetrasyon Testi (CPT) ve Standart Penetrasyon Testi (SPT) kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar ile geliştirilen bağıntılar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Bu bağıntılar belirli zemin cinslerinde geçerli olup farklı zemin türlerinde kullanılamayabilir. SPT ile yapılan analizler sonucu geliştirilen bağıntı darbe sayısına ve efektif gerilmeye, CPT ile geliştirilen bağıntı uç mukavemeti, efektif gerilme ve boşluk oranına bağlıdır. Bu bağıntıların dışında birçok araştırmacı da maksimum kayma modülünü formülüne edebilmek için çalışmalar yapmıştır (Rampello et al., 1997)(Rampello et al., 1997)(Rampello et al., 1997)(Rampello et al., 1997)(Rampello ve diğ., 1997; Carlton ve Pestana, 2012; Khosravi ve McCartney, 2012).

Çizelge 2.1 : G_{maks} için arazi deneyleri ile geliştirilen bağıntılar (Kramer, 1996).

Deney	Formül	Zemin Türü	Kaynaklar
SPT	$G_{maks} = 20000((N_1)_{60})^{0.333}(\sigma')^{0.5}$	Kum	Ohta ve Goto (1976) Seed ve diğ. (1986)
	$G_{maks} = 325(N_{60})^{0.68}$	Kum	Imai ve Tonouchi (1982)
CPT	$G_{maks} = 1634(q_c)^{0.250}(\sigma'_v)^{0.375}$	Kuvars kumu	Rix ve Stokoe (1991)
	$G_{maks} = 406(q_c)^{0.695}e^{-1.130}$	Kil	Mayne ve Rix (1993)
DMT	$G_{maks}/E_d = 2.72 \pm 0.59$	Kum	Baldi (1990)B
	$G_{maks}/E_d = 2.2 \pm 0.7$	Kum	Bellotti vd. (1986)
PMT	$3.6 \leq (G_{maks}/G_{ur,c}) \leq 4.8$	Kum	Bellotti vd. (1986)
	$G_{maks} = 1.86G_{ur}/\alpha_p$	Kum	Byrne (1991)

Zemin tabakalarının dinamik davranışını tanımlarken kullanılan bir diğer özellik sönüm oranıdır. Deprem hareketi sırasında dalgalar zeminlerde şekil değiştirmelere sebep olurken dalgaların enerjilerinde azalma olmaktadır. Sönüm oranı dinamik yüklemdeki çevrim sırasında yutulan enerji olarak ifade edilir ve gerilme şekil değiştirme davranışını gösteren histeris döngüsü ile hesaplanmaktadır. Çevrimsel yükleme altında gerilme şekil değiştirme davranışını gösteren histeresis döngüsü ve enerji sönümlenmesi Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Bahar ve diğ., 2012).



Şekil 2.3 : Histeresis döngüsü ve enerji sönümlenmesi.

Şekil 2.3'te de gösterildiği üzere sönüm oranı Denklem 2.5 ile hesaplanmaktadır. Burada ΔW bir döngüde kaybolan enerji, W_e ise döngüde depolanan maksimum deformasyon enerjisidir.

$$D = \frac{\Delta W}{4\pi W_e} \quad (2.5)$$

Histeresis ilmeğinin alanı olan ΔW çevrim sayısı arttıkça artmakta iken ilmeğin uç noktaları ile birim şekil değiştirme eksenini arasında kalan üçgenin alanı olan W_e çevrim sayısı arttıkça azalmaktadır. Bunun sonucunda zemin tabakasının sönümleme kapasitesi artar.

Sismik analizler gerçekleştirilirken zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışını daha iyi yansıtılması amacıyla kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm oranı eğrileri tanımlanmaktadır. Sekant kayma modülü (G_{sek}) maksimum kayma modülü (G_{maks}) ile oranlanarak normalize edilmiştir ve böylece kayma modülü azalım eğrileri

oluşturulmuştur. Bu azalım eğrileri efektif gerilme, plastisite indisi, rölatif sıkılık ve boşluk oranı gibi bir çok parametreden etkilenmektedir. Zeminlerin dinamik parametreleri kayma modülü ve sönüm oranı olarak tanımlanmasının yanında rijitlik azalım ve sönüm oranı artım eğrileri zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışını etkilemektedir (Okur, 2002). Vucetic ve Dobry (1991) 1985 yılında meydana gelen Mexico City depremi ivme kayıtlarını kullanarak kil zeminlerde plastisite indisi değişiminin sismik tepki sonuçlarına olan etkilerini incelemişlerdir. Birçok döngüsel yükleme testi sonucunu gözden geçirerek plastisite indisinin G/G_{maks} kayma şekil değiştirme eğrisi ve sönüm oranı kayma şekil değiştirme eğrileri için ana etken olduğunu saptamışlardır.

Bunun dışında birçok çalışmada zemin özelliklerinin normalize kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri ile araştırılan bu etkiler sonucunda azalım eğrileri önerilmiştir (Seed ve Idriss, 1970; Hardin ve Drnevich, 1972; (Sun et al., 1988) (Sun et al., 1988) Vucetic ve Dobry, 1991; Ishibashi ve Zhang, 1993; Stokoe ve diğ., 1999; Darendeli, 2001; Roblee ve Chiou, 2004; Zhang ve diğ., 2005; Likitlersuang ve diğ., 2013; Amir-Faryar ve Aggour, 2016).

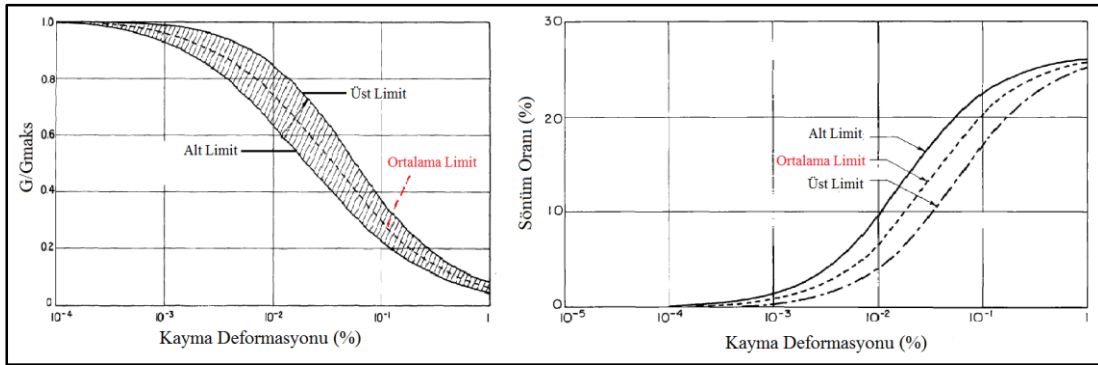
2.2 Kayma Modülü ve Sönüm Oranı Azalım İlişkileri

Tekrarlı yüklemelere maruz kalan zemin tabakaları mukavemetlerinde kayıp yaşarlar. Zeminlerin rijitliğini yansıtan kayma modülü değeri dinamik yüklemeler altında deformasyon seviyesi arttıkça azalmaktadır. Kayma modülünün maksimum kayma modülüne oranlanmasıyla elde edilen normalize kayma modülü değeri zeminlerin dinamik yüklemeler altındaki davranışını en doğru yansıtan parametredir. Normalize kayma modülünün artan kayma birim deformasyonuna göre değişimini gösteren eğriler kayma modülü azalım eğrisi olarak tanımlanır.

Kuvvetli yer hareketi zemin tabakalarını etkileyerek deformasyonların artmasına ve artan deformasyonlarla dalga hareketinin enerjisinin azalmasına neden olmaktadır. Zeminlerin deprem dalgalarına ait enerjiyi azaltmasını tanımlayan sönüm oranı zeminlerin tekrarlı yüklemeler altındaki enerji yutabilme özelliği olarak da gösterilebilir (Yoshida, 2015). Sönüm oranının artan kayma birim deformasyonuna göre değişimini gösteren eğriler sönüm oranı eğrileri olarak tanımlanmaktadır. Sönüm oranını etkileyen en önemli faktörler kayma deformasyonu, efektif gerilme, zemin

cinsi ve plastisite indisinin yanında yükleme frekansı ve döngü sayısıdır. Efektif gerilme artışı sönüm oranı için azaltıcı bir etkiye sahiptir fakat plastisite indisinin sönüm oranı üzerindeki etkisi karmaşıktır. Yapılan çalışmalarda yüksek şekil değiştirme seviyelerinde plastisite indisi arttıkça sönüm oranının azaldığı görülmüştür (Vucetic ve Dobry, 1991). Bunun yanında minimum sönüm oranının plastisite indisi arttıkça artış gösterdiği saptanmıştır (Stokoe ve diğ., 1994). Bu durum plastisite indisinin sönüm oranı üzerindeki karmaşık etkisini yansıtmaktadır. Rijitlik-birim şekil değiştirme ve sönüm oranı-birim şekil değiştirme eğrileri birbiri ile bağlantılı olup beraber azalım eğrileri şeklinde tanımlanmaktadır.

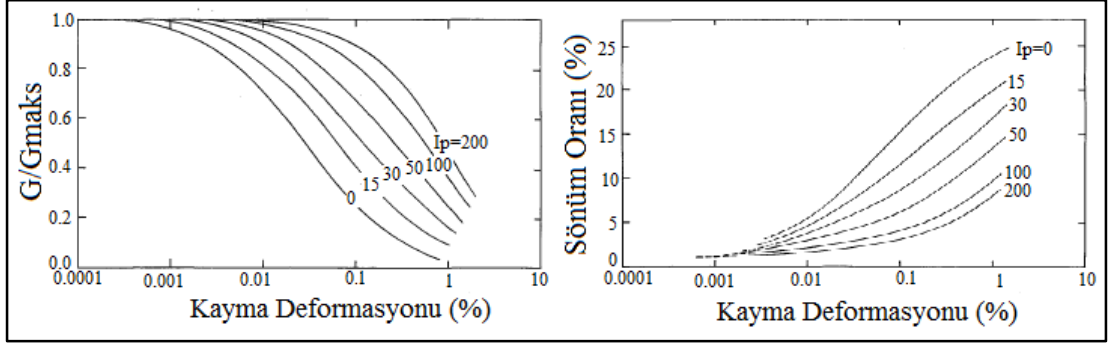
Dinamik zemin özelliği eğrilerinin hangi parametrelerden etkilendiğini saptayabilmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Seed ve Idriss, (1970) kaba daneli zemin numuneleri üzerinde yaptıkları çalışma ile G/G_{maks} - γ ve sönüm oranı- γ arasındaki ilişkiyi Şekil 2.4'te gösterildiği gibi bulmuştur. Seed ve Idriss kumlar için kayma modülü değerinin efektif basınç, şekil değiştirme genliği ve boşluk oranından etkilendiğini fakat dane boyutunun büyük bir değişime neden olmadığını saptamışlardır. Şekil 2.4'te gösterilen azalım eğrileri plastisite indisi olmayan zemin numuneleri üzerinde yapılan çalışmalar ile oluşturulmuştur. Kumların sıklık derecelerine göre gevşek zeminlerden sıkı zeminlere gidildikçe grafikler alt limitten üst limite doğru yönelmektedir.



Şekil 2.4 : G/G_{maks} - γ ve sönüm oranı- γ azalım eğrileri (Seed ve Idriss, 1970).

Azalım eğrilerini belirlemek için yapılan bir diğer çalışmada kil zeminlerde plastisite indisinin (I_p) gerilme-şekil değiştirme davranışındaki en önemli faktör olduğu belirlenmiştir (Vucetic ve Dobry, 1991). Yapılan çalışma sonucunda elde edilen azalım eğrileri Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Çalışmada belirlenen G/G_{maks} - γ eğrisinde aşırı konsolidasyon oranı değerleri 1 ile 15 arasında, D - γ eğrisinde 1 ile 8 arasında

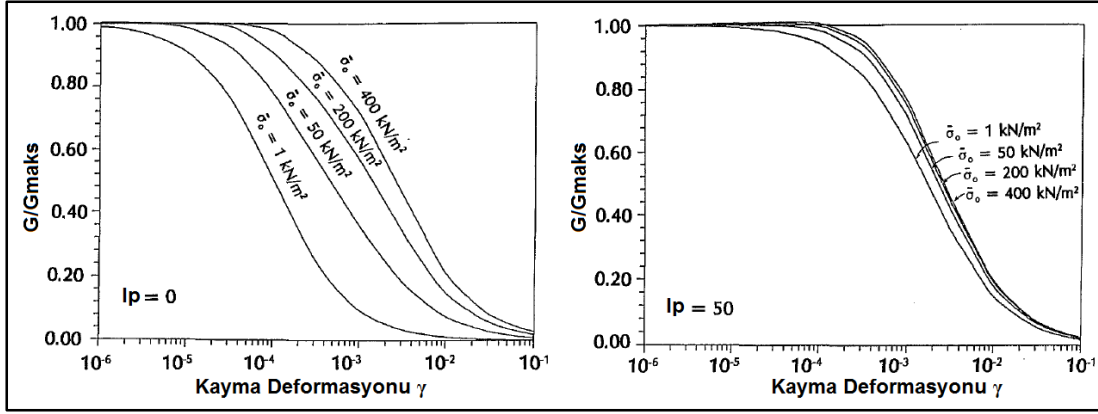
değişmektedir. Plastisite indisi değerleri 0-200 arasında seçilmiştir. Plastisite indisinin yanında boşluk oranının etkileri de incelenmiştir.



Şekil 2.5 : G/G_{maks} - γ ve sönüm oranı- γ azalım eğrileri (Vucetic ve Dobry, 1991).

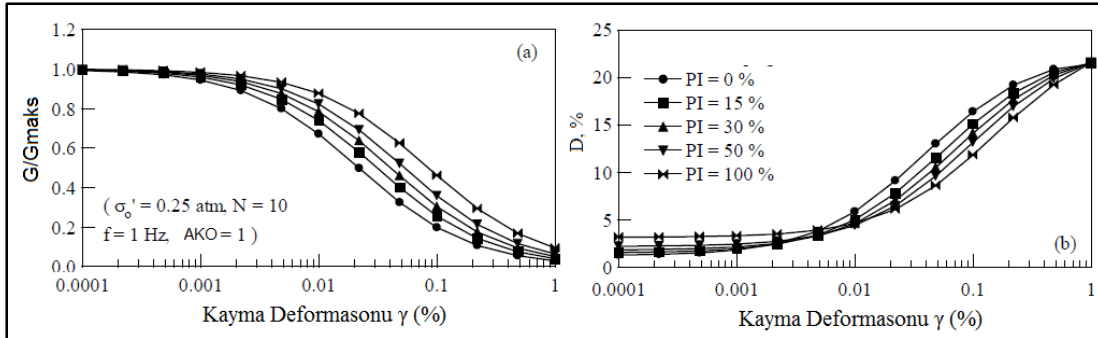
Normal konsolide zeminlerde ($AKO=1$) G_{maks} plastisite indisine dayanmamaktadır. Aşırı konsolide zeminlerde ise G_{maks} ile plastisite indisi arasında doğrusal bir ilişki vardır. G_{maks} boşluk oranı ve gerilmeye bağlı iken aşırı konsolidasyon oranına bağlı değildir. G/G_{maks} eğrilerine ait değerler artan birim şekil değiştime ile plastisite indisi arttıkça artarken sönüm oranı eğrileri azalma yönüne gitmektedir. Plastisite indisi hasar görmüş zeminlerde hesaplanırken, boşluk oranı örselenmemiş zeminlerde saptanır. Ayrıca plastisite indisi zeminin gerilme koşullarına ve yükleme geçmişine bağlı değilken boşluk oranı bağlıdır. Tüm diğer koşulların eşit olduğu iki farklı zemin numunesi için plastisite indisi yüksek olan zeminler genellikle yüksek boşluk oranına sahiptir. Bu da plastisite indisinin ve boşluk oranının rijitlik ve sönüm oranı eğrileri üzerinde benzer etkilere sahip olmasını açıklamaktadır. Yüklemelelerdeki döngü sayısının sönüm oranı eğrisi üzerinde çok etkiye sahip değilken rijitlik azalım eğrisi üzerinde etkiye sahip olmasının nedeni kayma modülü çevrim sayısı arttıkça azalmasıdır (Vucetic & Dobry, 1991).

Vucetic ve Dobry'nin çalışmaları daha sonra Ishibashi tarafından değerlendirilmiştir. Ishibashi plastisite indisinin olmadığı durum için ve plastisite indisinin %50 olduğu durumlar için farklı toprak basıncı değerlerine göre rijitlik azalım eğrileri için çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda oluşan eğriler Şekil 2.6'da gösterilmiştir. İki durumda da toprak basıncı arttıkça normalize kayma modülü değeri yükselmektedir ve zemin tabakaları toprak basıncı yükseldikçe daha geniş kayma deformasyonu aralıklarında doğrusal davranış göstermektedir. Fakat plastisite indisinin %50 olduğu durumda toprak basıncının etkisi rijitlik azalım eğrisi üzerinde daha az etkiye sahiptir (Ishibashi, 1992).



Şekil 2.6 : G/Gmaks- γ azalım eğrileri (Ishibashi, 1992).

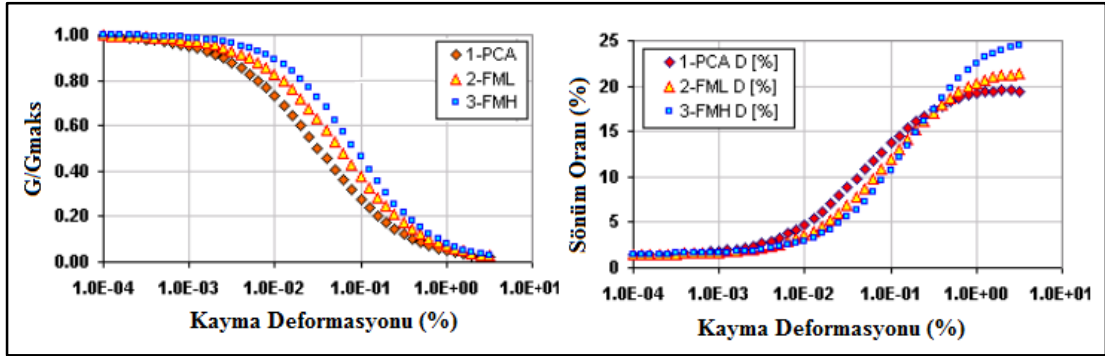
Darendeli 2001 yılında 150'den fazla örselenmemiş ve 50 adet örselenmiş kum-çakıl zemin numunesi üzerinde laboratuvarında rezonant kolon ve çevrimsel burulmalı kayma testi yapmıştır. Çalışmada efektif gerilme, kayma deformasyonu ve çevrim sayısı gibi deneylere ait parametrelerin dane boyutu, uniformluk katsayısı, boşluk oranı, plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranı gibi zemin parametreleri ile olan ilişkisini incelemiştir (Darendeli, 2001).Yapılan çalışma sonucunda plastisite indisi, efektif gerilme, çevrim sayısı ve frekansa bağlı olarak farklı azalım eğrileri elde etmiştir. Diğer parametrelerin sabit tutularak plastisite indisine bağlı değişim Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Azalım eğrileri: (a) G/Gmaks- γ . (b) D- γ (Darendeli, 2001).

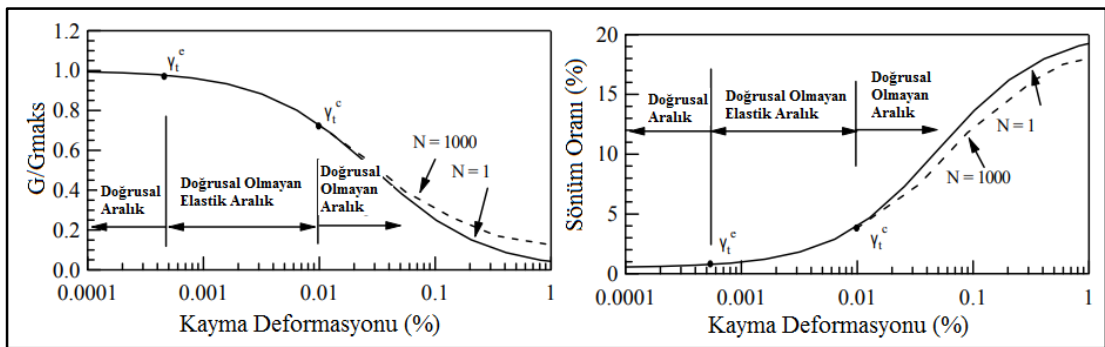
Darendeli'nin yaptığı çalışmaların üzerine plastisite indisine ve ince dane oranına göre zeminleri sınıflandırarak çalışma gerçekleştiren Roblee ve Chiou (2004) basitleştirilmiş azalım eğrileri elde etmiştir. Yaptıkları çalışmada ince dane oranı %30'dan düşük olan zemin numuneleri (PCA), ince dane oranı %30'dan fazla ve plastisite indisi %15'ten düşük olan iyi derecelenmiş zemin numuneleri (FML), ince dane oranı %30'dan plastisite indisi %15'ten fazla olan iyi derecelenmiş zemin

numuneleri (FMH) kullanmışlardır. 3 farklı kategorideki zemin numuneleri ile yapılan deneyler sonucunda elde ettikleri azalım eğrileri Şekil 2.8’de gösteriştir.



Şekil 2.8 : G/G_{maks} - γ ve sönüm oranı- γ azalım eğrileri (Roblee & Chiou, 2004).

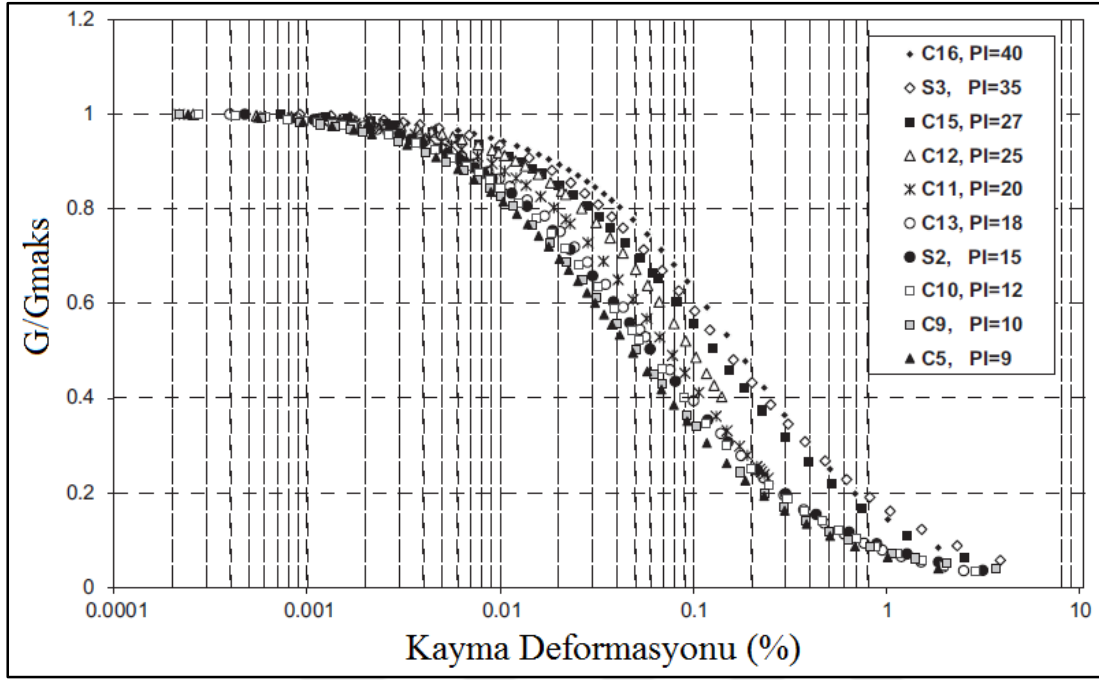
Menq (2003) 59 örselenmemiş zemin numunesi kullanarak kaba daneli zeminlerin dinamik yükler altındaki gerilme şekil değiştirme davranışını incelemiştir. Yaptığı çalışmada zemin numunelerini sabit serbest rezonant kolon deneyi ve burulmalı kayma deneylerine tabi tutmuştur. Çalışmada efektif gerilme, boşluk oranı, dane boyutu, üniformluk katsayısı, su muhtevası gibi parametrelerin zeminlerin doğrusal olmayan davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yaptığı çalışma sonucunda kaba daneli zeminler için azalım ilişkilerini gösteren eğriler elde etmiştir. Şekil 2.9’da verilen azalım eğrilerinde çevrim sayısının etkisi ve zemin tabakalarının hangi kayma deformasyonu aralıklarında doğrusal veya doğrusal olmayan davranış gösterdiği görülmektedir.



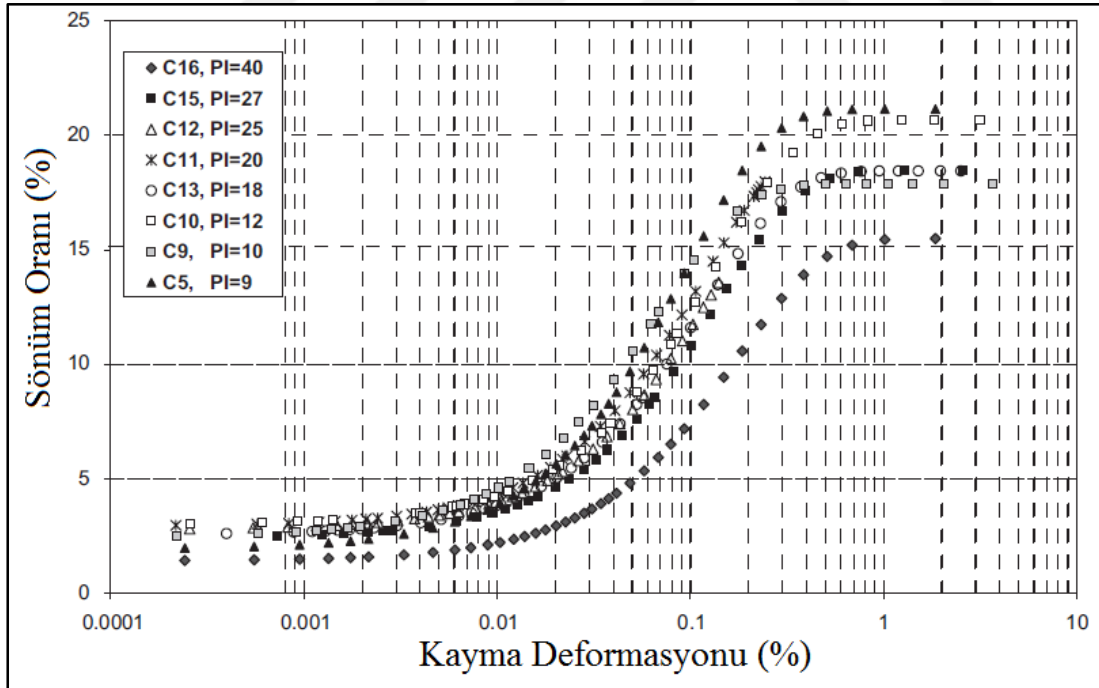
Şekil 2.9 : G/G_{maks} - γ ve sönüm oranı- γ azalım eğrileri (Menq, 2003).

Bir diğer çalışmada dinamik üç eksenli deney düzeneği kullanılarak ince daneli zeminler üzerinde plastisite indisi ve çevresel basıncın etkileri araştırılmıştır. Normal konsolide zemin numuneleri ve az sayıda aşırı konsolide zemin numuneleri kullanılarak 98 test gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda zeminin kayma

deformasyonu için elastik eşik $0.9G_{maks}$ olarak bulunmuştur. Şekil 2.10'da ve 2.11'de bu çalışma ile elde edilen azalım eğrileri gösterilmiştir (Okur ve Ansal, 2007).



Şekil 2.10 : Rijitlik azalım eğrileri (Okur ve Ansal, 2007).

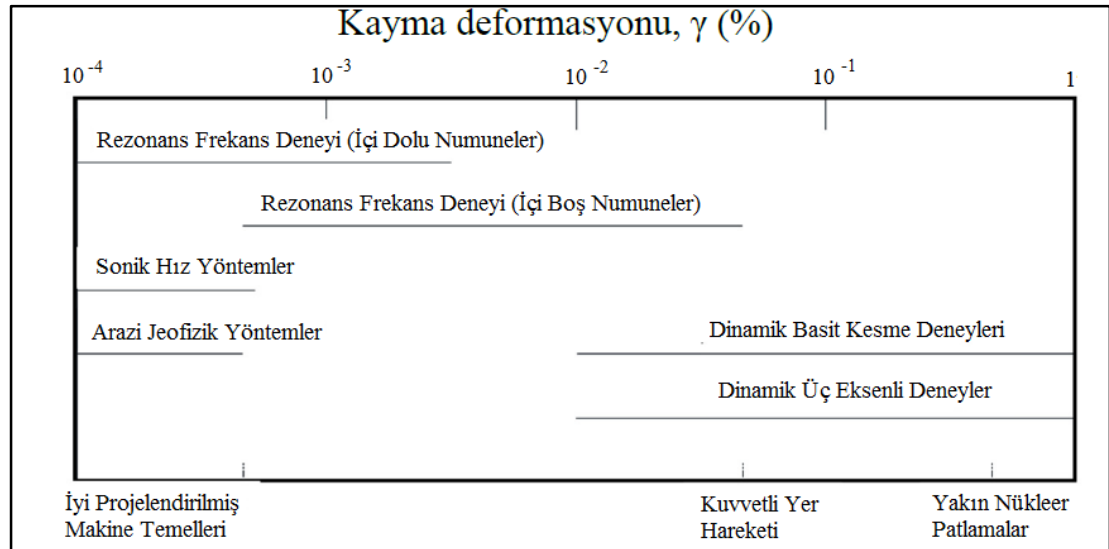


Şekil 2.11 : Sönüm oranı azalım eğrileri (Okur ve Ansal, 2007).

2.3 Dinamik Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Deprem sırasında birçok parametre zeminlerin dinamik davranışını ve bunun sonucunda elde edilecek yüzey tepki spektrumlarını etkilemektedir. Bu nedenle zemin tabakalarına ait dinamik özellikleri ve deprem sırasında zeminlerin göstereceği davranışı belirlemek önemlidir. Sekant kayma modülü, düşük birim şekil değiştirme seviyesindeki sönüm oranı, zemin cinsi, yeraltı suyu seviyesi ve anakaya derinliği gibi özelliklerin zeminlerin dinamik davranışı üzerinde etkileri araştırılmıştır. Yapılan parametrik çalışmalara göre sekant kayma modülü, anakaya derinliği, zemin cinsi gibi etmenler dinamik saha davranışı analizlerinde büyük rol oynarken düşük birim şekil değiştirme seviyesindeki sönüm oranı, yeraltı suyu seviyesi gibi etmenler saha davranışı analizinde büyük etkiye sahip değildir (Arslan ve Siyahi, 2006).

Zemin tabakalarında tüm dinamik yüklemeler farklı sonuçlar doğurmaktadır. Tekrarlı yüklemeye neden olan deprem, patlama ve trafik gibi etkenler zemin tabakalarında farklı seviyelerde kayma şekil değiştirmesi oluşturmaktadır. Bu şekil değiştirme değerleri düşük kayma şekil değiştirme ve yüksek kayma şekil değiştirme mertebeleri olarak tanımlanır. Çalışmalar her kayma şekil değiştirme mertebesi için zeminin histeretik davranışını yansıtmayı amaçlamıştır. Zeminlere ait dinamik özellikleri belirlemek için kullanılan deney yöntemleri ve zemin tabakalarında titreşime neden olan olaylar ile bunların kayma deformasyon seviyeleri Şekil 2.12’de gösterilmiştir (Özaydın, 2011).



Şekil 2.12 : Titreşimlerin ve deneylerin kayma deformasyonu mertebeleri.

Zeminlerin dinamik davranışı kayma modülü, sönüm oranı ve bunların deformasyon seviyelerine göre değişimi ile açıklanmaktadır. Histeretik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi laboratuvar ortamında döngüsel yüklemenin sağlandığı üç eksenli basınç, basit kesme ve burulmalı kesme deneyi ile bulunabilmektedir. Bu tarz ölçümler ile elde edilen değerler genellikle yüksek şekil değiştirme seviyelerinde kullanışlı olmaktadır (Carlton ve Pestana, 2012).

Geoteknik ve jeolojik koşullar yer hareketi üzerinde önemli role sahiptirler. Sondaj kazıları, standart penetrasyon deneyi veya koni penetrasyon deneyi gibi geoteknik incelemeler yüzey tabakaları için bilgi toplanması açısından kullanışlıdır. Ayrıca sismik kırılma, sismik yansıma, rezistivite, radar, mikrotremor gibi arazi deneyleri yöntemleri de zeminlerin kayma dalgası hızı ve hakim periyodu gibi özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Livaoğlu ve diğ., 2019).

Zeminlerin sahip oldukları fiziksel ve dinamik özellikleri saptamak için laboratuvar ortamında örselenmiş ve örselenmemiş numuneler kullanılarak deneyler yapılmaktadır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerden düşük deformasyon deneyleri tahribatsız deneyler olarak, yüksek deformasyon deneyleri tahribatlı deneyler olarak sunulmaktadır. Zemin tabakaları düşük kayma deformasyonu seviyesinde doğrusal elastik davranış göstermektedir ve bu seviye için geçerli olan deneyler rezonant kolon, bender eleman ve ultrasonik dalga deneyleri olarak sayılabilir (Yu ve Shan, 2017). Bu deneyler ile zeminlerin kayma dalgası hızı, sönüm oranı, kayma modülü gibi dinamik parametreleri hesaplanabilmektedir.

Zeminler yüksek deformasyon seviyelerinde yapısal değişikliklere uğramaktadır. Yüksek kayma deformasyonu seviyesinde yapılan deneyler drenajlı ve drenajsız koşullarda gerçekleşmektedir. Ayrıca boşluk suyu basıncı ölçümü yüksek kayma deformasyonu seviyesindeki deneylerde önemlidir. Bu deneyler dinamik basit kesme, dinamik burulmalı kesme, dinamik üç eksenli deneyleri olarak sayılabilir. Yüksek kayma deformasyonunda gerçekleştirilen deneyler genel olarak zemin sıvılaşmasını araştırmak için kullanılmaktadır (Nikitas ve diğ., 2017).

Laboratuvar ortamında ayrıca model deneyleri yapılmaktadır. Bu deneylerde sınır koşullarının birebir ölçekteki prototipleri hazırlanarak tekrarlı yüklemelerin etkisinin taklit edilmesini amaçlanır. En çok kullanılan model deneyler sarsma tablası ve santrifüj deneyleridir (Iglesia ve diğ., 2014).

Arazi deneyleri zemin özelliklerini mevcut doğal koşulları ile incelemeye imkan tanımaktadır. Laboratuvar ortamında yapılan deneylere göre daha büyük hacimli zemin kütleleri ile deney yapılabilmesi arazi deneylerini önemli kılmaktadır. Ancak boşluk suyu basıncı oluşumunun veya değerlerinin kontrol altında olmaması arazi deneylerinin dezavantajlarıdır. Arazi deneyleri yüzey sismik yöntemleri ve kuyu içi deneyler olarak ikiye ayrılmaktadır. Yüzeyde yapılan deneyler daha ucuz ve pratik olmasına rağmen kuyu içi yöntemler daha doğru ve geniş kapsamlı bilgiler vermektedir.

Zemin tabakalarının dinamik davranışını belirleyebilmek ve deprem sonucunda oluşacak hasarı önleyebilmek için dinamik zemin parametrelerinin belirlenebilmesi çok önemlidir. Arazi deneylerinin ve laboratuvar deneylerinin birbirleri üzerinde avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde arazi ve laboratuvar deneyleri birlikte kullanılmalıdır.

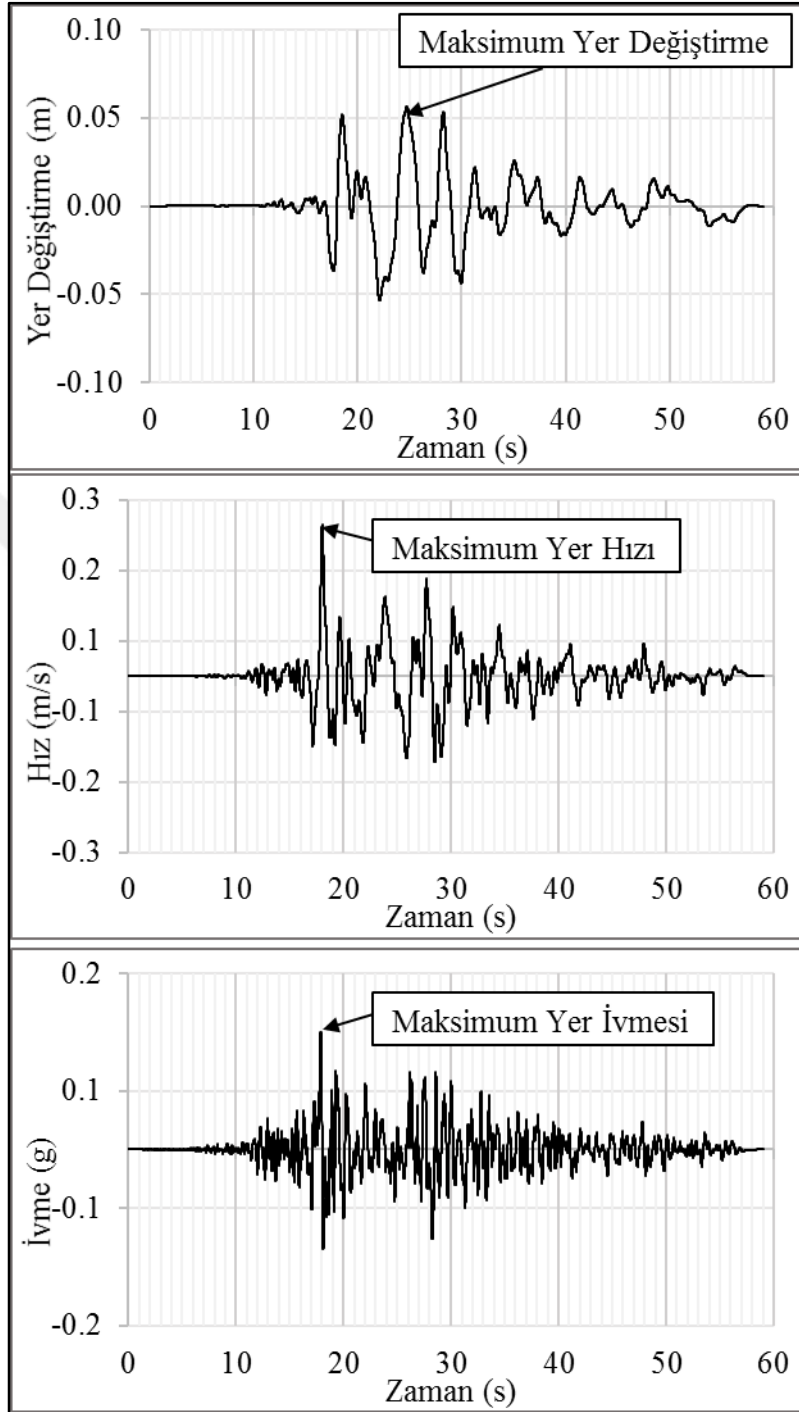
2.4 Deprem Özellikleri ve Deprem Kaydı Seçimi

Deprem yer hareketi kayıtları belirlenen istasyonlarda sismik kayıt cihazları ile zaman tanım alanında alınmaktadır. Bu kayıtların genlikleri yer değiştirme, hız ve ivme olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu kayıtlar matematiksel olarak integral veya türev alınarak birbirlerine dönüştürülebilmektedir.

Yer hareketini tanımlarken en çok kullanılan genlik parametresi maksimum yer ivmesidir (PGA). Maksimum yer ivmesi depremin ivme-zaman kaydından okunan mutlak değerce en büyük yatay ivme değeridir. Depremin hız-zaman kayıtlarındaki en büyük yatay hız değeri maksimum yer hızı (PGV), yer değiştirme-zaman kayıtlarındaki en büyük değer ise maksimum yer değiştirme (PGD) olarak adlandırılır. Şekil 2.13'te kuvvetli yer hareketi kaydı için yer değiştirme-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri ile maksimum yer değiştirme, maksimum yer hızı ve maksimum yer ivmesi gösterilmiştir.

Sismik yer hareketi genel olarak yatay ivmeler ile tanımlanmaktadır. Bunun en önemli sebepleri yatay ivmelerin atalet kuvvetleri ile bağdaştırılabilmesi ve gerçekte oluşan büyük dinamik kuvvetlerin maksimum yer ivmesi ile yakından ilişkili olmasıdır. Bunun yanı sıra düşey ivmelerin sismik yer hareketi için yatay ivmeler kadar önemli olmamasının sebebi yer çekimi nedeniyle yapılarda oluşan statik yüklerin depremler

sırasında oluşan dinamik yüklere karşı emniyet payının yüksek olmasıdır (Kramer, 1996).



Şekil 2.13 : Deprem kayıtlarının alınması.

Maksimum yer ivmesi yer hareketinin göreceli olarak yoğunluğunu tanımlamakta faydalı olsa da döngüsel olarak etkiyen sismik yer hareketinin frekans veya periyot içeriği hakkında bir bilgi vermemektedir. Yüksek periyot içeriğine sahip veya düşük periyot içeriğine sahip olan binalar sismik yer hareketlerinden farklı olarak

etkileneceği için deprem hareketinin frekans tanım alanında yorumlanabilmesi gerekmektedir (Freeman, 2007). Sönüm oranı, rijitliği ve kütlesi belli olan tek serbestli dereceli bir sistemin deprem etkisiyle gösterdiği tepkinin zamana bağlı değişimi incelendiğinde en büyük mutlak ivme değerine spektral ivme denir (İyisan ve Haşal, 2012). İvme-zaman olarak alınan deprem kayıtları dönüşüm yapılarak her bir periyot veya frekans değerine karşılık gelen spektral ivmelerin grafik olarak çizilmesi ile deprem ivme spektrumları elde edilmektedir.

Deprem hareketi Fourier spektrumu, güç spektrumu ve tepki spektrumu olmak üzere 3 farklı yer hareketi spektrumu ile tanımlanmaktadır. Bunlardan ilki olan Fourier spektrum, deprem girdi hareketinin ters Fourier dönüşümü yapılması ile elde edilen spektrumlardır. Fourier genliği ile frekans arasındaki ilişkiyi gösteren spektruma Fourier genlik spektrumu, Fourier faz açısı grafiğini gösteren spektruma Fourier faz spektrumu denir. Fourier genlik spektrumu hareketin genliğinin frekans veya periyota göre nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu spektrumun dar olması durumunda yer hareketinin düz, yaklaşık olarak sinüsoidal ve baskın periyota sahip bir hareket olduğu; geniş olması durumunda daha düzensiz ve çok değişik periyotlarda gerçekleşen bir hareket olduğu sonucu çıkarılabilir. Bir diğer yer hareketi spektrumu güç spektrumlarıdır. Güç spektrumları ile yer hareketinin istatistiksel özellikleri bulunabilir ve deprem rastgele bir süreç olarak tanımlanabilir. Üçüncü ve en yaygın olarak kullanılan spektrum tepki spektrumudur. Tepki spektrumu, tek serbestlik dereceli bir sistemin belirli bir girdi hareketine verdiği maksimum tepkileri farklı periyot değerleri ve sabit sönüm oranı için tanımlamaktadır (Kramer, 1996).

Depremleri tanımlamak için kullanılan bir özellik depremin büyüklüğüdür. Çoğunlukla aletsel ölçümler ile yapılan kayıtlar sonucunda elde edilen deprem büyüklüğü yer altında oluşan hareketin enerjisinin yorumlanabilmesi için geliştirilmiş bir kavramdır. Deprem enerjisinin doğrudan ölçülebilmesi mümkün değildir. Richter (1930) tarafından geliştirilen yöntem ile deprem büyüklüğü magnitüd olarak tanımlanmıştır. Deprem büyüklüğünün 1 manitüd artması 32 kat enerji artışı olarak yansımaktadır (Kramer, 1996).

Kuvvetli yer hareketinin yeryüzünde hissedildiği bölgedeki etkisinin tanımlanması deprem şiddeti ile olur. Deprem şiddeti yapılar ve insanlar üzerinde oluşan etki olarak tanımlanabilir (Onur, 2007). Depremin şiddeti depremin büyüklüğü hakkında tam bilgi vermez. Çünkü sağlam yapıların olduğu bir bölge ile zayıf yapıların olduğu bölge aynı

depremden farklı olarak etkilenir ve bu bölgelerde depremin şiddeti birbirinden farklı olur (Celep ve Kumbasar, 2004). En yaygın kullanılan deprem şiddeti ölçeği geliştirilmiş Mercalli ölçeğidir. I'den XII'ye kadar ölçeklendirilen deprem şiddetlerinde bu değer büyüdükçe depremin yaratacağı hasar büyümektedir.

Deprem sonucunda zemin tabakalarında ve üstyapılarda oluşacak hasarı etkileyen bir diğer parametre kuvvetli yer hareketinin sarsıntı süresini, frekans içeriğini yansıtan ve deprem süresince gerçekleşen enerji boşalımını yatay ve düşey ivmelerin toplamı şeklinde gösteren Arias şiddeti (I_a) kavramıdır. Arias şiddeti değeri depremlere ait birçok özelliği yansıttığı için maksimum yer ivmesi değerlerinin yanında zemin tabakalarında herhangi bir depreme ait hasarın öngörülebilmesinde tercih edilmektedir. Özellikle deprem ivme kayıtlarında maksimum yer ivmesi değerinin birden farklı sürelerde olması durumunda bu değer yorumlama açısından tercih edilmektedir (Ulamış, 2019). Depremin etkisinin öngörülmesi için kullanılan Arias şiddeti değeri Denklem 2.6 ile ifade edilmektedir (Fahjan, 2008). Burada $a(t)$ deprem kaydındaki ivme genliklerini, T_s kaydın toplam süresini ifade eder

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_s} a^2(t) dt \quad (2.6)$$

Deprem kayıtları saha davranışı analizlerinde kullanılarak zemin tabakalarında oluşacak şekil değiştirmeler ve deplasmanlar saptanmaktadır. Bu dinamik analizlerde anakaya mostrasında kaydedilmiş gerçek deprem kayıtlarının yanı sıra sahaya özel tasarım ivme spektrumuna benzeştirilmiş kayıtlar ve bu spektrum ile uyumlu olan yapay deprem kayıtları kullanılabilir. Gerçek deprem kayıtları genlik, hareketin süresi, faz özellikleri ve frekans içeriği gibi bilgileri içerir. Bu kayıtlar ayrıca kaynak özellikleri ve dalgaların yayılım gösterdiği zeminlerin özellikleri gibi faktörleri de yansıtmaktadır (Fahjan, 2008). Analizlerde incelenen bölgede kullanılacak deprem ivme kaydı seçilirken kaydın fay mekanizması, deprem büyüklüğü ve fay uzaklığı gibi sismik koşulların bölge ile uyumu şartı göz önünde tutulur. (Ansal ve Tönük, 2011). Bunların yanında yerel bir saha için deprem kaydı seçimi yapılırken hedef büyüklüğe ± 0.25 yakınlıkta kayıt seçilmesi önerilmektedir (Stewart ve diğ., 2002).

3. DİNAMİK DAVRANIŞ ANALİZLERİ

Kuvvetli yer hareketi sonucunda mühendislik yapılarında oluşacak hasarı etkileyen en önemli olgulardan biri zemin tabakalarının deprem sırasında göstereceği davranıştır. Bu davranışı saptayabilmek için farklı sayısal analizler geliştirilmiştir. Geliştirilen sayısal analizler deprem saha davranışı analizi olarak kullanılmaktadır. Sayısal analizler tasarım spektrumunun oluşturulmasında, dinamik gerilmelerin ve deformasyonların değerlendirilmesinde, sıvılaşma ve zemin büyütmesinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Depremlerin yapı tasarımı üzerindeki kritik tarafı beklenen deprem hareketinin zemin koşulları tarafından nasıl etkileneceği tahmin etmektir. Çoğu durumda yer sarsıntısındaki zemin koşullarının etkileri dinamik simülasyonlar ile hesaplanmaktadır. Analizler ile kayadaki ivme kayıtları yerel zemin profili içinde yayılarak zemin yüzeyindeki ivme zaman kayıtları hesaplanır. Sismik saha davranışı analizi ile yüzeydeki ivme-zaman eğrileri, ivme tepki spektrumu ve zemin büyütmesi değerlerinin yanında kayma gerilmesi ve kayma şekil değiştirmelerinin değişimi hesaplanmaktadır. Bu analizlerde 4 ana belirsiz parametre vardır; deprem girdi hareketinin seçimi, zemin kayma dalgası hızı profili, doğrusal olmayan zemin parametrelerinin belirlenmesi ve analiz yöntemlerinin seçimi (Rathje ve diğ., 2010).

Zemin tabakalarının deprem hareketi ile uğrayacağı deformasyon dinamik etkiyi değerlendirmede en önemli parametrelerden biridir. Ishihara (1996) yaptığı çalışmada kayma deformasyonunun (γ) 10^{-3} olduğu andan itibaren zeminlerin doğrusal olmayan davranış gösterdiğini ve $\gamma > 10^{-1}$ olduğundan itibaren de zeminlerde büyük deformasyonlar ve göçmeler oluştuğunu gözlemiştir. Yapılan çalışmaya göre zeminlerin deformasyon seviyelerine göre mekanik davranışı ve etkiler Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Yüzeydeki zeminlerin ortalama kayma şekil değiştirme değerleri γ , basitçe Denklem 3.1 ile hesaplanabilir (Nakamura, 1997).

$$\gamma = A_g \times \delta / H \quad (3.1)$$

Çizelge 3.1 : Zeminin dinamik davranışı ve deformasyon seviyeleri (Ishihara, 1996)

Deformasyon γ (%)	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10
Zemin Davranışı		Elastik		Elasto-Plastik		Göçme
Olgu		Dalga Yayılımı, Titreşim		Çatlaklar, Farklı Oturma		Şev Kayması, Sıkışma, Sıvılaşma

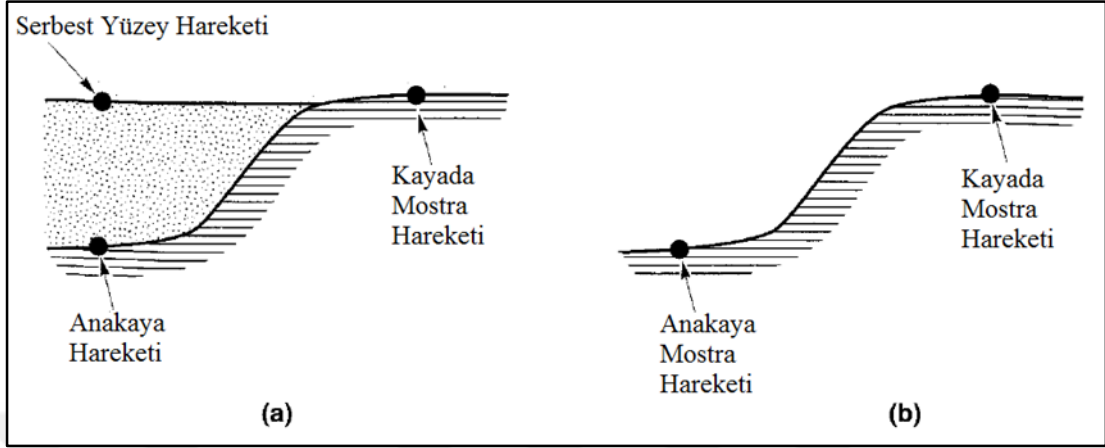
Zemin tabakalarının özellikleri deprem sırasında etkilenerek üstyapılarda hasara yol açabilmektedir. Bunun için analiz yapılırken doğru analiz çeşidinin seçilmesi önemlidir. Kullanılan yöntemler 1 boyutlu, 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmektedir. Topoğrafik etkilerin ve arazi geometrisinin ön plana çıktığı sahalarda 2 veya 3 boyutlu analizlerin seçilmesi önerilmektedir. Topoğrafik koşulların yer hareketi üzerindeki genlik, enerji ve frekans içeriği açısından etkileri çeşitli araştırmacılar tarafından çalışılmıştır (Assimaki ve diğ., 2005; Flores-Estrella ve diğ., 2007; Rizzitano ve diğ., 2014).

Bu bölümde sismik saha davranışı analizi yapılırken kullanılan analiz yöntemlerinden, deprem dalgalarının genliklerinin zemin tabakalarının özellikleri ile artıp azalması sonucu oluşan zemin büyütmesinden, zeminlerin sismik davranışını modelleyebilmek için geliştirilen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin (2018) ilgili bölümlerinde ve bu saha davranışı analizleri kullanılarak araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan bahsedilecektir.

3.1 Saha Davranış Analiz Yöntemleri

Kuvvetli yer hareketi ile oluşan deprem dalgaları her yöne doğru yayılarak yeryüzüne ulaşırken zemin tabakaları bu yayılım sırasında bir tepki göstermektedir. Deprem etkilerinin ve zemin tepkilerinin öngörülebilmesi için dinamik saha davranışı analizleri yapılmaktadır. Tepki analiz modellerini tanımlamadan önce yer hareketini açıklamak için kullanılan bazı terimlerin bilinmesi gerekmektedir. Şekil 3.1'de gösterildiği üzere zemin yüzeyinde meydana gelen hareket serbest yüzey hareketi olarak tanımlanır. Zemin tabanındaki veya anakayanın üst noktasındaki hareket anakaya hareketi, anakayanın yeryüzüne çıktığı yerde meydana gelen hareket kayada mostra hareketi, zemin tabakasının bulunmadığı durumda anakayanın üst noktasında meydana gelen hareket ise anakaya mostra hareketi olarak tanımlanır (Kramer, 1996). Zemin tepki

analizleri gerçekleştirilirken anakayanın durumu dikkate alınmalıdır. Tepki analizlerinde kullanılan ivme kayıtları açısından daha önce gerçekleşen depremlerde kuvvetli yer hareketi kaydının nerede alındığı önemlidir.



Şekil 3.1 : Zemin tepki tanımlaması (Kramer, 1996).

Zemin tepki analizleri 1 boyutlu, 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak yapılabilmektedir. 1 boyutlu tepki analizleri genellikle zemin tabakalarının yatay olarak yerleşim gösterdiği bölgelerde tercih edilmektedir. 1 boyutlu analiz zemin tabakalarının yatayda sınırlı bir genişliğe sahip olmadığı kabulüne dayanmaktadır. 2 ve 3 boyutlu analizler anakayanın eğimli olduğu veya zemin tabakalarında jeolojik ve topoğrafik düzenliklerin olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Dar ve derin ova modelleri için dinamik analiz yapılırken iki veya üç boyutlu rezonans durumu ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle bu gibi koşullarda 1 boyutlu analiz yetersiz kalabilmektedir (Pitilakis, 2004). Güçlü yer hareketi ile yüzeye yakın zemin tabakalarında oluşan kayma şekil değiştirmelerin saptanabilmesi için 1, 2 ve 3 boyutlu saha davranışı analizleri farklı modeller ve hesaplamalar ile yapılmaktadır. 1 boyutlu analizler için zemin tabakalarının kalınlığı ve dinamik parametreleri ile anakaya derinliği yeterli olurken 2 veya 3 boyutlu analizler için 2 ve 3 boyutlu geometriler ve başlangıç koşulları belirlenmelidir (Subaşı ve diğ., 2019).

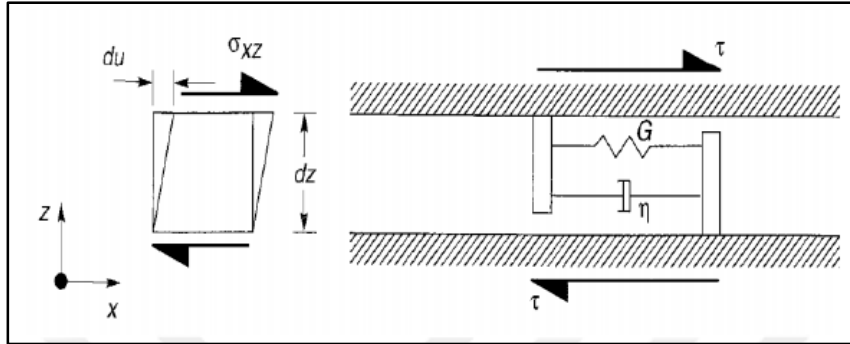
2 boyutlu analizler topoğrafik düzensizliklerin ivme büyütmesi üzerinde olan etkisinin daha doğru yansıtılabilmesi açısından 1 boyutlu analizlere göre tercih edilmektedir. 1 boyutlu ve 2 boyutlu analizler topoğrafik düzensizliklerin göz ardı edilebileceği, eğimin az olduğu sahalarda benzer ivme büyütmesi değerleri vermektedir (Capilleri ve diğ., 2018). Bir boyutlu dinamik saha davranış analizleri zemin tabakalarının hakim periyot aralıklarında göstereceği davranışın modellenmesinde yaygın olarak

kullanılmaktadır (Selçuk ve diğ., 2007). Ayrıca zeminlerin yatay tabakalandığı koşullarda 1 boyutlu yerel saha davranışı analizlerinin pratik olarak sonuç vermesi tercih edilmesini artırmaktadır (Phillips ve Hashash, 2009; Kaklamanos ve diğ., 2015; Jeong ve Bradley, 2017; Khanbabazadeh ve diğ., 2018).

Zeminleri homojen olmayan yapıda oldumaları nedeniyle dinamik tepki analizlerinin yapılabilmesi için farklı analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler; zeminin basit olarak modellendiği doğrusal analiz yöntemi, zeminin karmaşık olan yapısının daha iyi yansıtabilmek için geliştirilen doğrusal olmayan analiz yöntemi ve doğrusal analiz yöntemine göre zemin tabakalarının özelliklerinin daha ayrıntılı modellendiği ve doğrusal olmayan analiz yöntemine göre daha basit bir çözüm yöntemi olan eşdeğer doğrusal analiz yöntemidir.

3.1.1 Doğrusal analiz

Doğrusal saha davranışı analizi her zemin katmanının kendisi için sabit sönüm oranı ve kayma modülüne sahip olması mantığına dayanmaktadır. Zemin Kelvin-Voight katısının özelliklerine sahip bir malzeme olarak modellenmektedir ve Kelvin-Voight katısı modeli Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu analiz yöntemi genellikle düşük kayma şekil değiştirmelerinin olduğu mertebelerde kullanılmaktadır (Bardet ve Lin, 2000).



Şekil 3.2 : Kelvin-Voight katısı modeli.

Kelvin-Voight katısı şeklinde modellenen zemin için kayma gerilmesi, Denklem 3.2 ile tanımlanmıştır. Bu denklemde G kayma modülü η sönümleyiciyi ve γ kayma deformasyonunu temsil eder.

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\delta\gamma}{\delta t} \quad (3.2)$$

Doğrusal saha davranışı analizlerinde Fourier transfer fonksiyonları kullanılmaktadır. Fourier transfer fonksiyonları ile deplasman, hız, ivme, kayma gerilmesi ve kayma deformasyonu gibi tepki parametreleri anakaya ivmesi gibi girdi parametreleri kullanılarak bulunabilmektedir. Transfer fonksiyonu ile dönüşüm ve ters dönüşüm yapılarak istenen çıktı parametrelerini elde etmek doğrusal saha davranışı analizleri ile sınırlı olsa da doğrusal olmayan analiz yapılabilmesi için eşdeğer doğrusal analiz parametrelerinin iterasyonlar ile belirlenmiş olması gerekmektedir.

Hızlı Fourier transfer fonksiyonu kullanılarak zamana bağlı anakaya girdi hareketi zemin yüzeyi çıktı hareketine dönüştürülebilir. Bu zemin yüzeyi çıktı hareketinin Fourier serisi elde edilmiş olur. Dönüşüm ve ters dönüşüm yapılarak girdi hareketinin Fourier serisi ile zemin yüzeyi çıktı hareketinin Fourier serisi arasında dönüşüm yapılabilir. Kaya tabakası üzerinde zemin tabakasının bulunduğu durumlar için doğrusal saha davranışı analizleri 3 farklı doğrusal transfer fonksiyonu denklemi ile değerlendirilmektedir (Kramer, 1996). Zeminler doğrusal davranış gösterecek yapıda olan malzemeler değildir. Bu nedenle doğrusal saha davranışı analizi zemin davranışını yansıtmaya açısından yetersiz kalmaktadır.

3.1.2 Eşdeğer doğrusal analiz

Eşdeğer doğrusal saha davranışı analizi temeli SHAKE programına dayanan, dinamik yükler altında zemin tabakalarının davranışının doğru modellenebilmesi için geliştirilen pratik bir analiz yöntemidir. Zeminin dinamik özelliklerini yansıtan kayma modülü ve sönüm oranının yinelemeli parametre olarak kullanılması ile eşdeğer doğrusal saha davranışı analizi yapılmaktadır (Hashash ve diğ., 2016).

Eşdeğer doğrusal model zeminin doğrusal olmayan davranışını yansıtan, en yaygın kullanılan modeldir. Bu yaklaşım Schnabel ve diğerleri (1972) tarafından zeminin doğrusal olmayan ve elastik olmayan tepkisini yansıtmak için geliştirilmiştir. Eşdeğer doğrusal analiz yönteminde belirlenmiş kayma şekil değiştirme seviyeleri için saptanan zemin parametreleri ile yinelemeli olarak analiz yapılır. Huang ve diğerleri (2001) çalışmalarında eşdeğer doğrusal analizin doğrusal analize göre daha yüksek maksimum ivme değerleri sonucu verdiğini saptamıştır. Çünkü bu metot ile daha yüksek frekans aralığında hesaplamalar yapılabilir (Arslan ve Siyahi, 2006).

Eşdeğer doğrusal analizlerde kullanılan parametreler birim hacim ağırlık (γ), kayma dalgası hızı (V_s), sönüm oranı (D) ve deprem girdi parametreleridir. Analizlerde

kayma modülü (G) ve sönüm oranı (D) parametreleri her zemin tabakası için efektif kayma birim şekil değiştirmesine bağlı olarak iteratif bir şekilde hesaplanmaktadır (Kaklamanos ve diğ., 2015).

Doğrusal olmayan zemin parametreleri genellikle kayma modülü azalım ($G/G_{maks-\gamma}$) ve sönüm oranı ($D-\gamma$) eğrileri ile tanımlanır. Bu doğrusal olmayan zemin parametreleri, laboratuvar ortamında örselenmemiş numuneler üzerinde yapılacak deneyler ile hesaplanabilir. Bu yöntemde zemin tabakalarının döngüsel yüklemeler altında doğrusal olmayan ve histeretik gerilme şekil değiştirme davranışları modellenmektedir. Burada eşdeğer doğrusal kayma modülü sekant kayma modülüdür (G_{sek}). Sekant kayma modülü denklem 3.3'te gösterildiği üzere birim şekil değiştirme genliğine bağlı olarak değişmektedir.

$$G_{sek} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (3.3)$$

Bu denklemde τ_c kayma gerilmesini γ_c kayma birim deformasyonu genliğini ifade etmektedir. Eşdeğer doğrusal sönümlenme oranı (D) zemin tabakasının histeretik davranışını tekrarlı yükleme olmadan tek gerilme-birim şekil değiştirme döngüsünde yansıtan sönümlenme oranıdır (Bardet ve diğ., 2000).

Eşdeğer doğrusal saha davranışı analizi yüksek şekil değiştirme seviyelerinde kullanılmamaktadır ve bu durumlarda doğrusal olmayan saha davranışı analizlerinin yapılması önerilmektedir (Rathje ve diğ., 2010).

3.1.3 Doğrusal olmayan analiz

Eşdeğer doğrusal analiz pek çok problem için yeterli sonuç vermesine rağmen zeminin gerçek davranışını yansıtmamaktadır. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Zemin tabakalarının sismik davranışını yansıtmak için kullanılan bir diğer analiz yöntemi zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizdir. Doğrusal olmayan analizler zaman tanım alanında hareket denkleminin kısa zaman aralıkları için integrasyonu ile yapılmaktadır (Kaklamanos ve diğ., 2015).

Zemin tabakaları özellikle yüksek deformasyon seviyelerinde doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Zemin tabakalarının tekrarlı olarak yüklenmesine sebep olan deprem yer hareketi gibi dinamik yükler altındaki davranışının en doğru olarak

modellenmesi doğrusal olmayan saha davranışı analizi ile yapılmaktadır.ve doğrusal olmayan analizler için Denklem 3.4 ile gösterilen formül esas alınmaktadır (Phillips ve Hashash, 2009).

$$[M](\ddot{u}) + [c](\dot{u}) + [K](u) = -[M(I)\ddot{u}_g] \quad (3.4)$$

Burada M kütle matrisini, c vizkoz sönüm matrisini, K rijitlik matrisini $\ddot{u}$ relatif ivmeyi, $\dot{u}$ relatif hızı, u relatif deplasmanı göstermektedir. Bu analiz yöntemi Newmark β methoduna dayanmaktadır.

Tekrarlı olarak yüklenen zeminde kayma şekil değiştirmeleri değişkenlik göstermektedir. Bu konuda birçok çalışma yapılmış ve birçok doğrusal olmayan model ortaya konmuştur. Bu modellerin ortak özelliği olarak omurga eğrisinin, yükleme boşaltma davranışının ve bu özelliklere bağlı olarak rijitlik düşüşünün yansıtılmasıdır. Doğrusal olmayan saha davranışı analizinde kullanılan modeller omurga eğrisinin tanımlanması ile açıklanabilir. Omurga eğrisinin şekilleri zeminlerin düşük birim deformasyon rijitliği ve kayma dayanımıdır. Omurga eğrisi denklem 3.5'te gösterildiği üzere hiperbolik fonksiyon olarak tanımlanmaktadır (Kramer, 1996).

$$F_{bb}(\gamma) = \frac{G_{\max}\gamma}{1 + (G_{\max}/\tau_{\max})|\gamma|} \quad (3.5)$$

Doğrusal olmayan analizlerde en yaygın olarak kullanılan hiperbolik model orijinali Kondner ve Zelasko tarafından geliştirilen KZ modeli üzerinde Matasović ve Vucetic'in (1993) çalışmaları ile oluşturulan MKZ modelidir. Bu modelde doğrusal olmayan histeresis eğrileri, modül azalım ve sönüm oranı eğrilerinin fitlenmesi ile tanımlanmıştır. Bu model için geliştirilen hiperbolik formül Denklem 3.6'da verilmiştir.

$$\tau = \frac{G_0\gamma}{1 + \beta\left(\frac{G_0}{\tau_0}\gamma\right)^s} = \frac{G_0\gamma}{1 + \beta\frac{(\gamma)^s}{\gamma_r^s}} \quad (3.6)$$

Burada G_0 başlangıç durumundaki kayma modülünü, τ_0 başlangıçtaki kayma dayanımını γ_r referans kayma deformasyonunu gösterirken, β ve s azalım eğrileri üzerinden hesaplanan model parametreleridir.

Referans kayma deformasyonu efektif gerilme ile ilişkilendirilerek Denklem 3.7 ile hesaplanabilmektedir (Hashash ve Park, 2001). Bu denklemde σ' efektif gerilmeyi a ve b eğri uygunluk parametrelerini ve $\sigma_{ref}=0.18$ Mpa olan referans gerilmeyi temsil eder.

$$\gamma_r = a \left(\frac{\sigma'}{\sigma_{ref}} \right)^b \quad (3.7)$$

Doğrusal olmayan analizlerde zeminler farklı dinamik özelliklere bağlı olabilmektedir. Yapılan çalışmalarda kayma modülü azalım ve sönüm oranı eğrileri plastisite indisine, efektif gerilmeye, aşırı konsolidasyon oranına, yükleme frekansına ve yüklenmenin döngü sayısına bağlı olarak tanımlanmıştır (Rathje ve diğ., 2010).

Eşdeğer doğrusal veya doğrusal olmayan analizler yapıldığında aralarındaki farklar kıyaslanacak olursa buradaki kritik nokta zemin davranışının doğrusal olmayan davranış göstereceği aralığa olan yakınlığıdır. Zeminlerin sert olduğu veya girdi hareketinin büyüklüğünün ve ivmesinin çok yüksek olmadığı analizlerde eşdeğer doğrusal analiz ile doğrusal olmayan analiz benzer sonuçlar verebilir. Yüksek birim deformasyonların oluşacağı deprem hareketi veya zemin tabakaları ile yapılan analizlerde doğrusal olmayan analiz seçeneği daha doğru sonuçlar verecektir.

3.2 Zemin Büyütmesi

Deprem anında meydana gelen sismik dalgalar zemin yüzeyine ulaşana kadar farklı geoteknik ve jeolojik özelliklere sahip tabakalardan geçmektedir. Zemin tabakalarının özellikleri, deprem dalgalarının sönümlenmesine veya genliklerinin artmasına sebep olmaktadır. Deprem dalgaları yüzeye ulaşırken anakayaya göre daha yumuşak zemin tabakalarından geçmektedir ve bu durum genellikle genliklerinde artışa neden olmaktadır. Deprem dalgalarının zemin tabakalarından geçerken genliklerinde meydana gelen artım veya azalım zemin büyütmesi olarak tanımlanır. Zemin büyütmesi anakaya derinliği, anakaya üzerinde yer alan tabakaların kalınlıkları ve bu tabakaların kayma modülü, sönüm oranı ve bunların deformasyon ile değişimi gibi dinamik zemin özelliklerinin yanında zemin tabakalarının yatay olarak düzensizliği ve topoğrafik özellikler gibi koşullardan etkilenmektedir (İyisan ve Haşal, 2012).

Zemin büyütmesi hemen her deprem hareketinde yerel zemin koşullarına bağlı olarak farklı değerlerde ortaya çıkmaktadır. Zemin büyütmesinin ana sebebi zemin tabakaları ile kaya arasındaki empedans farkı nedeniyle sismik dalgaların yumuşak zemin tabakalarında sıkışmasıdır. Bu durum düşünüldüğünde ilgilenilen sahada anakaya derinliğinin az olması koşullarında büyütme değerlerinin daha düşük olabileceği sonucuna varılabilir. Bununla birlikte derin alüvyon tabakaların bulunduğu sahalarda tabakaların özellikleri zemin büyütmesini fazlaca etkilemekte ve deprem dalgalarının genliklerinin önemli ölçüde artması beklenmektedir. Yüzeye yakın zemin tabakaları düşük yoğunlukları, yüksek sıkıştırılabilirlik ve düşük mukavemetleri nedeniyle sismik genliklerinde yüksek büyütme değerlerine neden olabilir (Livaoğlu ve diğ., 2019).

Mühendislik yapılarında hasar değerlendirmesi genellikle rezonans frekansı ve zemin büyütmesi ile ilişkilendirilir (Cara ve diğ., 2008). Zemin büyütmesi zemin tabakasına ait ivme değerinin anakayadaki ivme değerine oranlanması ile bulunmaktadır. Bu oranlama zaman tanım alanında ve frekans tanım alanında olarak 2 şekilde yapılmaktadır.

Dinamik analizler sonucunda yeryüzünde hesaplanan maksimum ivme anakayadaki maksimum ivmeye bölünerek zaman ortamındaki zemin büyütme değerleri hesaplanır (İyisan ve Haşal, 2006). Diğer hesaplama yönteminde ise spektral ivmelerin aynı periyot değerlerinde oranlanması söz konusudur. Yüzey tepki spektrumu ile deprem spektrumundaki ivme değerlerinin oranlanması ile aynı frekanstaki spektral zemin büyütme değerleri belirlenir. Zemin büyütme analizlerinde eşdeğer doğrusal modeller en yaygın olarak kullanılan modellerdir. Bu model kullanımında mühendislik anakayasına kadar tüm zemin tabakalarının kayma dalgası hızları ve her tabaka için kayma modülü deformasyon ilişkisi ile sönüm oranı deformasyon ilişkisinin bilinmesi gerekir (Ansal ve diğ., 2010).

3.3 Yerel Zemin Sınıfları ve Tasarım Spektrumları

Zeminler statik ve dinamik özellikleri dikkate alınarak yönetmeliklerce sınıflandırılmaktadırlar. Bu bölümde 2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamında kullanılan zemin sınıflandırmaları ve saha tepki analizleri ile ilgili bilgiler incelenmiştir. Bu yönetmeliğe göre zemin sınıfları ve zemin özellikleri detaylanarak açıklanmıştır. Yönetmelik yeniden yapılacak, değiştirilecek, büyütülecek bina veya bina türü yapıların tasarımı ve yapımı ile mevcut binaların deprem etkisi

altındaki performansının değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi için minimum koşulların belirlenebilmesi amacı ile oluşturulmuştur.

Türkiye Bina Deprem yönetmeliği kapsamında yerel zemin koşullarının belirlenebilmesi için arazi ve laboratuvar çalışmalarını içeren zemin araştırmaları yapılması kararlaştırılmıştır. Zemin araştırmaları zemin tabakalarının özelliklerinin, çevredeki yapıların durumunun, yeraltı suyu durumu ve bölgenin depremselliği ile birlikte sondaj kuyuları veya muayene çukurlarının açılıp gerekli arazi deneylerinin uygulanmasını ve araziden uygun yöntemlerle alınacak zemin numunelerinin laboratuvar deneylerine tabii tutulmasını içermektedir. Deprem yönetmeliği kapsamında yer alan yerel zemin sınıfları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ (m/s)	$(N_{60})_{30}$ (darbe/30 cm)	$(C_u)_{30}$ (kPa)
ZA	Sağlam sert kayalar	>1500	-	-
ZB	Az ayrılmış orta sağlam kayalar	760-1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	360-760	>50	>250
ZD	Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180-360	15-50	70-250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya $PI > 20$ ve $w > 40\%$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	<180	<15	<70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gereken zemin tabakaları: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Yönetmelik kapsamın zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan kayma dalgası hızı (V_s) arazide yapılacak jeofizik deneyler ile belirlenebilir veya standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon deneyi (CPT) ile bağımlı formuller kullanılarak hesaplanabilir. Yerel zemin sınıflandırılması yapılırken kayma dalgası hızının yanında, SPT darbe sayısı ve kohezyonlu zeminler için uç mukavemeti değerleri dikkate alınır.

Sahaya özel yapılan deprem analizleri ve dinamik zemin yapı etkileşimi analizlerinde, deprem dalgalarının zemin tabakaları içinde yayılımı sonucu oluşan kayma birim şekil değiştirmesi ile uyumlu kayma modülü ve eşdeğer histeretik sönüm katsayısı kullanılacaktır (TBDY, 2018). Analizlerde maksimum kayma modülü, Denklem 3.8 kullanılarak belirlenecektir.

$$G_{maks} = \rho V_s^2 \quad (3.8)$$

Çizelge 3.2’de de gösterildiği üzere ZF sınıfı zeminler sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektirirken bu sınıfın dışında yer alan zemin sınıfları (ZA, ZB, ZC, ZD, ZE) zemin profilinin temel veya kazık başlığı alt kotundan itibaren 30 metre kalınlık için zemin parametreleri belirlenerek saptanacaktır.

Sahaya özel zemin davranış analizi yapılırken bir boyutlu yatay tabakalı analiz bina temeli veya yakın çevresinin yaklaşık olarak yatay tabakalardan oluştuğu durumlarda yeterli olacaktır. Aksi durumlarda iki veya üç boyutlu analiz yapılması gerekmektedir (TBDY, 2018).

Deprem hareketi spektrumları, belirlenmiş deprem yer hareketi düzeyi esas alınarak sönüm oranının %5 olduğu durumlar için harita spektral ivme katsayılarına ve yerel zemin etki katsayılarına bağlı olarak tanımlanmaktadırlar. Tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} (Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı) ve S_{D1} (1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı) sırasıyla Denklem 3.9 ve Denklem 3.10 ile hesaplanmaktadır.

$$S_{DS} = S_s F_s \quad (3.9)$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 \quad (3.10)$$

Burada S_s ve S_1 kısa ve 1.0 sn periyot için harita spektral ivme katsayıları, F_s ve F_1 ise kısa ve 1.0 sn periyot için yerel zemin etki katsayılarıdır. Yerel zemin etki katsayılarının harita spektral ivme katsayıları ve yerel zemin sınıfına göre aldığı değerler Çizelge 3.3'te ve Çizelge 3.4'te gösterilmiştir

Çizelge 3.3 : Kısa periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	TBDY 2018 Bölüm 16.5					

Çizelge 3.3'te ve Çizelge 3.4'te belirtildiği gibi ZF yerel zemin sınıfı zeminler için sahaya özel zemin davranışı analizi yapılacaktır.

Çizelge 3.4 : 1 sn periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	TBDY 2018 Bölüm 16.5					

3.4 Zemin Koşulları ve Deprem Özelliklerinin Saha Davranışı Analizine Etkisi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde belirtildiği üzere ülkemizde yerel zemin sınıfının ZF olduğu bölgelerde yerel saha tepki analizleri yapılması zorunludur. Bunun dışında projeye göre ve geoteknik mühendisinin gerek görmesi durumunda dinamik analiz yapılması önerilmektedir. Bu kapsamda ülkemizde ve dünyada anakaya derinliğinin, zemin cinsinin, analiz çeşidinin, yüzey topoğrafyasının ve depremlere ait özelliklerin zeminlerin dinamik davranışı üzerindeki etkileri gerçekleştirilen dinamik analiz çalışmaları ile incelenmiştir (Kale ve diğ., 2008; Kaklamanos ve diğ., 2015; Subaşı ve diğ., 2017; Puri ve diğ., 2018; Civelekler ve diğ., 2018; Falcone ve diğ., 2018; Edinçliler ve Çalikoğlu, 2018).

Dinamik saha davranışı analizinin doğrusal olmayan analiz ve eşdeğer doğrusal analiz olarak yapılmasının sonuçlara etkisini görmek amacıyla Selçuk ve diğ. (2007) alüvyon

zemin modelleri kullanarak bir boyutlu dinamik saha davranışı analizleri gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar gerçekleştirilen analizler ile elde edilen sonuçları incelendiğinde doğrusal olmayan analiz ile elde edilen spektral ivmelerin eşdeğer doğrusal analiz ile elde edilen spektral ivmelerden bir miktar yüksek olduğunu saptamışlardır. Doğrusal olmayan analizlere ait sonuçlarda maksimum spektral ivmelere 0.5 saniye periyodunda, eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarında ise 0.7 saniye periyodunda ulaşmışlardır. Bunun sonucunda alüvyon zeminlerde doğrusal olmayan analizler ile yüzeydeki spektral ivmelerin daha yüksek olduğunu fakat eşdeğer doğrusal analizlerin deprem kaydının frekans içeriğini daha çok değiştirdiğini belirlemişlerdir. Spektral ivmelerin maksimum olduğu aralığın doğrusal olmayan analiz sonuçlarında eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre daha geniş olduğu görülmüştür.

İyisan ve Haşal (2011) ova kenarındaki anakaya eğiminin analiz sonuçlarına etkisini görebilmek amacıyla belirlenen 19 ayrı nokta için 6 deprem ivme kaydı kullanarak bir ve iki boyutlu eşdeğer doğrusal dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Bu analizler sonucunda zemin büyütmesi değerlerini yüzeyde elde edilen en büyük ivmenin anakayadaki en büyük ivmeye oranlanması ile elde etmişlerdir. Zemin yüzeyine en yakın tabakanın kum olması durumunda zemin büyümesi değerlerinin 2'ye, kil olması durumunda 5'e kadar çıkabildiğini saptamışlardır. Ova modelinde tepe noktada yapılan analizlerde ise zemin büyütmesinin 6'ya kadar çıkabildiği sonucu elde edilmiştir.

2014 yılında Japonya'da gerçekleştirilen bir çalışmada genellikle kil ve kayadan oluşan arazide 312 metre derinlikteki anakaya seviyesinden yüzeye kadar 5 farklı noktada 3 farklı deprem için kayıt alınmıştır. Bu 3 deprem kaydı için maksimum yer ivmeleri 0.04 g, 0.01 g ve 0.12 g değerlerindedir. Araştırmacılar alınan kayıtlardaki ivme değerlerini oranlamış ve zemin büyütmesi değerleri elde etmişlerdir. Bunun yanında oluşturulan zemin modelleri ile anakayadaki ivme kayıtları kullanılarak bir boyutlu eşdeğer doğrusal analizler gerçekleştirmişler ve 5 farklı derinlikteki maksimum ivme değerlerini her deprem kaydına ait maksimum ivmelere bölerek zemin büyütme değerlerini hesaplamışlardır. Bir boyutlu analiz sonuçları ile 5 farklı derinlikte alınan ivme kayıtları sonucunda elde edilen zemin büyütme değerlerinin uyumu karşılaştırıldığında genel anlamıyla analiz sonuçları ile ivme kayıtlarının örtüştüğünü belirlemişlerdir. Sadece PGA değerinin en düşük olduğu deprem kaydı ile yapılan

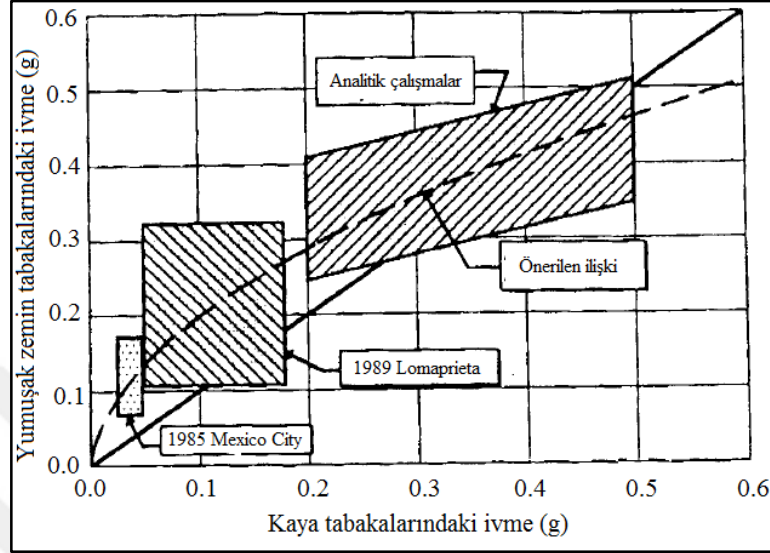
analizlerde zemin büyütmesi değerlerini ölçümlerde elde edilen değerlerden daha yüksek bulmuşlardır. Ayrıca anakayanın 312 m derinlikte olduğu derin zemin modeli kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada minimum zemin büyütmesi değerini 3 olarak elde etmişlerdir (Shylamoni ve diğ., 2014).

2018 yılında Khanbabazadeh ve diğerleri (2018) anakayanın 10° eğimli olduğu bir sahada 3 çeşit kil ve 3 çeşit kum zemin modeli kullanarak 2 boyutlu doğrusal olmayan saha davranışı analizleri gerçekleştirmişleridir. Çalışmada 16 adet deprem ivme kaydı 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g PGA değerlerine sahip olacak şekilde dörderli gruplara ayrılarak kullanılmıştır. Analizlerdeki kum modeller gevşek, orta sıkı ve sıkı kum, kil modeller yumuşak, orta katı ve katı kil olarak ayrılmıştır. Çalışmada kullanılan zemin modellerine ait kayma dalgası hızı değerlerini gevşek kumlar için 100-200 m/s, orta sıkı kumlar için 250-450 m/s, sıkı kumlar için 500-700 m/s, yumuşak killer için 75-175 m/s, orta katı killer için 200-400 m/s ve katı killer için 450-650 m/s olarak belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda farklı PGA değerleri için spektral zemin büyütmesinin havza boyunca değişimlerini elde etmişlerdir. Kumlu zeminlerde en düşük büyütme sıkı kumlarda meydana gelirken PGA değerleri yükseldikçe spektral büyütme değerlerinin genel olarak azalma davranışı gösterdiği sonucunu gözlemlemişlerdir. Kil zeminlerde en yüksek spektral büyütme yumuşak killerde elde edilmiştir ve kil zeminler farklı plastisiteye sahip olmasına rağmen genel olarak benzer spektral büyütme davranışı göstermişlerdir.

2019 yılında Mahmood ve diğ. tarafından yapılan bir diğer çalışmada bölgenin kayma dalgası hızı profili standart penetrasyon testi kullanılarak elde edilen SPT-N verileri üzerinden oluşturulmuştur. 10 metrelik zemin tabakası için kayma dalgası hızı değeri ortalama 204 m/s olarak belirtilmiştir. Oluşturulan zemin modeli üzerinde 7 farklı deprem ivme kaydı kullanılarak bir boyutlu doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar en yüksek PGA değerinin 0.22 g olduğu kayıtlar kullanılarak yapılan analizler sonucunda en büyük zemin büyütmesi değerlerini yüzeydeki ivmenin anakayadaki ivmeye oranlanması ile 2.2 olarak elde etmişlerdir (Mahmood ve diğ., 2019).

Yapılan bir diğer çalışmada 1985 Mexico City ve 1989 Lomapieta depremleri esas alınarak anakaya ve yumuşak zemin tabakalarında ölçülen ivme değerleri ile gerçekleştirilen serbest saha davranışı analizleri sonucunda elde edilen değerler

karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda deprem yer ivmesinin değişimine göre yumuşak zemin tabakalarındaki ivmelerin artışı için değişim eğrisi önerilmiştir. Şekil 3.3'te gösterildiği üzere deprem hareketine ait maksimum yer ivmesi değeri arttıkça yumuşak zemin tabakalarında oluşan zemin büyütme azalmaktadır (Idriss, 1990).



Şekil 3.3 : Kaya ve yumuşak zemin tabakalarında ivme değişimi.

Birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar ile zemin tabakalarına özelliklerinin, deprem hareketine ait özelliklerin ve yerel zemin koşullarının dinamik davranışa olan etkisi incelenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen spektrumların, zemin büyütmesi değerlerinin değişimi gösterilmiştir.

Dinamik saha davranışı analizinde kullanılan zeminlere ait dinamik parametreler ve bu parametrelerin elde edilişi ile ilgili yapılan çalışmalar ikinci bölümde anlatılmıştır. Ayrıca analizlerde kullanılan deprem kayıtlarında dikkat edilmesi gereken koşullar ve geoteknik mühendisliği açısından önemli olan deprem özellikleri de açıklanmıştır. Üçüncü bölümde dinamik saha tepki analizinin nasıl gerçekleştirileceği ve Türkiye’de 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nin ilgili kısımları anlatıldıktan sonra saha davranışı analizlerini etkileyen parametreler ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bundan sonraki bölümlerde bu çalışma kapsamında oluşturulan zemin modelleri, kullanılan deprem yer hareketleri tanıtılacak ve analiz sonuçları verilerek yorumlanacaktır.



4. ZEMİN MODELLERİ VE TEK BOYUTLU DİNAMİK ANALİZLER

Zemin tabakaları statik ve dinamik yüklemeler altında farklı davranış sergilemektedirler. Deprem gibi dinamik yüklemeye maruz kalan zemin tabakaları döngüsel bir gerilme şekil değiştirme davranışı göstermektedir. Anakayada oluşan ve yüzeye doğru ilerleyen deprem yer hareketi, içinden geçtikleri zemin tabakalarında kayma gerilmeleri ve buna bağlı olarak kayma şekil değiştirmeleri oluşturmakta, zemin davranışını etkilemektedir. Oluşan deformasyon seviyesi malzemenin doğrusal olmayan davranışına neden olmakta, yapı temellerini destekleyen zemin davranışı oluşabilecek yapısal hasarı etkileyebilmektedir. Buna karşılık zemin tabakalarının dinamik özellikleri de bazı durumlarda deprem dalgalarının frekans içeriğini değiştirip genliklerinde artışa neden olabilmektedir. Zemin büyütmesi olarak bilinen genliklerdeki bu artış, yapılara gelen dinamik kuvvetlerin belirlenmesinde önemli olmaktadır ve deprem sırasında zemin tabakalarının bu tür davranışları düşey yayılan kayma dalgası hızına bağlı olarak yapılan dinamik analizlerle incelenmektedir. Saha davranış analizleri incelenen probleme ve yerel koşullara bağlı olarak tek boyutlu veya çok boyutlu olarak yapılmaktadır.

Zeminlerin dinamik davranışını modelleyebilmek için yapılan önceki çalışmalar, zeminlerin dinamik özellikleri ve bu özelliklerin belirlenme yöntemlerine ile yerel saha davranışı analiz yöntemleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamında zeminlerin sınıflandırılması ile sahaya özgü tasarım spektrumlarının belirlenmesi önceki bölümlerde anlatılmış, zeminlerin dinamik davranışına etki eden deprem parametrelerinden bahsedilmiştir. Bu bölümde çalışma kapsamında bir boyutlu dinamik saha davranışı analizlerinde kullanılan zemin modelleri ile depremlere ait özelliklerinden bahsedilecek ve analizlerin gerçekleşme aşamaları anlatılacaktır.

Bu çalışma kapsamında deprem özelliklerinin ve yerel zemin koşullarının tek boyutlu dinamik davranışa etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Zemin cinsinin ve yerel zemin sınıfının etkilerini görebilmek amacıyla TBDY esas alınarak tabaka kalınlığının 30 m, yerel zemin sınıfının ZC, ZD, ZE olduğu 3'er adet kum ve kil zemin modeli ile ZB yerel zemin sınıfına dahil olan 2 adet kaya model oluşturulmuştur. Daha sonra

anakaya derinliğinin analiz sonuçlarına olan etkilerini görebilmek amacıyla ZD ve ZE yerel zemin sınıfına sahip olan modeller anakaya derinliğinin 30 m, 35 m, 40 m ve 50 m olduğu 4'er farklı modele ayrılarak zemin modeli sayısı 20'ye yükseltilmiştir. Analizlerde 16 adet anakaya mostrası ivme kaydı kullanılarak yeni deprem yönetmeliğinde tanımlanmış zemin sınıfları dikkate alınarak oluşturulan 20 adet zemin modeli ve model parametreleri ile eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kullanılarak tek boyutlu dinamik analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda taban kayasından verilen deprem hareketinin zemin yüzeyinde ivme-zaman geçmişleri elde edilmiş, ivme spektrumları hesaplanmış, zemin büyütmesi, deplasmanlar ve zemin tabakaları boyunca oluşan şekil değiştirmeler belirlenmiştir.

Tek boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilirken zeminin yatay olarak tabakalandığı düşünülmektedir. TBDY 2018'e göre 30 m kalınlık esas alınarak yerel zemin sınıfları belirlenen zemin modelleri jeolojik yük artışının ve kayma dalgası hızı değişiminin daha ayrıntılı görülebilmesi amacıyla tek tabakalı ve alt tabakalara ayrılarak analiz edilmiştir. Alt tabakalara ayrılan zemin modelleri ile sahada tabakalaşmanın dinamik davranışa olan etkisi irdelenmiştir.

Deprem ivme kayıtlarının etkitildiği anakaya tabakası TBDY 2018'e göre ZB ve ZA yerel zemin sınıfı koşullarını sağlayacak şekilde elastik anakaya olarak seçilmiştir. Yönetmelik kapsamında yerel zemin sınıfının ZF olduğu sahalarda saha davranışı analizinin yapılması ve en az 11 deprem kaydının kullanılması zorunlu tutulmuştur. Bu deprem kayıtları seçilirken depremin büyüklüğü, deprem mekanizması, yerel zemin özellikleri gibi etkilerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında 16 deprem ivme kaydı seçilmiş ve maksimum yer ivmesinin dinamik zemin davranışına olan etkisini gözleyebilmek amacıyla kayıtlar kendisine en yakın ivme değerine yuvarlatılarak ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme yapılırken 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g maksimum yer ivmesi değerlerine sahip ivme kayıtlarının eşit sayıda olması göz önüne alınmıştır.

Çalışma kapsamında belirlenen zemin modelleri Deepsoil V6.1 programına jeolojik yükün daha doğru yansıtılması ve kayma dalgası hızı değişiminin daha ayrıntılı gösterilmesi amacıyla alt tabakalara ayrılarak tanıtılmıştır. Zemin modelleri kullanılarak eşdeğer doğrusal dinamik analiz ve doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda sismik tepki spektrumları, spektral zemin büyütmesi değerleri, yüzeyde oluşacak deplasmanlar ve zemin

tabakalarında meydana gelecek kayma birim şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Eşdeğer doğrusal analizler TBDY 2018 kapsamında kayma birim şekil değiştirme değerinin %1'i aşmaması koşulu ile gerçekleştirebilirler. Bu kapsamda eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile doğrusal olmayan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde çalışma kapsamında gerçekleştirilen bir boyutlu sismik tepki analizlerinde kullanılan zemin modellerine, deprem ivme kayıtlarının özelliklerine değinilmiş ve analizlerin gerçekleştirilme aşamaları gösterilmiştir. Analizler ile elde edilen sonuçlar ise 5. Bölümde verilmiştir.

4.1 Analizlerde Kullanılan Zemin Modelleri

Çalışmada toplam 20 zemin modeli kullanılmıştır. Zemin modelleri oluşturulurken TBDY kapsamında zeminlerin 30 m kalınlıktaki kayma dalgası hızı değerleri esas alınmıştır. Tabakaların kum veya kil zeminlerden oluşmasının yanı sıra kayadan oluşmasının sonuçlara etkisini görebilmek amacıyla ilk aşamada yerel zemin sınıfı ZB olan 2, yerel zemin sınıfı ZC, ZD ve ZE olan 3'er adet kum ve kil zemin modeli belirlenmiştir. Daha sonra yerel zemin sınıfının ZD ve ZE olduğu durumlarda anakaya ile zemin tabakaları arasındaki kayma dalgası hızı geçişinin kademeli olması için 30 m derinlikte olan anakaya 35 m, 40 m ve 50 m derinliklere taşınarak aralara geçiş tabakası yerleştirilmiştir. Toplamda 9 adet kum zemin modeli 9 adet kil zemin modeli ve 2 adet kaya modeli kullanılarak eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik saha davranışı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan zemin modellerinde anakaya için birim hacim ağırlık $\gamma=22.0 \text{ kN/m}^3$ seçilmiş olup kayma dalgası hızı kaya ile oluşturulan zemin modellerinde 1000 m/s ve 1500 m/s, kum ve kil zeminler ile oluşturulan 18 adet zemin modelinde 760 m/s olarak kullanılmıştır. İlk aşamada 8 adet olan zemin modelleri için 30 m kalınlığındaki tabakalara ait parametreler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. 30 m kalınlığındaki tabakaların ortalama kayma dalgası hızı değerleri yerel zemin sınıfı ZC olan ZM1 ve ZM4 için 760 m/s ve 360 m/s değerlerinin ortalaması olan 560 m/s olarak, yerel zemin sınıfı ZD olan ZM2 ve ZM5 için 360 m/s ve 180 m/s değerlerinin ortalaması olan 270 m/s olarak belirlenmiştir. Yerel zemin sınıfı ZE olan modeller kayma dalgası hızı değeri TBDY kapsamında üst sınır olan 180 m/s değerine yakın olarak 150 m/s, yerel zemin sınıfı ZB olan modeller için alt sınır olan 760 m/s değerine yakın olarak 810 m/s seçilmiştir.

Çizelge 4.1 : İlk aşamada belirlenen zemin modellerine ait parametreler.

Model No	Zemin Cinsi	Yerel Zemin Sınıfı	H(m)	V _s (m/s)	γ (kN/m ³)	Zemin Hakim Periyodu (T ₀) (s)	Empedans Oranı (α)
ZM1	KUM	ZC	30	560	19.0	0.21	1.57
ZM2	KUM	ZD	30	270	19.0	0.44	3.26
ZM3	KUM	ZE	30	150	18.0	0.80	6.19
ZM4	KİL	ZC	30	560	19.0	0.21	1.57
ZM5	KİL	ZD	30	270	19.0	0.44	3.26
ZM6	KİL	ZE	30	150	18.0	0.80	6.19
ZM7	KAYA	ZB	30	810	20.0	0.15	1.36
ZM8	KAYA	ZB	30	810	20.0	0.15	2.04

Burada zemin modellerine ait hakim periyot değerleri zeminlerin tek tabaka olarak düşünüldüğü denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler ile kuvvetli yer hareketine ait hakim periyotlar karşılaştırılarak rezonans durumunun oluşup oluşmayacağı hakkında öngörü yapılabilir.

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (4.1)$$

Zemin büyütmesini belirleyen önemli parametrelerden biri empedans oranıdır. Empedans oranı anakaya ve zemin tabakaları arasında yoğunluk ve kayma dalgası hızı değişimini tanımlar (Assimaki ve diğ., 2005). Empedans oranı tüm zemin modelleri için denklem 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır ve Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Bu denklemde ρ_r ve V_r anakayanın yoğunluğu ve kayma dalgası hızı, ρ_s ve V_s ise zemin tabakasının yoğunluğu (γ/g) ve kayma dalgası hızıdır.

$$\alpha = \frac{\rho_r V_r}{\rho_s V_s} \quad (4.2)$$

Kum ve kil zeminler ile oluşturulan zemin modellerinde kayma dalgası hızları, yerel zemin sınıfları ve birim hacim ağırlıklar aynı tutulmuştur. Bununla zeminin kaba daneli veya ince daneli olmasının dinamik davranışa etkisini incelemek amaçlanmıştır.

Zemin modelleri oluşturulurken ve Deepsoil V6.1 programına tanıtılırken kayma dalgası hızının değişiminin ayrıntılı yansıtılabilmesi amacıyla tek boyutlu dinamik saha davranışı analizleri zeminlerin tek tabaka halinde değil alt tabakalara ayrılarak tanımlanması ile gerçekleştirilmiştir. Zemin modelleri ilk aşamada kalınlığı 5 m olan

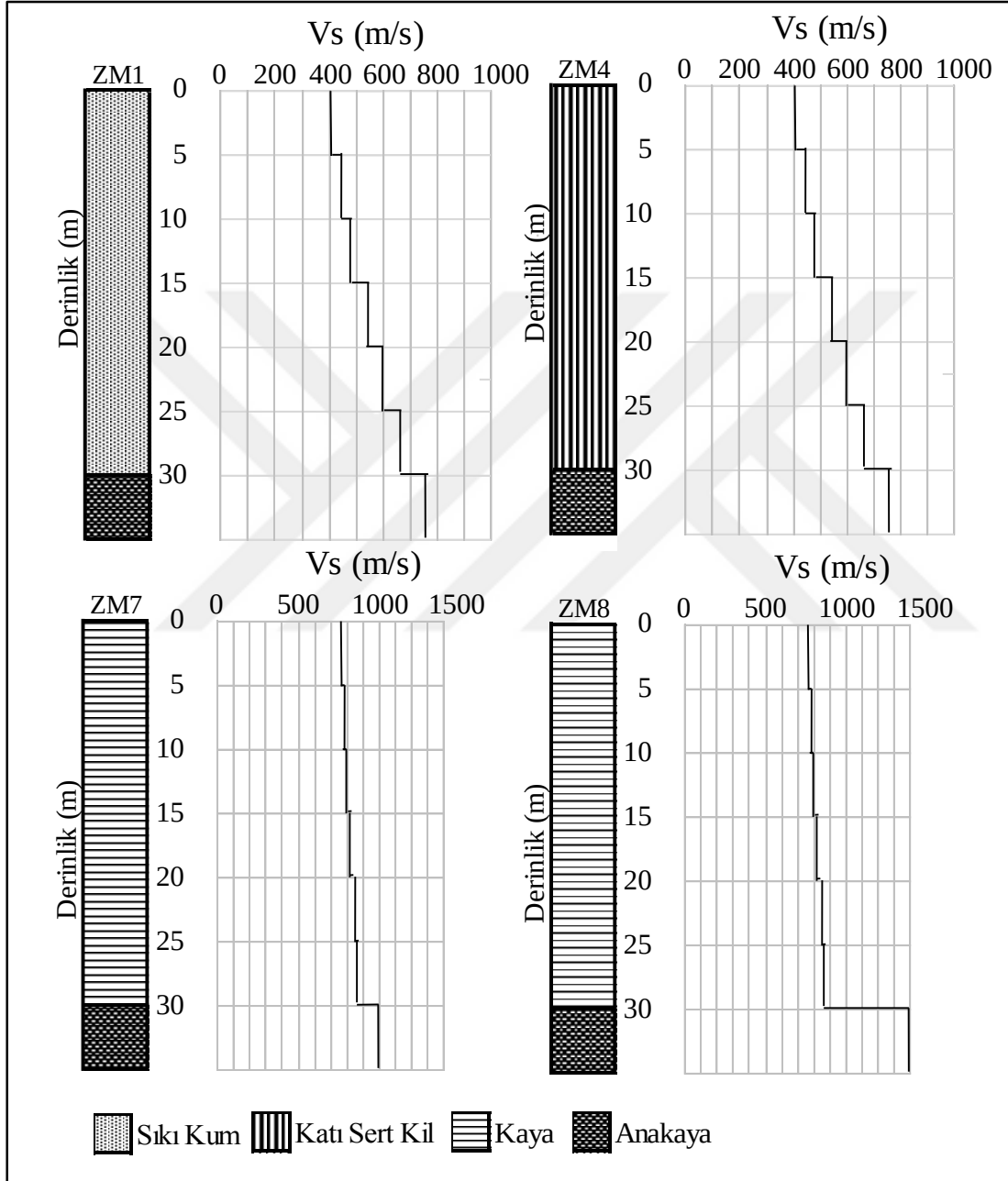
alt tabakalara ayrılarak tanımlanmıştır. Başlangıçta 8 olarak belirlenen zemin modeli sayısı anakaya ile zemin tabakaları arasındaki kayma dalgası hızı farklılığının ani veya kademeli olarak görülebilmesi amacıyla 20'ye çıkartılmıştır. Bu aşamada 30 m kalınlığındaki zemin modellerinin 5 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak tanımlandığında kum zemin ile oluşturulan ZM1, kil zemin ile oluşturulan ZM4 ve kayalar ile oluşturulan ZM7 ve ZM8 için kayma dalgası hızı değişimi ani olmamaktadır. Fakat bunun dışında kalan ZM2, ZM3, ZM5 ve ZM6 zemin modelleri 4'er farklı modele döndürülmüştür. Burada 30 m kalınlığındaki zemin tabakalarının özellikleri aynı kalarak anakaya seviyesinin 30 m derinlikte, 35 m derinlikte, 40 m derinlikte ve 50 m derinlikte olduğu modeller oluşturulmuş ve geçiş tabakaları eklenmiştir. Yerel zemin sınıfı ZD veya ZE olan 30 m kalınlığındaki bir tabakadan sonra anakaya gelmesi pek beklenen bir durum olmadığı için ve jeolojik yükün etkisi ile daha derinlerdeki tabakaların sıkışması sonucunda daha yüksek kayma dalgası hızlarına sahip olacağı öngörüsü ile bu karar alınmıştır. 30 m tabaka kalınlığı esas alınarak oluşturulan 20 zemin modeline ait özellikler Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Zemin modellerine ait ayrıntılar.

#	Model No	Zemin Cinsi ve Sınıfı	Geçiş Tabakası Kalınlığı (m)	#	Model No	Zemin Cinsi ve Sınıfı	Geçiş Tabakası Kalınlığı (m)
1	ZM1	KUM-ZC	-	11	ZM5A	KİL-ZD	-
2	ZM2A	KUM-ZD	-	12	ZM5B	KİL-ZD	5
3	ZM2B	KUM-ZD	5	13	ZM5C	KİL-ZD	10
4	ZM2C	KUM-ZD	10	14	ZM5D	KİL-ZD	20
5	ZM2D	KUM-ZD	20	15	ZM6A	KİL-ZE	-
6	ZM3A	KUM-ZE	-	16	ZM6B	KİL-ZE	5
7	ZM3B	KUM-ZE	5	17	ZM6C	KİL-ZE	10
8	ZM3C	KUM-ZE	10	18	ZM6D	KİL-ZE	20
9	ZM3D	KUM-ZE	20	19	ZM7	KAYA-ZB	-
10	ZM4	KİL-ZC	-	20	ZM8	KAYA-ZB	-

Kum ve kil zeminler için dinamik analizlerde kullanılan parametrelerdeki en büyük fark plastisite indisidir. Kum zeminler plastisite indisine sahip değilken kil zeminler plastisite indisi değerlerine göre düşük plastisiteli, orta plastisiteli ve yüksek plastisiteli zeminler olarak sınıflandırılmaktadır. Kum zeminler ise sıkılıklarına göre sınıflandırılmaktadır. Belirlenen parametrelerden de görüleceği üzere kum zeminler gevşek kum, orta sıkı kum ve sıkı kum; kil zeminler ise katı sert kil, orta katı kil ve yumuşak kil olarak sıralanmıştır. ZM1, ZM4, ZM7 ve ZM8 zemin modellerine ait

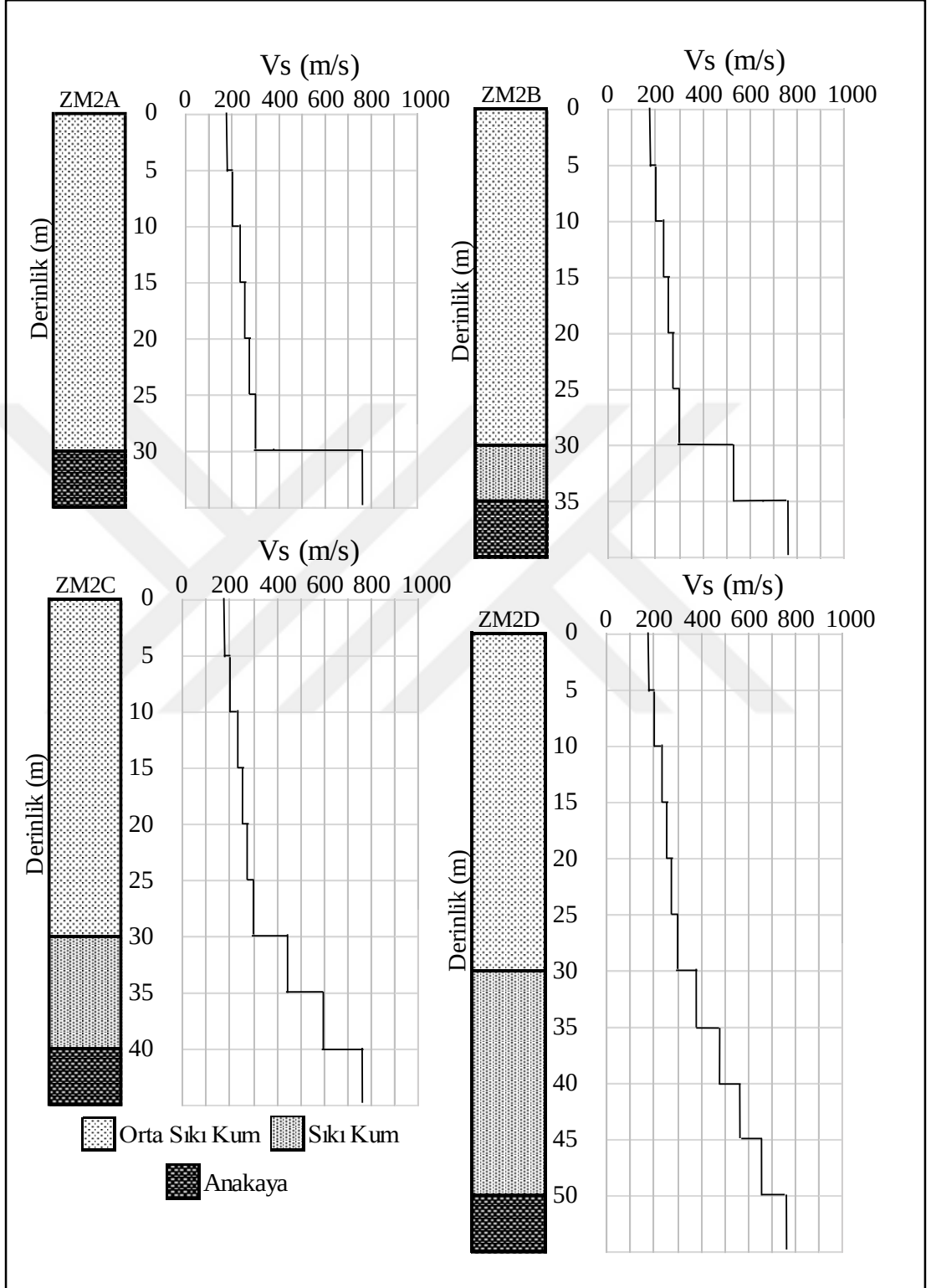
kayma dalgası hızı değerlerinin derinlik ile değişimleri Şekil 4.1 ile gösterilmiştir. Burada 30 m derinliğinden sonra anakaya tabakası bulunmaktadır. Sıkı kum olan ZM1 ve katı sert kil olan ZM4 için anakayaya ait kayma dalgası hızı değeri $V_s=760$ m/s, kaya olan ZM7 ve ZM8 modelleri için anakayaya ait kayma dalgası hızı değerleri sırasıyla 1000 m/s ve 1500 m/s olarak seçilmiştir.



Şekil 4.1 : ZM1, ZM4, ZM7 ve ZM8 zemin modelleri.

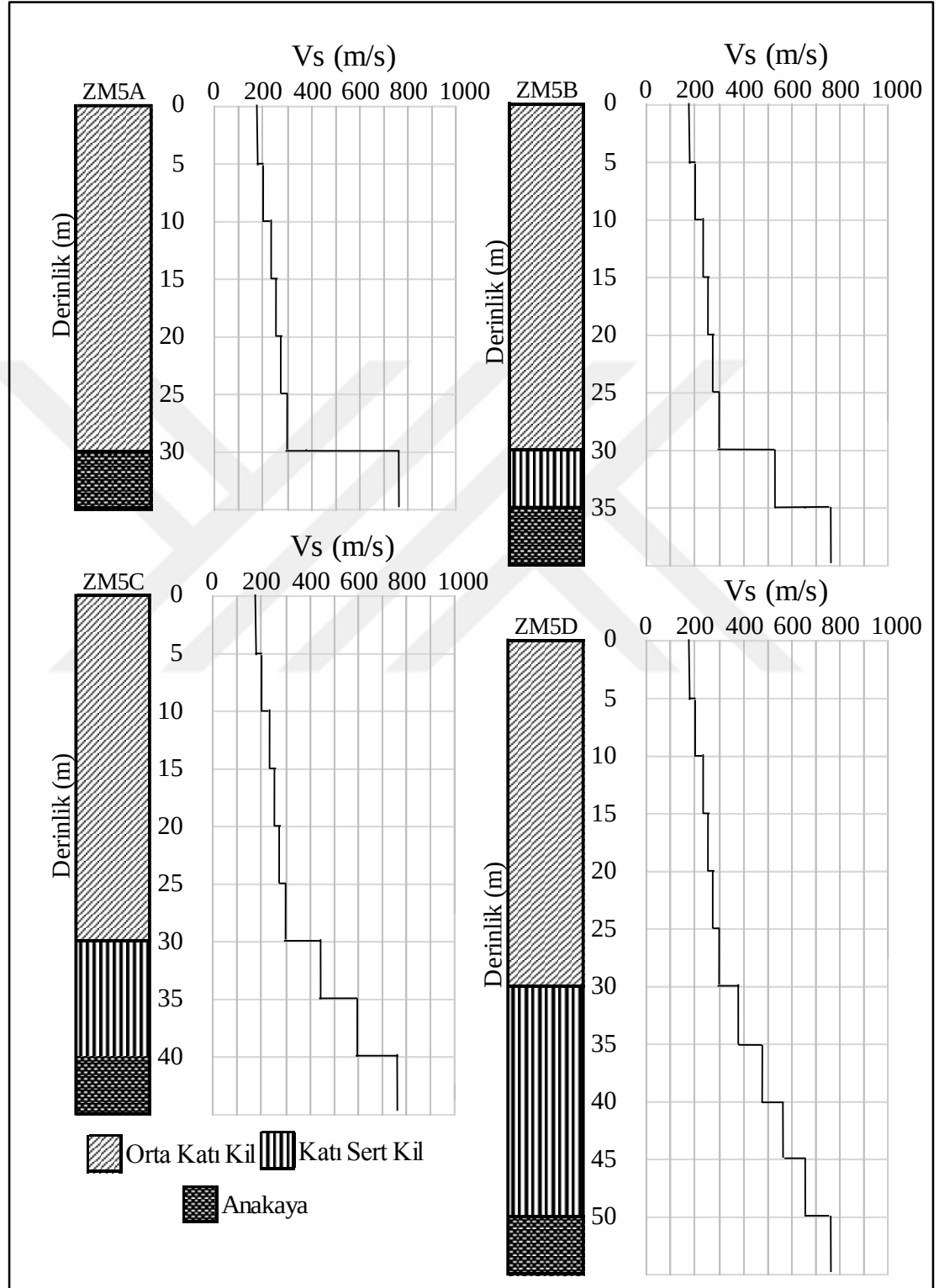
ZM2 kullanılarak anakaya derinliğinin değiştirilmesi ile oluşturulan ZM2A, ZM2B, ZM2C ve ZM2D zemin modellerine ait kayma dalgası hızı değişimleri Şekil 4.2’de

gösterilmiştir. İlk 30 m kalınlığındaki tabakanın orta sıkı kum zeminler ile oluşturulduğu modellerde geçiş tabakaları olarak sıkı kum tabakalar kullanılmıştır.



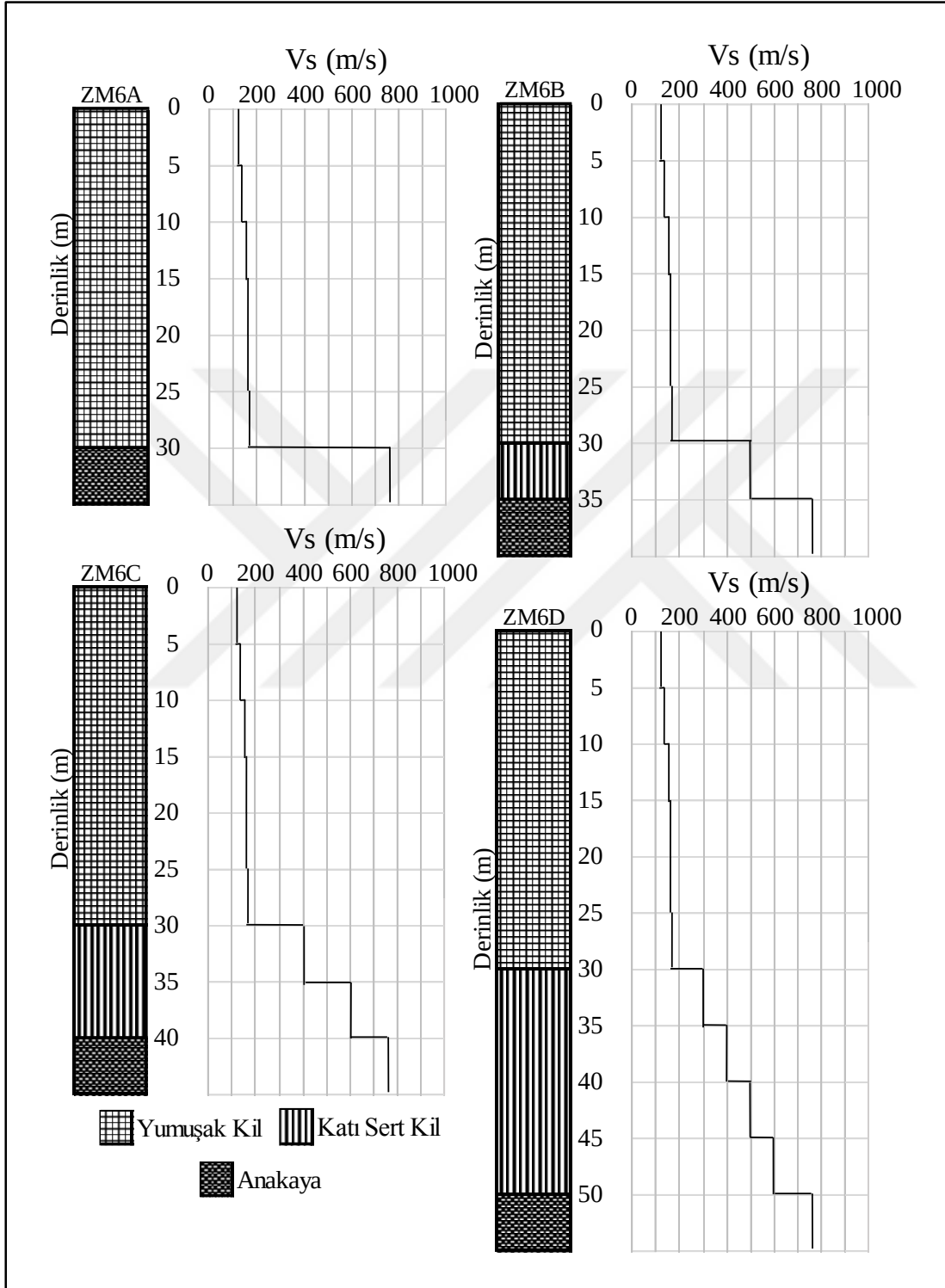
Şekil 4.2 : ZM2A, ZM2B, ZM2C ve ZM2D zemin modelleri.

ZM5 kullanılarak anakaya derinliğinin değiştirilmesi ve araya geçiş tabakaları koyulması ile oluşturulan ZM5A, ZM5B, ZM5C ve ZM5D zemin modellerine ait kayma dalgası hızı değişimleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : ZM5A, ZM5B, ZM5C ve ZM5D zemin modelleri.

ZM6 kullanılarak anakaya derinliğinin değiştirilmesi ve araya geçiş tabakaları yerleştirilmesi ile oluşturulan ZM6A, ZM6B, ZM6C ve ZM6D zemin modellerine ait kayma dalgası hızı değişimleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : ZM6A, ZM6B, ZM6C ve ZM6D zemin modelleri.

Yapılan analizlerde Çizelge 4.2'de de belirtildiği üzere 9 adet kum zemin, 9 adet kil zemin ve 2 adet kaya ile oluşturulan zemin modeli bulunmaktadır. Bir boyutlu dinamik

saha davranışı analizleri yapılırken eşdeğer doğrusal analizlerde de doğrusal olmayan analizlerde de dinamik zemin parametreleri olarak kayma dalgası hızı değerlerinin yanında rijitlik ve sönüm oranı azalım eğrileri kullanılmaktadır. Sıkı, orta sıkı ve gevşek olarak belirlenen kum zeminler için rölatif sıkılık değeri (D_r) sırasıyla %70, %40 ve %25 olarak seçilmiştir. Kum zeminler ve kaya için azalım ilişkileri Seed ve Idriss (1991) tarafından oluşturulan azalım eğrileri ile tanımlanmıştır. Seed ve Idriss tarafından oluşturulan azalım eğrileri 3 farklı durum için oluşturulmuştur. Rölatif sıkılığın %60'dan yüksek olduğu değerler için "Upper Limit" eğrileri, %30 ve %60 aralığındaki değerler için "Mean Limit" eğrileri, %30'dan düşük olduğu değerler için "Lower Limit" eğrileri oluşturulmuştur. Bu nedenle kayma dalgası hızı TBDY 2018 kapsamında ZE yerel zemin sınıfına dahil olan tabakalar için "Lower Limit" ile oluşturulan eğriler, ZD yerel zemin sınıfına dahil olan tabakalar için "Mean Limit" ile oluşturulan eğriler, ZC ve ZB yerel zemin sınıfına dahil olan tabakalar için "Upper Limit" ile oluşturulan eğriler kullanılmıştır. Kil zeminlerde ise Vucetic ve Dobry (1991) tarafından oluşturulan azalım eğrileri ile tanımlanmıştır. Vucetic ve Dobry yaptığı çalışmada azalım ilişkilerini plastisite indisine bağlı olarak hesaplamıştır. Çalışma kapsamında kil zeminler ile oluşturulan zemin modellerinde her yerel zemin sınıfı için farklı plastisite indisi belirlenmiştir. Plastisite indisi değerleri ZC yerel zemin sınıfına sahip ZM4 modeli için %5, ZD yerel zemin sınıfına sahip ZM5A, ZM5B, ZM5C ve ZM5D zemin modelleri için %15 ve ZE yerel zemin sınıfına sahip ZM6A, ZM6B, ZM6C ve ZM6D zemin modelleri için %40 olarak seçilmiştir. Bu plastisite indisleri belirlenirken azalım ilişkilerinin farklılık göstermesi göz önünde bulundurulmuştur.

4.2 Analizlerde Kullanılan Deprem İvme Kayıtları

Bu çalışmada belirlenen 16 adet anakaya mostrası ivme kaydı kullanılarak tek boyutlu yerel saha davranışı analizleri yapılmıştır. Kullanılan 16 deprem ivme kaydı maksimum yer ivmesi değerleri kapsamında ölçeklendirilerek dörderli olarak gruplandırılmıştır. Yerel saha davranış analizinin yapılması gereken durumlarda TBDY 2018'de en az 11 deprem ivme kaydının seçilmesi koşulu yer almaktadır. Bu depremler sahaya özel seçilerek analizler gerçekleştirilirken bu çalışmada 16 deprem ivme kaydı bir kritere bağlı kalmadan seçilmiş ve 4 farklı maksimum yer ivmesine ölçeklendirilmiştir. Deprem kayıtları dörder adet 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g PGA

değerine sahip olacak şekilde 4 gruba ayrılarak ölçeklendirilmiştir. Kayıtlar ölçeklendirilirken genel olarak her kaydın PGA değerine en yakın olan grup esas alınmıştır.

Analizlerde kullanılan Chichi, Coyote, Nahanni ve Northridge-2 anakaya mostrası ivme kayıtları 0.1 g maksimum yer ivmesi değerine ölçeklendirilmiştir. Chichi depremi 1999 yılında Tayvan'da gerçekleşmiş büyüklüğü 7.6 M_w olan bir depremdir. Chichi depremine ait anakaya mostrası ivme kaydının maksimum yer ivmesi 0.183 g ve kaydın faya olan uzaklığı 15.3 km'dir. Coyote depremi 1979 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleşmiştir. Büyüklüğü 5.7 M_w olarak ölçülen deprem için alınan anakaya mostrası kaydında maksimum yer ivmesi değeri 0.124 g ve kaydın faya olan uzaklığı 17.2 kilometredir. Nahanni depremi 1985 yılında 6.8 M_w büyüklüğünde Kanada'da gerçekleşmiştir. Bu deprem için anakaya mostrası kaydına ait maksimum yer ivmesi 0.148 g'dir. İvme kaydının alındığı anakaya mostrası faya 16.0 km uzaklıktadır. Northridge depremi 1994 yılında ABD'de 6.7 M_w büyüklüğünde gerçekleşmiştir. Bu çalışmada Northridge depremine ait 2 anakaya mostrası ivme kaydı kullanılmıştır. 2 numaralı kaydın faya uzaklığı 43.4 km, maksimum yer ivmesi 0.098 g'dir (PEER, 2000).

Analizlerde kullanılan Imperial Valley, Kocaeli, Loma Prieta ve Whittier Narrows anakaya mostrası ivme kayıtları 0.2 g maksimum yer ivmesi değerine ölçeklendirilmiştir. Imperial Valley depremi 6.5 M_w büyüklüğünde olup 1979 yılında ABD'de gerçekleşmiştir. Anakaya mostrası kaydına ait maksimum yer ivmesi 0.169 g olup kaydın faya olan uzaklığı 26.5 km'dir. Kocaeli depremi 7.4 M_w büyüklüğünde 1999 yılında Türkiye'de meydana gelmiştir. Deprem ivme kaydına ait maksimum yer ivmesi değeri 0.218 g, kaydın faya olan uzaklığı 17.0 km'dir. Loma Prieta depremi 1989 yılında ABD'de gerçekleşmiştir. Depremin büyüklüğü $M_w=6.9$ olarak verilmektedir. Bu çalışmada Loma Prieta depremine ait 2 anakaya mostrası ivme kaydı kullanılmıştır. Birinci kayıt için maksimum yer ivmesi değeri 0.170 g, kayıt alınan noktanın faya olan uzaklığı 19.9 km'dir. Whittier Narrows depremi 1987 yılında 6.0 M_w büyüklüğünde ABD'de gerçekleşmiştir. Alınan anakaya mostrası kaydı için maksimum yer ivmesi değeri 0.186 g ve kayıt alınan noktanın faya olan uzaklığı 21.2 km'dir (PEER, 2000).

Analizlerde kullanılan Düzce, Northridge, Parkfield ve San Fernando anakaya mostrası ivme kayıtları 0.3 g maksimum yer ivmesi değerine ölçeklendirilmiştir.

Düzce depremi 1999 yılında 7.1 M_w büyüklüğünde Türkiye’de meydana gelmiştir. Alınan anakaya mostrası kaydına ait maksimum yer ivmesi 0.053 g, kayıt noktasının faya uzaklığı 25.8 km’dir. Northridge depremine ait ilk kaydın maksimum yer ivmesi 0.217 g ve kayıt noktasının faya olan uzaklığı 26.8 km’dir. Parkfield depremi 1966 yılında ABD’de meydana gelmiştir. Deprem büyüklüğü 6.1 M_w ’dir. Mostra kaydının alındığı noktanın faya uzaklığı 9.9 km, anakaya mostrasının kaydındaki maksimum yer ivmesi 0.357 g’dir. San Fernando depremi 6.6 M_w büyüklüğü ile ABD’de 1971 yılında meydana gelmiştir. Deprem kaydındaki maksimum yer ivmesi 0.32 g, kayıt noktasının faya olan uzaklığı 13.0 km’dir (PEER, 2000).

Analizlerde kullanılan Loma Prieta-2, Mammothlake, Manjil ve Tottori anakaya mostrası ivme kayıtları 0.4 g maksimum yer ivmesi değerine ölçeklendirilmiştir. Loma Prieta depremine ait ikinci kaydın maksimum yer ivmesi 0.357 g’dir ve kayıt alınan noktanın faya uzaklığı 11.6 km’dir. Mammothlake depremi 1989 yılında ABD’de gerçekleşmiştir ve 6.3 M_w büyüklüğündedir. Deprem kaydına ait maksimum yer ivmesi 0.43 g’dir ve kayıt noktası faydan 15.5 km uzaklıktadır. 1990 yılında İran’da meydana gelen Manjil depremi 7.4 M_w büyüklüğündedir. Anakaya mostrası kaydının alındığı nokta faya 19.0 km uzaklıktadır ve kayda ait maksimum yer ivmesi 0.496 g’dir. Tottori depremi 2000 yılında Japonya’da meydana gelmiştir ve 6.6 M_w büyüklüğüne sahiptir. Anakaya mostrası ivme kaydına ait maksimum yer ivmesi değeri 0.41 g ve kayıt alınan noktanın faya uzaklığı 13.0 km’dir (PEER, 2000).

Analizler 16 adet ölçeklendirilmiş deprem ile yapılmadan önce 15 adet deprem kaydı ile eşdeğer doğrusal analizler yapılmıştır. Bu analizlerde Kobe deprem ivme kaydı da kullanılmıştır. Fakat Kobe depremi ile yapılan analizler sonucunda elde edilen deplasman ve şekil değiştirme sonuçlarının diğer sonuçlara göre çok yüksek değerlerde olması sebebi ile bu deprem ivme kaydı analizlerden çıkartılmıştır. Kobe deprem ivme kaydı kullanılarak yapılan analizlere ait sonuçlar EK A’da gösterilmiştir. Kobe depremi 1995 yılında Japonya’da 6.9 M_w büyüklüğünde gerçekleşmiş bir depremdir. Bu deprem kaydının maksimum yer ivmesi değeri 0.821 g olarak ölçülmüştür ve deprem kaydının faya uzaklığı 600 m’dir. (PEER, 2000).

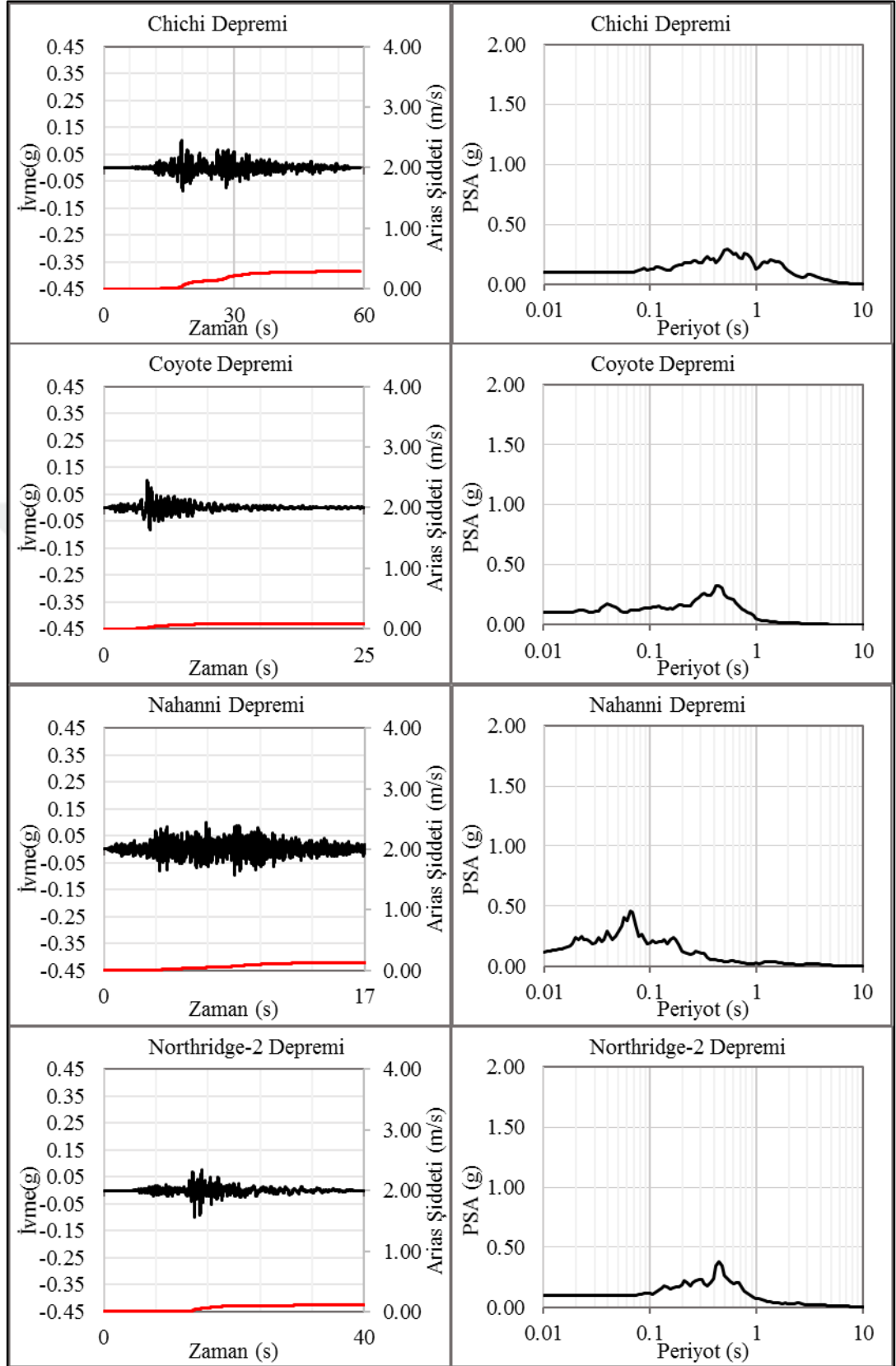
Çalışmada kullanılan ölçeklendirilmiş anakaya mostrası kayıtlarına ait özellikler numaralandırılarak Çizelge 4.3’te gösterilmiştir. Bu numaralandırmanın anlaşılması için Chichi depremi örnek verilebilir. Chichi depreminin numarası D1.1’dir. Burada ilk rakam PGA değerinin 0.1 g olduğu deprem grubunun numarası, ikinci rakam ise

bu grubun kaç numaralı depremi olduğunu göstermektedir. Analizlerde kullanılan anakaya mostrası kayıtlarına ait ivme zaman kayıtları, Arias şiddeti değişimi ve spektral ivmelerin periyotlara bağlı değişimleri PGA değerleri 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g olan deprem kayıtları için sırası ile. Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

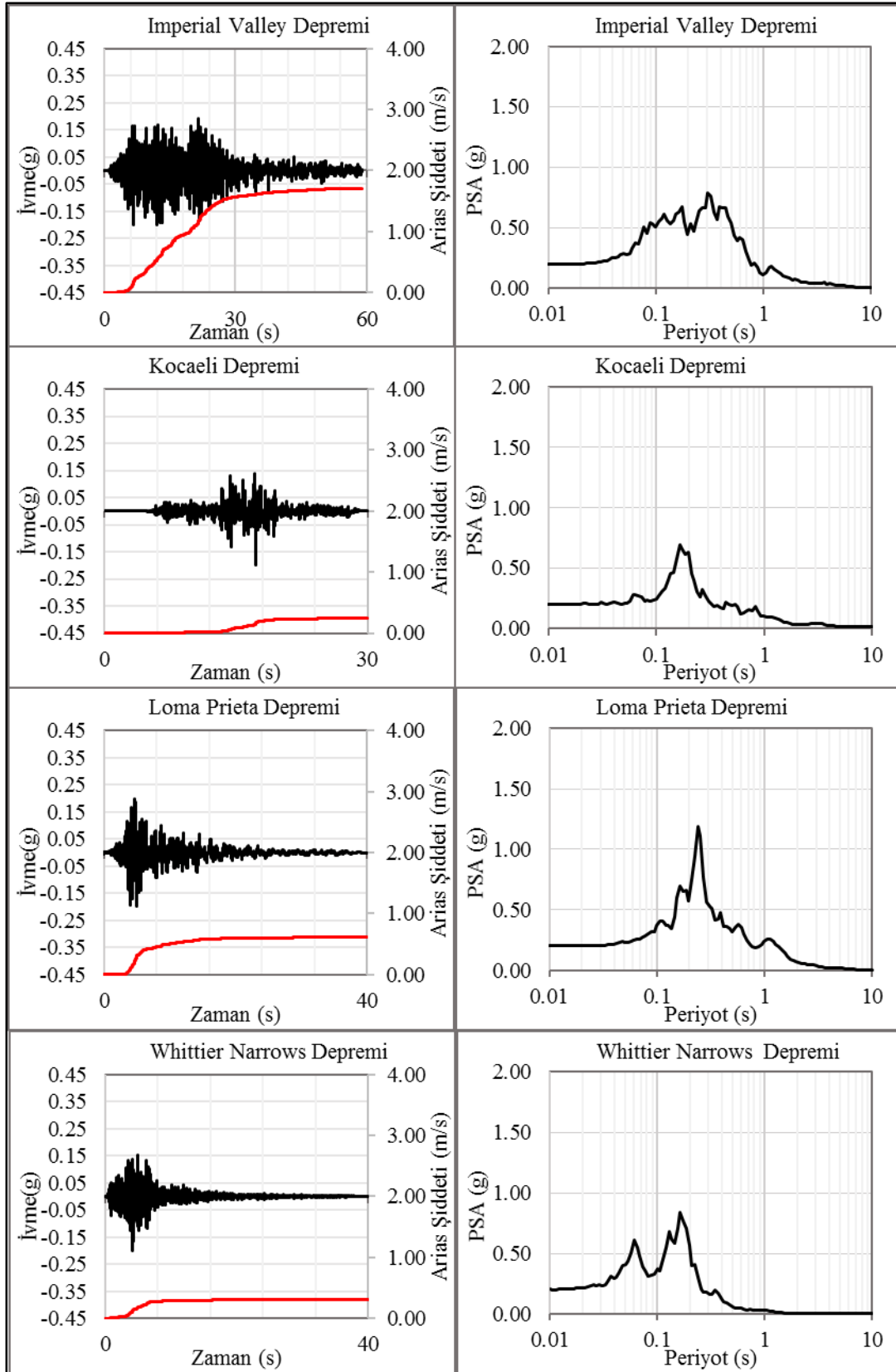
Çizelge 4.3 : Deprem kayıtlarına ait parametreler.

#	Deprem No	Deprem Adı	Büyüklik (Mw)	PGA (g)	PGV (m/s)	Faya uzaklık (km)	Deprem Hakim Periyotları (s)
1	D1.1	Chichi, 1999, Tayvan	7.6	0.1	0.22	15.3	0.50
2	D1.2	Coyote, 1979, ABD	5.7	0.1	0.06	17.2	0.45
3	D1.3	Nahanni, 1985, Kanada	6.8	0.1	0.04	16.0	0.07
4	D1.4	Northridge-2, 1994, ABD	6.7	0.1	0.09	43.4	0.45
5	D2.1	Imperial Valley, 1979, ABD	6.5	0.2	0.14	26.5	0.30
6	D2.2	Kocaeli, 1999, Türkiye	7.4	0.2	0.16	17.0	0.15
7	D2.3	Loma Prieta, 1989, ABD	6.9	0.2	0.17	19.9	0.25
8	D2.4	Whittier Narrows, 1987, ABD	6.0	0.2	0.05	21.2	0.15
9	D3.1	Düzce, 1999, Türkiye	7.1	0.3	1.17	25.8	0.20
10	D3.2	Northridge, 1994, ABD	6.7	0.3	0.14	26.8	0.20
11	D3.3	Parkfield, 1966, ABD	6.1	0.3	0.18	9.9	0.40
12	D3.4	San Fernando, 1971, ABD	6.6	0.3	0.08	13.0	0.15
13	D4.1	Loma Prieta-2, 1989, ABD	6.9	0.4	0.32	11.6	0.40
14	D4.2	Mammothlake, 1980, ABD	6.3	0.4	0.22	15.5	0.15
15	D4.3	Manjil, 1990, İran	7.4	0.4	0.08	19.0	0.04
16	D4.4	Tottori, 2000, Japonya	6.6	0.4	0.09	13.0	0.10

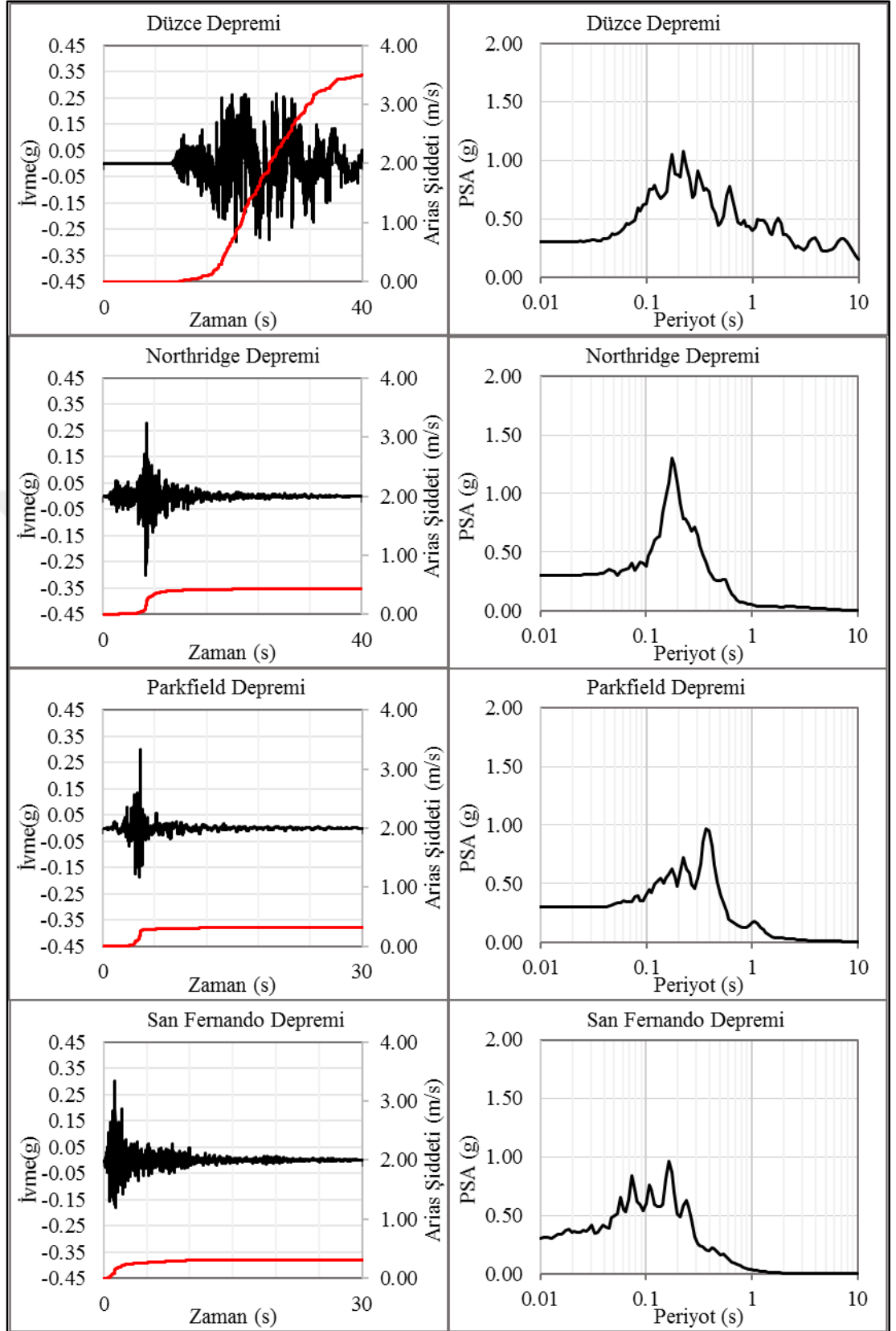
Deprem etkilerini göstermekte kullanılan Arias şiddeti değerlerinin zamanla değişimleri incelendiğinde 16 deprem kaydı içinde maksimum yer ivmesi 0.4 g olarak ölçeklendirilen depremler ile birlikte maksimum yer ivmesi 0.3 g olan Imperial Valley ve Düzce deprem kayıtlarında Arias şiddeti değerleri yüksektir. Arias şiddeti değeri depremlere ait enerji boşalmasını yansıtan bir kavram olarak maksimum yer ivmeleri ile birlikte kuvvetli yer hareketi sonucunda zemin tabakalarında oluşacak deplasmanlar ve deformasyonlar hakkında öngörü yapabilmek için kullanışlıdır. Buna göre özellikle Arias şiddetinin çok yüksek olduğu Düzce depremine ait ivme kayıtları ile gerçekleştirilen analizlerde yüksek deformasyon ve şekil değiştirme değerleri beklenmektedir. Düzce depremi yüksek Arias şiddeti değerinin yanında Çizelge 4.3’te de görüldüğü üzere diğer kayıtlara oranla çok yüksek pik yer hızına da sahiptir.



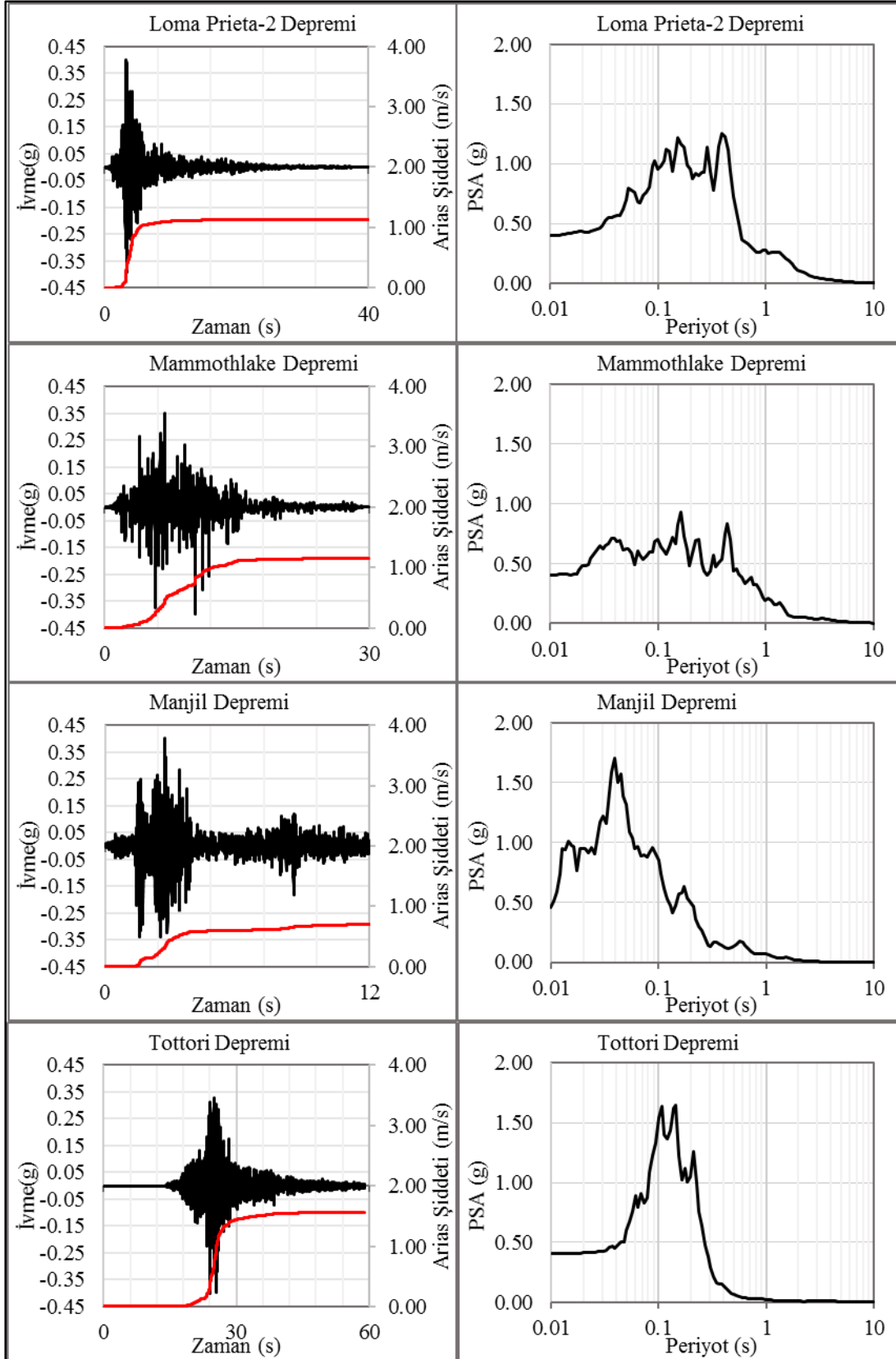
Şekil 4.6 : 0.1 g'ye ölçeklendirilen depremlere ait ivme-zaman, Arias şiddeti-zaman grafikleri ve ivme spektrumları.



Şekil 4.7 : 0.2 g'ye ölçeklendirilen depremlere ait ivme-zaman, Arias şiddeti-zaman grafikleri ve ivme spektrumları.



Şekil 4.8 : 0.3 g'ye ölçeklendirilen depremlere ait ivme-zaman, Arias şiddeti-zaman grafikleri ve ivme spektrumları.



Şekil 4.9 : 0.4 g'ye ölçeklendirilen depremlere ait ivme-zaman, Arias şiddeti-zaman grafikleri ve ivme spektrumları.

Kuvvetli yer hareketlerine ait ivme spektrumları incelendiğinde Chichi, Northridge-2, Parkfield ve Loma Prieta-2 depremlerinin yüksek hakim periyotlara sahip olduğu görülmektedir. Nahanni ve Manjil depremleri ise düşük hakim periyoda sahiptirler.

Ölçeklendirilmiş 16 adet deprem ivme kaydı ve TBDY esas alınarak oluşturulmuş 20 adet zemin modeli kullanılarak gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan 640 bir boyutlu dinamik analizin yanısıra alt tabaka kalınlığının etkilerinin incelendiği analizler ve ölçeklendirilmemiş deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen analizler dahil olmak üzere çalışma kapsamında yaklaşık 800 analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu analizler zemin modeli, deprem kayıtları, analiz türleri ve zeminlerin özelliklerinin aşamalar halinde Deepsoil programına tanıtılmasıyla tamamlanmıştır.

4.3 Bir Boyutlu Dinamik Analiz Aşamaları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tek boyutlu dinamik tepki analizleri Deepsoil v6.1 isimli bir boyutlu dinamik analiz yazılımında gerçekleştirilmiştir. Program frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapmaktadır (Hashash ve diğ., 2016). Deepsoil C++ tabanlı bir boyutlu sismik tepki analiz programıdır.

Analizler gerçekleştirilirken ilk aşamada Şekil 4.10'da gösterildiği gibi analiz yöntemi seçilmektedir. Burada frekans tanım alanında doğrusal ve eşdeğer doğrusal veya zaman tanım alanında doğrusal veya doğrusal olmayan analiz yöntemleri yer almaktadır. Boşluk suyu basıncının dikkate alınıp alınmayacağına da bu aşamada karar verilmektedir. Bu aşamada ayrıca programa daha önceden tanımlanmış olan deprem kayıtları ve zemin profilleri görülebilmektedir. Daha önceden kaydedilmiş olan bir profil açılabilir veya yeni profil oluşturmak için ikinci aşamaya geçilebilir.

Şekil 4.11'de gösterilen ikinci aşamada programa zemin modeli tanımlanmaktadır. Bu aşamada zemin tabakalarına ait kalınlık, birim hacim ağırlık ve kayma dalgası hızı değerleri girildikten sonra zeminlere ait azalım ilişkilerini tanımlamak üzere "Layer" sekmesinden istenilen tabakaya tıklanarak Şekil 4.12'de gösterilen ekran açılır. Şekil 4.11'de görüldüğü üzere Deepsoil Denklem 4.1 kullanılarak zemin tabakalarının hakim periyot değerlerini hesaplamaktadır.

Analysis Motions Profiles

New Profile

Open Profile

Navigation

Step 1

Step 2a

Step 2b

Step 2c

Step 3

Step 4

Step 5

Results

Step 1 - Analysis Definition

INSTRUCTIONS

To begin, either complete the fields in the "Define Analysis" section and select "Next".

Define Analysis

Frequency Domain Analysis

☐ Linear

☒ Equivalent Linear

Dynamic Properties Formulation:

☒ Discrete Points

☐ Nonlinear Parameters

Time Domain Analysis

☐ Linear

☐ Nonlinear

☒ Also Generate Equivalent Linear Results

Nonlinear Backbone Formulation

☒ Pressure-Dependent Modified Kodner Zelesko (MKZ)

☐ General Quadratic Model (GQ)

Hysteretic Re/Unloading Formulation

☒ Non-Masing Re/Unloading

☐ Masing Re/Unloading

Pore Pressure Generation

☒ Do Not Generate

☐ Generate

☐ Include PWP Dissipation

Bottom of Profile:

☒ Permeable

☐ Impervious

Initial Shear Stiffness Definition

☒ Shear Wave Velocity (V_s)

☐ Shear Modulus (G_{max})

Soil Model

DS-EL0

Units

☐ English

☒ Metric

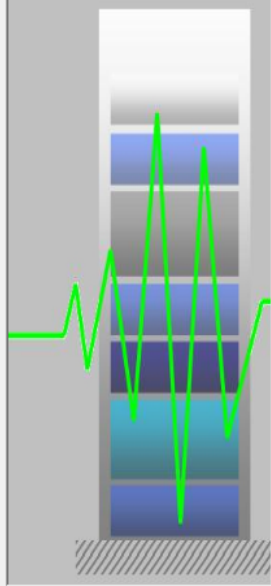
Current Workspace Directory

C:\Users\Tolgahann\Documents\DEEPSOIL\

Change

Cancel

Next



Şekil 4.10 : Deepsoilde analiz yöntemi seçme.

Analysis Motions Profiles

New Profile

Open Profile

Navigation

Step 1

Step 2a

Step 2b

Step 2c

Step 3

Step 4

Step 5

Results

Step 2a - Soil Profile Definition

Depth (m)

0

5

10

15

20

25

30

Layer 1

Layer 2

Layer 3

Layer 4

Layer 5

Layer 6

Layer #	Layer Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m ³)	Shear Velocity (m/s)
1	KUM-1	5	19	400
2	KUM-2	5	19	440
3	KUM-3	5	19	480
4	KUM-4	5	19	540
5	KUM-5	5	19	600
6	KUM-6	5	19	660

Soil Profile Display

Total Profile Depth (m): 30.00

Natural Freq. of Profile: 4.21 Hz

Natural Period of Profile: 0.24 sec

Back

Soil Profile

Material Properties

Add Layer(s)

Remove Layer

Water Table Location

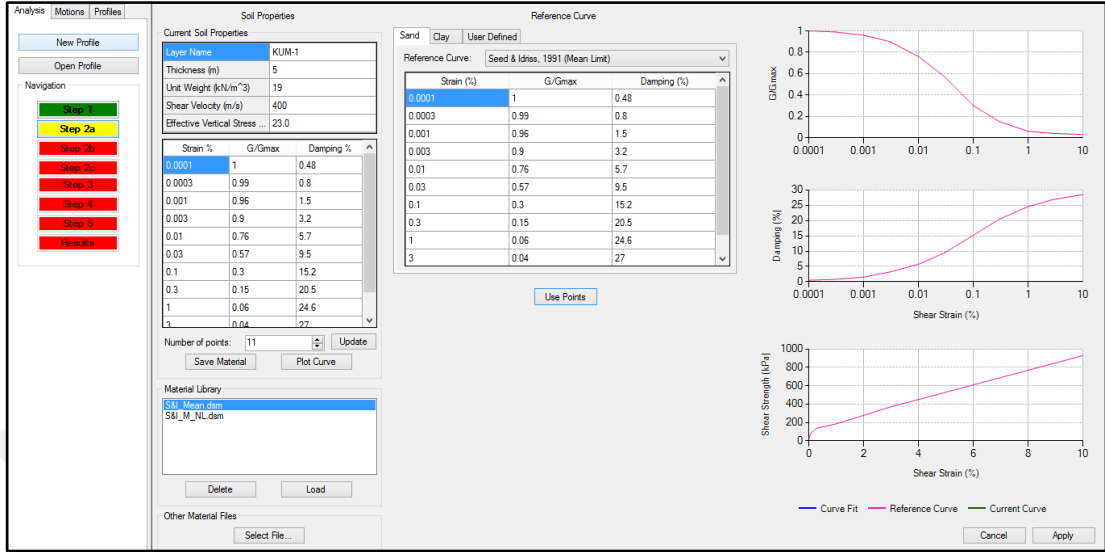
Top of Layer: 1

☐ No Water Table

Spread

Şekil 4.11 : Zemin parametrelerinin Deepsoil'e tanımlanması.

Şekil 4.12’de gösterilen azalım ilişkilerinin tanımlanması aşamasında zemin cinsinin kum veya kil olmasına göre daha önce bu konuda yapılan çalışmalar kullanılarak tanımlanmış referans eğriler bulunmaktadır.



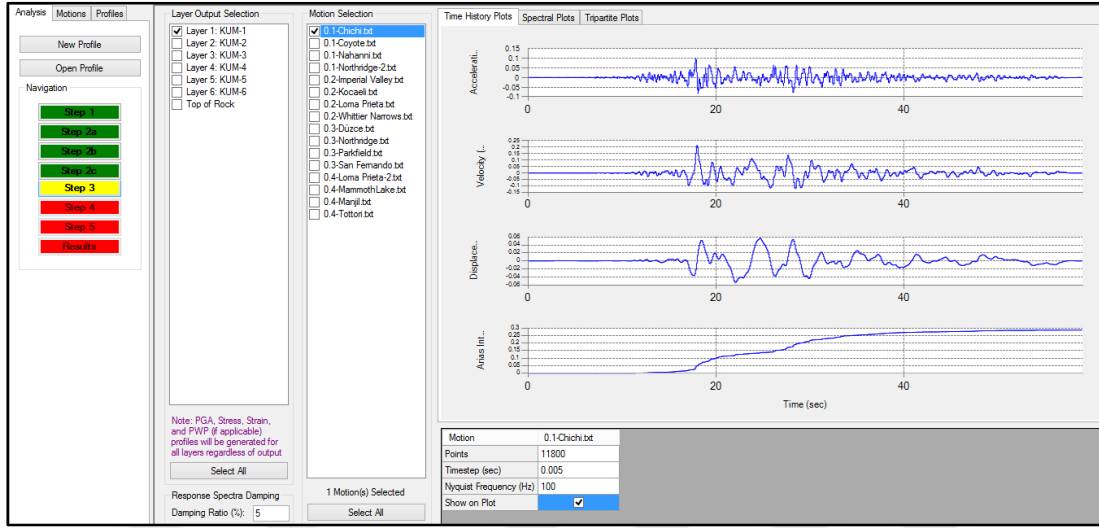
Şekil 4.12 : Rijitlik azalım ve sönüm oranı eğrilerinin seçilmesi.

Azalım eğrileri tanımlanırken varsa gerçekleştirilmiş olan laboratuvar deneyleri de kullanılabilir. Programda referans olarak sunulan bazı azalım eğrileri de laboratuvar verisi istemektedir. Azalım ilişkileri de tanımlandıktan sonra zemin modelinin programa tanıtılma aşaması sona ermektedir. Bir sonraki aşamada anakaya için parametreler tanımlanmaktadır. Bu aşamada daha önceden kaydedilmiş olan anakayalar da seçilebilmektedir.

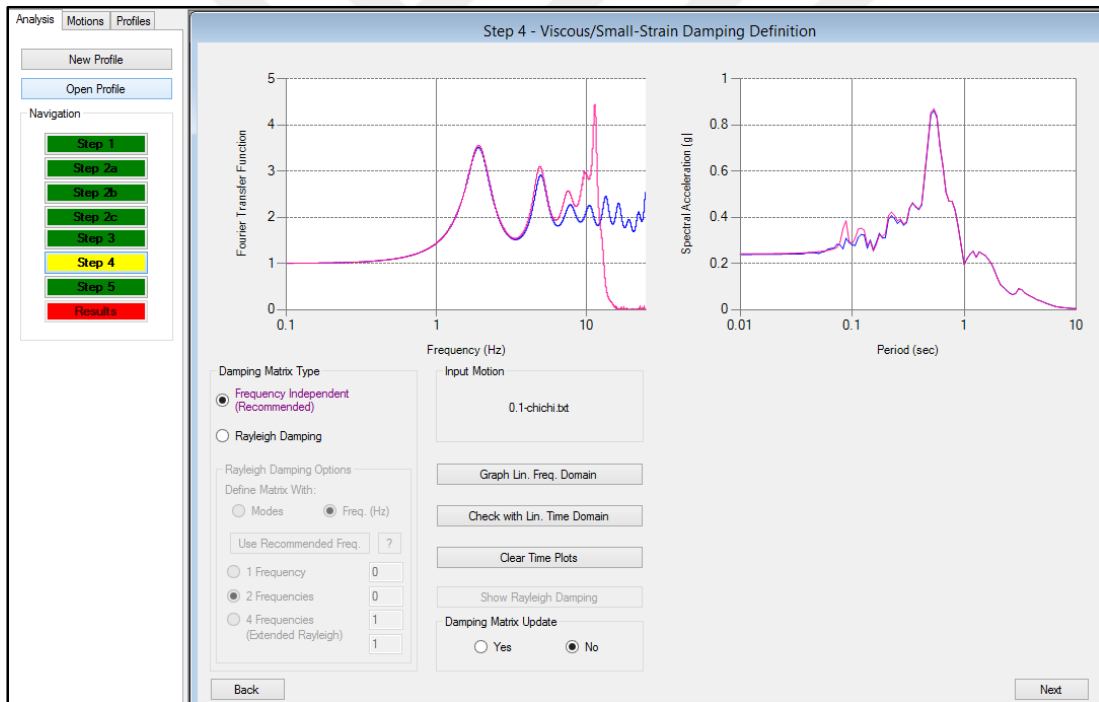
Anakaya özellikleri de tanımlandıktan sonra analizde kullanılması istenilen kuvvetli yer hareketleri seçilmektedir. Şekil 4.13’te gösterilen aşamada depremlere ait ivme-zaman kayıtları, hız-zaman kayıtları, deplasman-zaman kayıtları, Arias şiddeti-zaman kayıtları ve bu kayıtlara ait spektrumlar ile değerler kontrol edilebilmektedir. Tepki spektrumuna ait sönüm bu aşamada seçilecek olup bu çalışma kapsamında TBDY 2018’de de belirtildiği üzere bu değer %5 olarak belirlenmiştir. Analiz sonuçları program arayüzünde görüntülenmesinin yanısıra isteğe bağlı olarak excel dosyası olarak sonuçlar çıktı alınabilmektedir. Bu aşamada seçilen tabakalardan hangileri için sonuçların oluşturulması isteniyorsa o tabakalar seçilmelidir.

Doğrusal olmayan analiz olması durumunda frekanstan bağımsız şekilde viskoz sönüm matrisinin tanımlanması gerekmektedir. Eşdeğer doğrusal analizde

karşılaşılmayan bu aşama Şekil 4.14'te gösterilmiştir Bu aşamada ayrıca transfer fonksiyonları da oluşturulmaktadır.



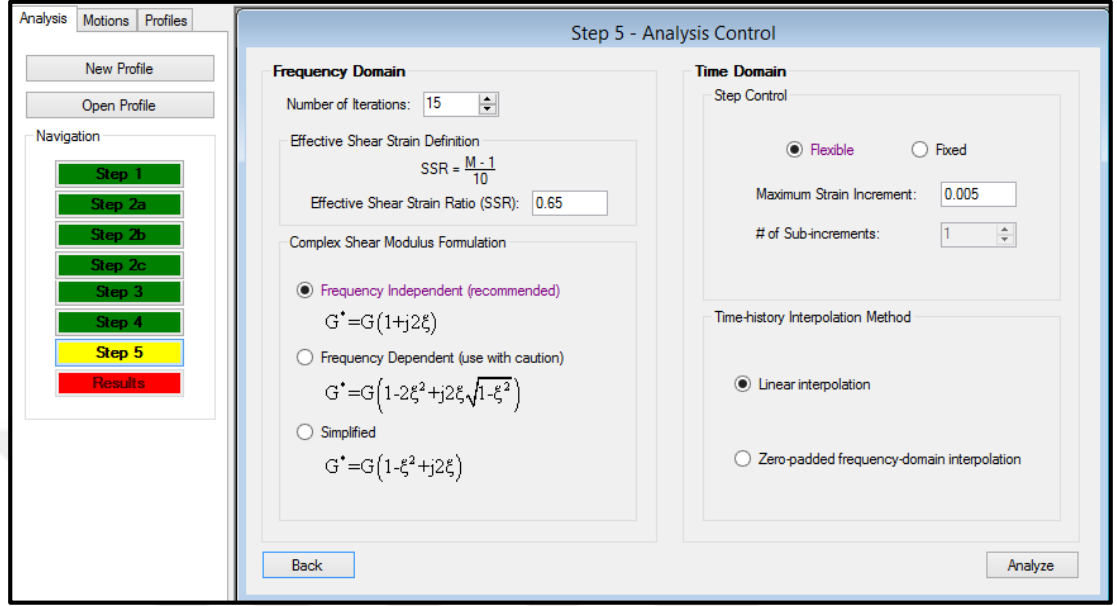
Şekil 4.13 : Kuvvetli yer hareketi kayıtlarının seçilmesi.



Şekil 4.14 : Viskoz sönüm matrisinin belirlenmesi.

Analiz gerçekleştirilmeden önceki son aşama analiz türüne göre farklılık göstermektedir. Son aşama Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Bu aşamada analizin eşdeğer doğrusal olarak yapılması durumunda yapılacak iterasyon sayısı, efektif kayma gerilmesi oranı ve kompleks kayma modülü (G^*) formülü seçilmektedir. Eğer doğrusal olmayan analiz yapılıyorsa adım kontrollü gerçekleşen analiz için gerilme artımının nasıl yapılacağı seçilir. Eğer “flexible” artım seçilirse gerilme değerinin en yüksek

değeri, “fixed” artım yapılacaksa da kaç adımda artım yapılacağını değeri programa girilir (Park ve Hashash, 2004). Ayrıca zaman tanım alanında yapılan analizler için ara değer hesaplamasının ne şekilde yapılacağına da bu aşamada karar verilir.



Şekil 4.15 : Analiz öncesi son parametrelerin seçimi.

Analizler tamamlandıktan sonra program arayüzünde analiz yapılması istenilen tabakalar için sonuçlar yer almaktadır. İstenilen tabaka ve deprem kaydı seçilerek analiz sonuçlar görülebilmekte veya istenilmesi durumunda excel dosyasına aktarılabilmektedir.

Program dahilinde zemin büyütmesi hesaplanmamaktadır. Spektral zemin büyütmesi değerleri alınan veriler kullanılarak yüzeydeki spektral ivmelerin deprem kaydına ait spektral ivmelere bölünmesi ile elde edilmiştir. Çalışma kapsamında analizler sonunca elde edilen spektral zemin büyütmesi değerlerinin yanında yüzey tepki spektrumları, deplasman-derinlik değişimi grafikleri ve şekil değiştirme-derinlik değişimi grafikleri sonraki bölümde verilmiştir.



5. TEK BOYUTLU DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI

Zemin türünün ve yerel zemin sınıfının, anakaya derinliğinin, maksimum yer ivmesinin ve analiz çeşidinin zeminlerin 1 boyutlu dinamik davranışı üzerindeki etkilerini görebilmek amacıyla yapılan bu çalışmada önceki bölümlerde zemin tabakalarının dinamik özelliklerine, bu özelliklerin belirlenmesi için yapılması gereken deneylere, zemin tabakalarının dinamik davranışını yansıtan rijitlik azalım ve sönüm oranı eğrilerini belirlemek için yapılan çalışmalara, TBDY kapsamındaki yerel zemin sınıflarına ve yerel saha davranışı analizi ile ilgili bilgilere yer verilmiştir. Yerel saha davranışlarının üç farklı boyutta doğrusal, doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal analiz olarak gerçekleştirilebileceği aktarılmış, çalışma kapsamında kullanılan zemin modelleri, deprem ivme kayıtları verilmiş ve analiz aşamaları anlatılmıştır.

Bu bölümde ise çalışma kapsamında oluşturulan 20 zemin modeli üzerinde seçilen ve 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g maksimum yer ivmesine ölçeklendirilen 16 deprem ivme kaydı ile gerçekleştirilen tek boyutlu dinamik analizlere ait sonuçlar verilecektir. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler olarak gerçekleştirilen analizler sonucunda yüzey tepki spektrumları, spektral zemin büyötmeleri, deplasman değerlerinin derinlikle değişimi ve birim şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimleri bulunmuştur. Kullanılan her zemin modeli için 16 kuvvetli yer hareketi ivme kaydına ait sonuçlar ile deprem ivme kayıtlarının PGA değerlerine göre gruplandırılması ile oluşturulmuş olan ortalama sonuçların beraber olarak sunulmasının amacı maksimum yer ivmesinin dinamik davranışa olan etkisinin görülebilmesidir.

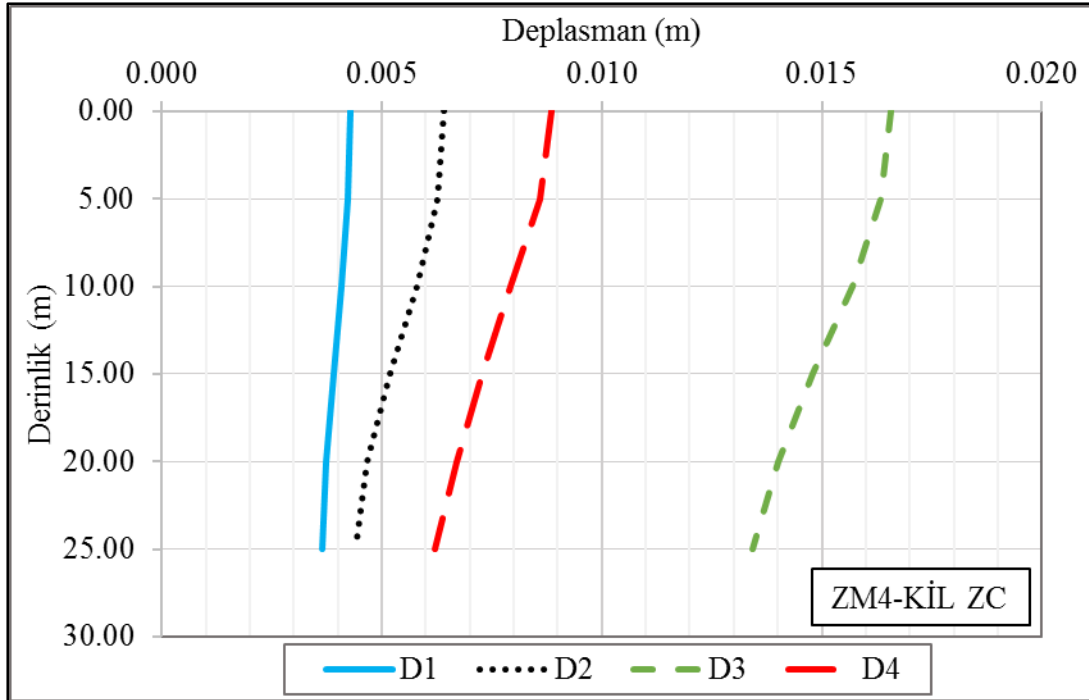
Analizler sonucunda elde edilen veriler eşdeğer doğrusal analizler için ve doğrusal olmayan analizler için ayrı ayrı sunulmuştur. Elde edilen veriler ile deprem kayıtlarının maksimum yer ivmesinin, zemin modellerinde kullanılan anakaya derinliğinin ve anakaya ait kayma dalgası hızı değerinin, zemin modelleri oluşturulurken dikkate alınan TBDY yerel zemin sınıflarının, zemin tabakalarının kum, kil veya kaya cinsinde olmasının ve zayıf özelliklere sahip zemin modellerinde anakaya kadar yerleştirilen geçiş tabakalarının analiz sonuçlarına etkileri değerlendirilmiştir. Sonrasında bu

analizler ile elde edilen yüzey tepki spektrumları TBDY 2018 kapsamında maksimum yer ivmesi 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4 g olan ve İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan 4 noktadan DD-2 deprem yer hareketi için alınan tepki spektrumları ile karşılaştırılmıştır. Deprem yönetmeliği ile belirlenen tasarım spektrumları yerel zemin sınıfının ZB, ZC, ZD ve ZE olduğu durumlar için alınmıştır.

5.1 Eşdeğer Doğrusal Analiz Sonuçları

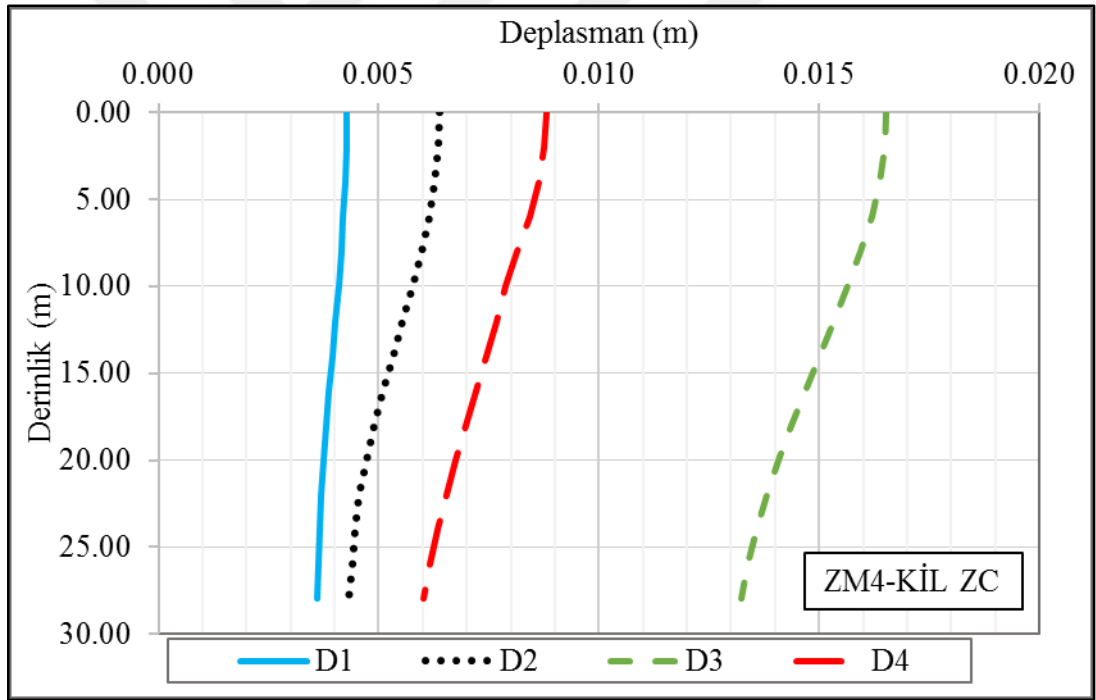
Eşdeğer doğrusal analizler yapılırken zemin tabakaları için birim hacim ağırlık, kayma dalgası hızı, sönüm oranı ve kayma modülü gibi zemin parametreleri kullanılmaktadır. Kayma modülü ve sönüm oranı, azalım eğrileri ile tanımlanmaktadır. Eşdeğer doğrusal saha davranışı analizleri genellikle birim şekil değiştirme değerlerinin $\gamma < 10^{-3}$ olduğu aralıklarda kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında 20 zemin modeli ve 16 deprem ivme kaydı kullanılarak bir boyutlu eşdeğer doğrusal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler öncesinde kil zemin ile oluşturulan yerel zemin sınıfı ZC olan ZM4 modeli kullanılarak 30 m kalınlığındaki zemin tabakasının alt tabakalara ayrılmasının sonuçlarını görebilmek amacıyla eşdeğer doğrusal analizler yapılmıştır. Zemin modeli tek tabaka olarak, 5 m ve 2 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak analizler yapılmıştır.



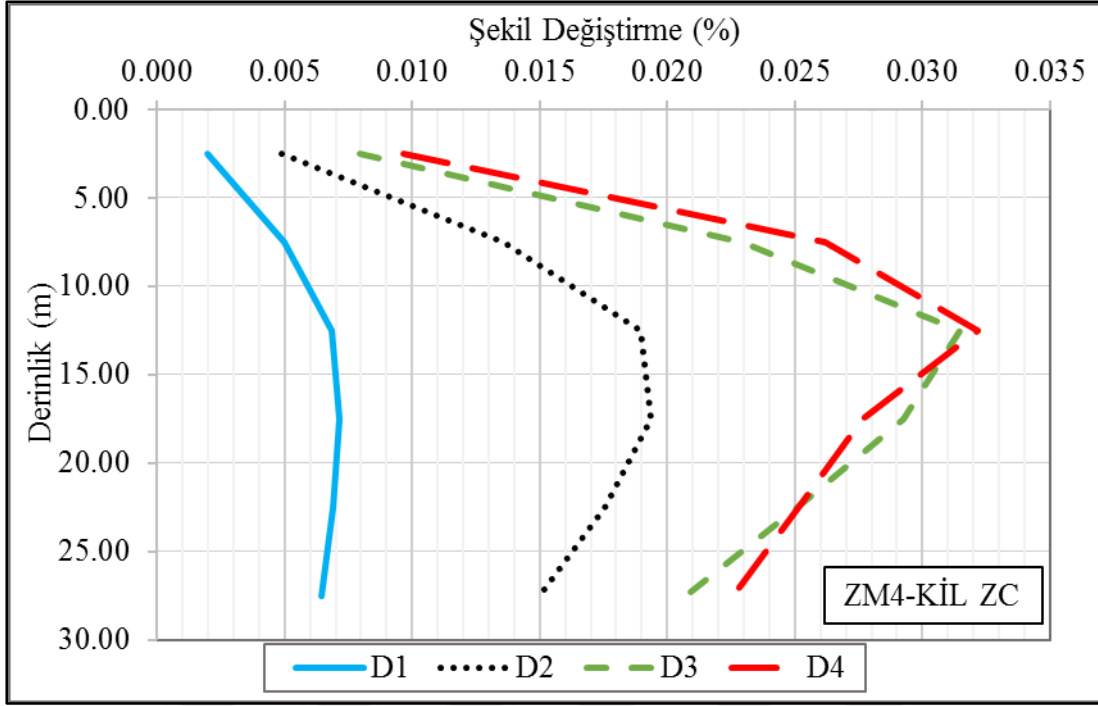
Şekil 5.1 : ZM4'ün 5 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak yapılan analize göre deplasmanın derinlikle değişimi.

Yapılan analizler sonucunda alt tabaka kalınlığının 5 m olduğu durum için deplasman değerinin derinlikle değişimi Şekil 5.1’de gösterildiği gibidir. Analizler sonucunda yüzeyde elde edilen deplasman değerleri PGA değerlerinin 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g olduğu durumlar için sırasıyla 0.4 cm, 0.6 cm, 1.6 cm ve 0.9 cm olarak bulunmuştur. Alt tabaka kalınlığının 2 m olduğu model ile yapılan analizler sonucundada da elde edilen deplasman değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 5.2’de görüldüğü üzere ilk durum ile benzerlik göstermektedir. Burada da yüzeyde oluşan deplasmanlar aynı PGA değerleri için sırasıyla 0.4 cm, 0.6 cm, 1.6 cm ve 0.9 cm olarak elde edilmiştir. Zemin modelinin alt tabakalara ayrılmayarak 30 m kalınlığında tek tabaka şeklinde analiz edildiğinde ise deplasman değeri sadece yüzeyde hesaplanabilmektedir. Bu durumda yüzeydeki deplasman değerleri 0.4 cm, 0.7 cm, 1.7 cm ve 1.0 cm olarak bulunmuştur. Elde edilen deplasman değerleri tüm derinlik seviyeleri için birbiri ile karşılaştırıldığında maksimum farkın %1.2 olduğu hesaplanmıştır.



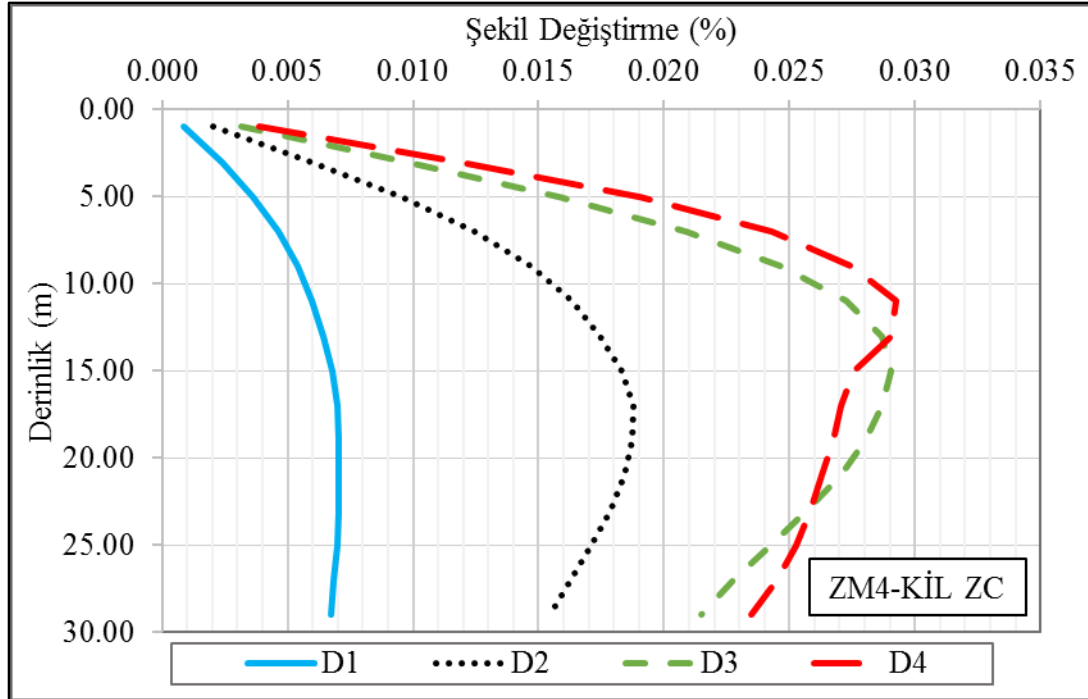
Şekil 5.2 : ZM4’ün 2 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak yapılan analize göre deplasmanın derinlikle değişimi.

Şekil değiştirme değerinin derinlikle değişimi 5 m alt tabakalı model ile yapılan analiz sonucunda Şekil 5.3’te gösterildiği gibidir. Burada maksimum şekil değiştirmenin tüm PGA değerleri için 30 m’lik tabakanın ortasında olduğu görülmektedir ve bu değerler 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g PGA değerleri için ortalama olarak sırasıyla %0.07, %1.69, %2.90 ve %2.97 şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 5.3 : ZM4'ün 5 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak yapılan analize göre şekil değiştirmenin derinlikle değişimi.

Alt tabaka kalınlığının 2 m olduğu durum için yapılan analizler sonucundada elde edilen şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 5.4'de görüldüğü üzere ilk durum ile benzerlik göstermektedir.



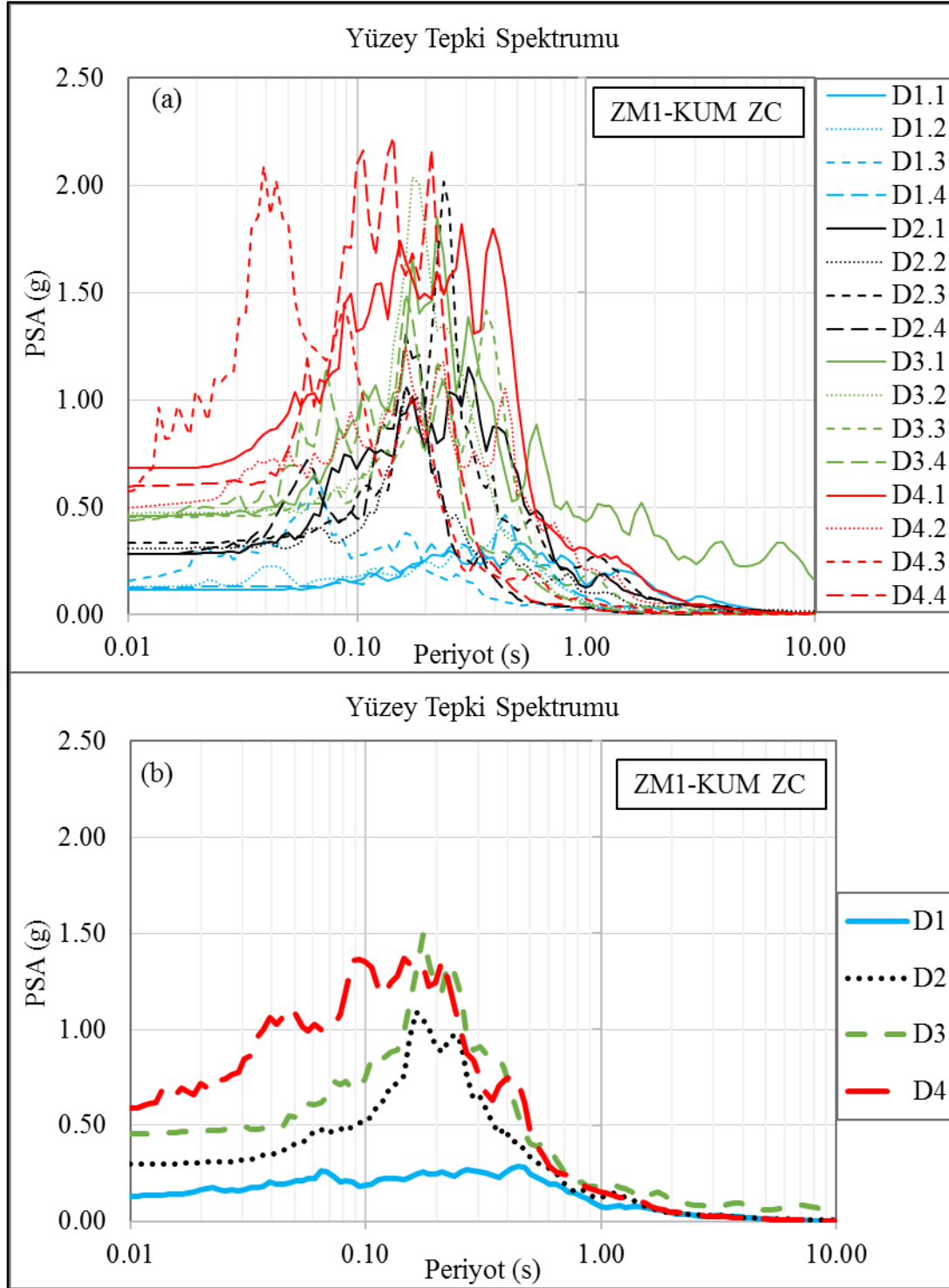
Şekil 5.4 : ZM4'ün 2 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak yapılan analize göre şekil değiştirmenin derinlikle değişimi.

Burada maksimum şekil değiştirme değerleri 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g maksimum yer ivmesi değerleri için ortalama olarak sırasıyla %0.007, %0.018, %0.029 ve %0.029 şeklinde hesaplanmıştır. 30 m kalınlığında tek tabaka şeklinde yapılan analizler sonucunda deplasman değerlerinde olduğu gibi şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi görülememektedir. Burada tabakanın orta noktasında şekil değiştirme değerleri aynı PGA değerleri için sırasıyla %0.006, %0.017, %0.027 ve %0.027 şeklinde elde edilmiştir. Bütün derinlik seviyeleri için 3 duruma ait sonuçlar birbirleri ile karşılaştırıldığında maksimum farkın %2.9 olduğu hesap edilmiştir.

Tek tabaka halinde yapılan analiz sonuçlarında derinlik ile değişimin ayrıntılı olarak görülememesi ile analizlerin alt tabakalara ayrılarak gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Bunun sonucunda kalınlığı 2 m olan alt tabakalara ayrılarak yapılan analizlere ait sonuçlar ile 5 m olan modellere ait sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde yüzey tepki spektrumlarında ve spektral zemin büyütmelelerinde fazla değişiklik gözlenmemektedir. Deplasman ve şekil değiştirme değerlerinin arasındaki farklılık da göz önüne alınmış; işlem hızı, uygulanabilirlik açısından optimizasyon yapılarak analizler 5 m kalınlığında alt tabakalara ayrılarak gerçekleştirilmiştir. Alt tabaka kalınlığının seçimi için gerçekleştirilen analizlere ait tüm sonuçlar EK B’de verilmiştir.

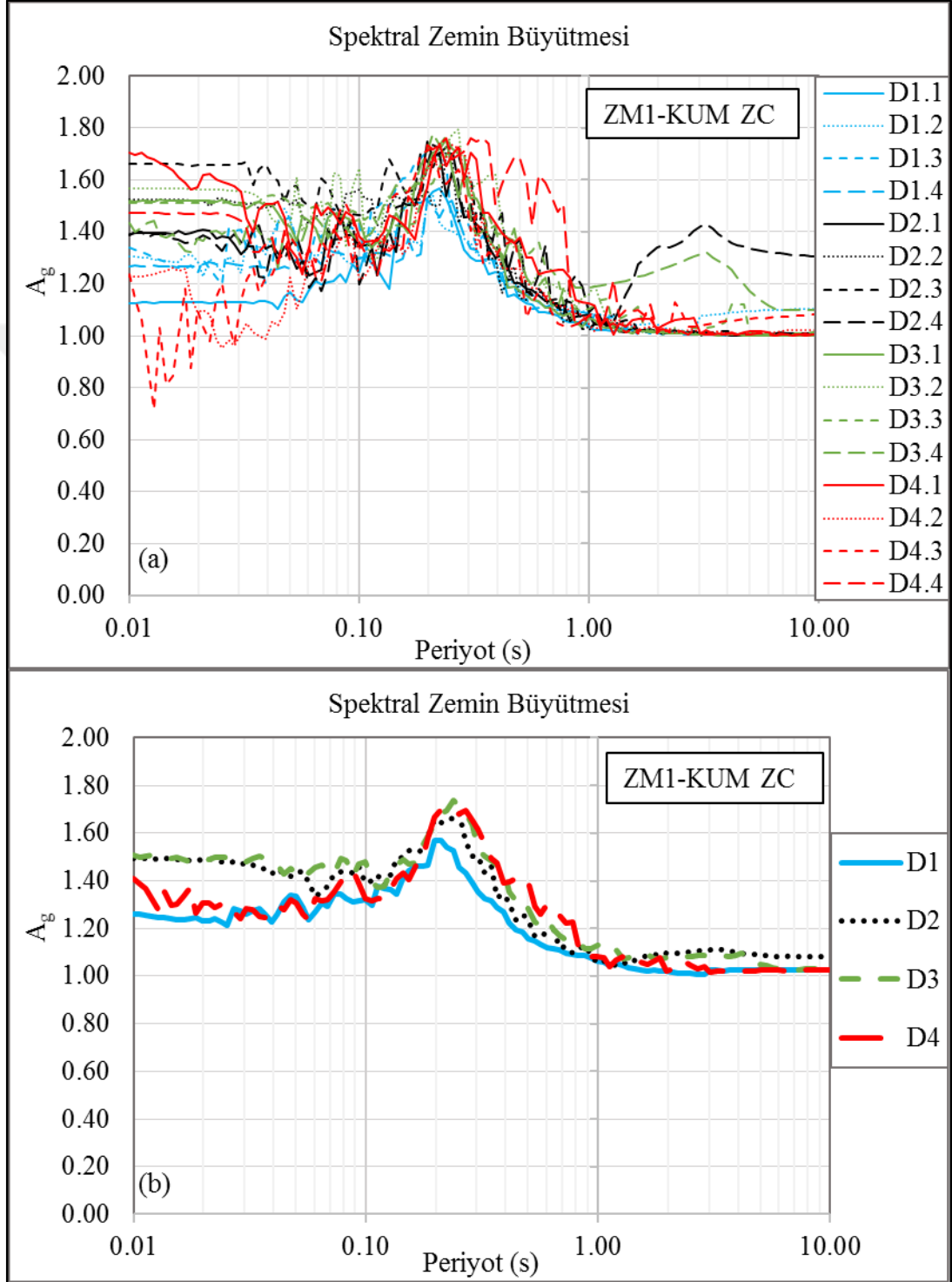
Analizlerde anakayadan etkitilen deprem ivme kayıtları ile yüzeyde maksimum ivmelerin her periyot değeri için bulunması sonucunda yüzey tepki spektrumları elde edilmiştir. ZM1 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda tüm deprem kayıtları için elde edilen tepki spektrumları ve depremlerin PGA değerine göre gruplandırılması ile elde edilen spektrumlar Şekil 5.5’te görülmektedir. Maksimum spektral ivme (PSA) değerleri incelendiğinde en büyük değerin 2.22 g ile Tottori deprem kaydı ile yapılan analiz sonucuna ait olduğu görülmektedir. Analizler sonucunda yüzey tepki spektrumlarındaki maksimum spektral ivmelerin periyotları PGA değeri 0.1 g olan Chichi, Coyote, Nahanni, Northridge-2 ivme kayıtları için sırasıyla 0.5 s, 0.4 s, 0.07 s ve 0.4 s; 0.2 g PGA değerine sahip Imperial Valley, Kocaeli, Loma Prieta, Whittier Narrows ivme kayıtları için sırasıyla 0.3 s, 0.2 s, 0.2 s ve 0.2 s; PGA değeri 0.3 g olan Düzce, Northridge, Parkfield, San Fernando ivme kayıtları için sırasıyla 0.2 s, 0.2 s, 0.4 s ve 0.2 s; 0.4 g PGA değerine sahip San Fernando, Loma Prieta-2, Mammothlake, Manjil ve Tottori ivme kayıtları için sırasıyla 0.4 s, 0.2 s, 0.04 s, 0.2 s olarak bulunmuştur. Depremlere ait ivme

spektrumları bu değerler ile karşılaştırıldığında periyotlarda örtüşme görülmektedir. ZC yerel zemin sınıfına sahip kum zeminlerde gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizde spektral ivme değerleri artış gösterirken zemin tabakaları deprem ivme kayıtlarının frekans içeriğini etkilememektedir.



Şekil 5.5 : ZM1 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Ayrıca Şekil 5.5'te de görüldüğü üzere PGA değerlerine göre gruplandırılan deprem kayıtları ile elde edilen yüzey tepki spektrumlarında maksimum spektral ivmenin olduğu periyot değerleri D1, D2, D3 ve D4 grupları için sırasıyla 0.4.s, 0.2 s, 0.2 s ve 0.2 s olarak elde edilmiştir.

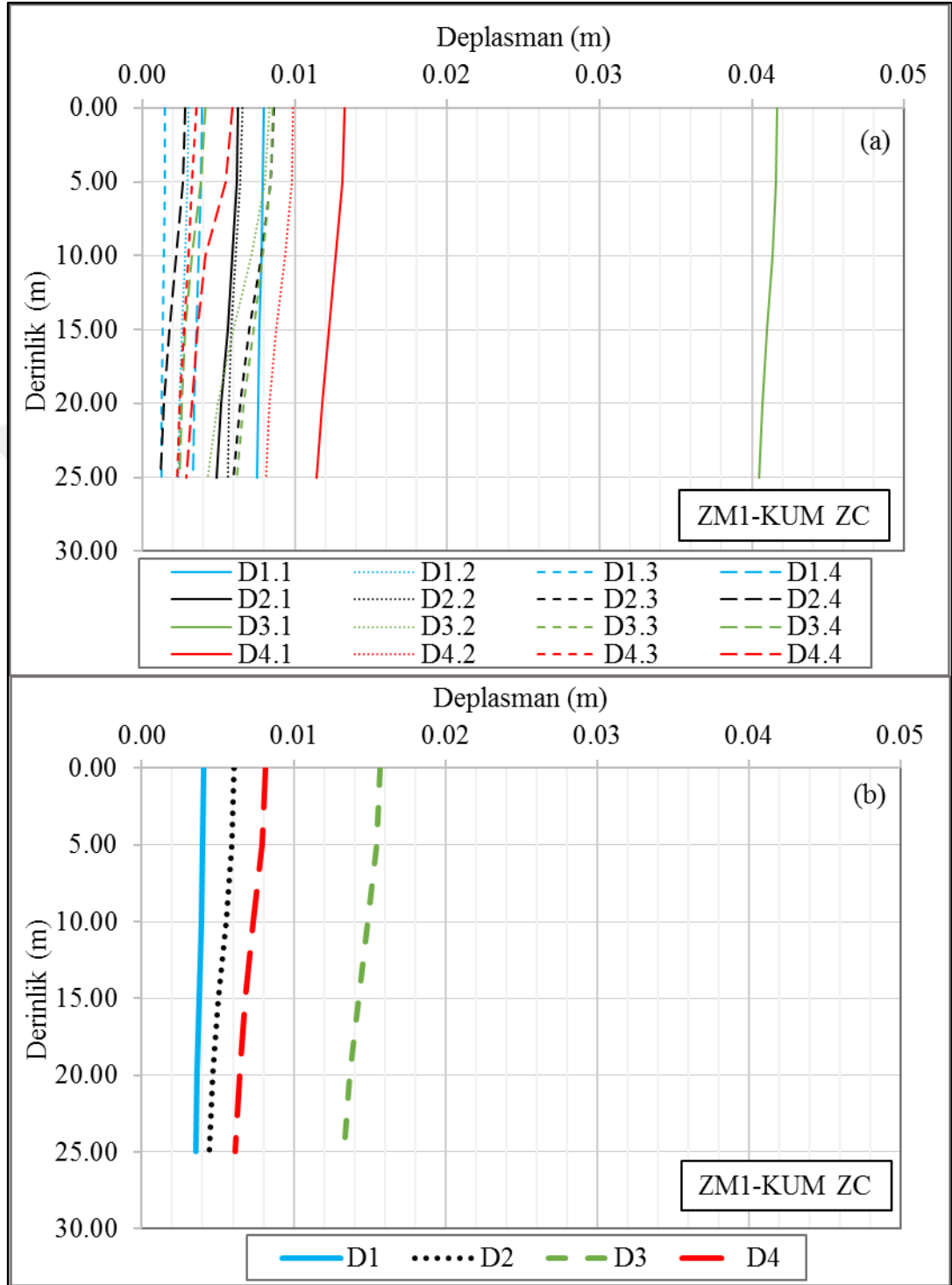


Şekil 5.6 : ZM1 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

ZM1 modeli ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda yüzeyde elde edilen spektral ivme değerleri, deprem kayıtlarında aynı periyottaki spektral ivme değerlerine bölünerek spektral zemin büyütmesi (A_g) değerleri hesaplanmış; bu değerlerin periyot ile değişimleri her deprem kaydı için ayrı ayrı ve PGA değerlerine göre ortalama alınarak Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde maksimum spektral zemin büyütmesi değeri 1.8 olarak 0.3 g PGA değerine sahip olan Northridge depremi ivme kaydı ile gerçekleştirilen analizler sonucunda 0.3 s periyodunda elde edilmiştir. Diğer deprem ivme kayıtları ile yapılan analizler sonucunda maksimum spektral zemin büyütmesi değerleri 1.5 ve 1.8 arasında değişmektedir. Bu spektral büyütme 0.2 s ile 0.3 s arasında periyotlarda meydana gelmiştir. Maksimum spektral ivmeler sıkı kum zeminlerde depremlere ait hakim periyotlara yakın değerlerde elde edilirken maksimum spektral zemin büyütmesi değerleri zemin tabakasına ait hakim periyot (0.21 s) değerine yakın aralıkta bulunmuştur.

ZM1 modeli ve 16 deprem ivme kaydı kullanılarak gerçekleştirilen bir boyutlu eşdeğer doğrusal analizler sonucunda 30 m derinlik boyunca zemin tabakalarında meydana gelen deplasmanlar elde edilmiştir. Şekil 5.7'de her deprem ivme kaydı ile elde edilen deplasman değerlerinin ve PGA değerlerine göre gruplandırılan depremler için ortalama deplasman değerlerinin derinlikle değişimi gösterilmiştir. Yüzeyde oluşan deplasmanlar PGA değeri 0.1 g olan Chichi, Coyote, Nahanni, Northridge-2 ivme kayıtları için sırasıyla 0.7 cm, 0.3 cm, 0.1 cm ve 0.4 cm; 0.2 g PGA değerine sahip Imperial Valley, Kocaeli, Loma Prieta, Whittier Narrows ivme kayıtları için sırasıyla 0.6 cm, 0.6 cm, 0.9 cm ve 0.3 cm, PGA değeri 0.3 g olan Düzce, Northridge, Parkfield, San Fernando ivme kayıtları için sırasıyla 4.1 cm, 0.8 cm, 0.9 cm ve 0.4 cm, 0.4 g PGA değerine sahip San Fernando, Loma Prieta-2, Mammothlake, Manjil ve Tottori ivme kayıtları için sırasıyla 1.3 cm, 0.9 cm, 0.4 cm, 0.6 cm olarak bulunmuştur. Düzce depremi ile yüzeyde elde edilen deplasman değeri haricinde deprem ivme kaydına ait PGA değeri arttıkça yüzeyde oluşacak deplasmanın arttığı söylenebilir. Düzce depreminin bu değerlendirme dışında tutulmasının sebebi yerel bir saha için deprem şiddetinin ve sonucunda oluşacak hasarların açıklanmasında kullanılan Arias şiddeti değerleri ile açıklanabilir. Dördüncü bölümde verilen Arias şiddeti grafikleri incelendiğinde Düzce depreminin Arias şiddetinin diğer depremlerden çok daha yüksek seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu depremin diğer depremlerden farklı

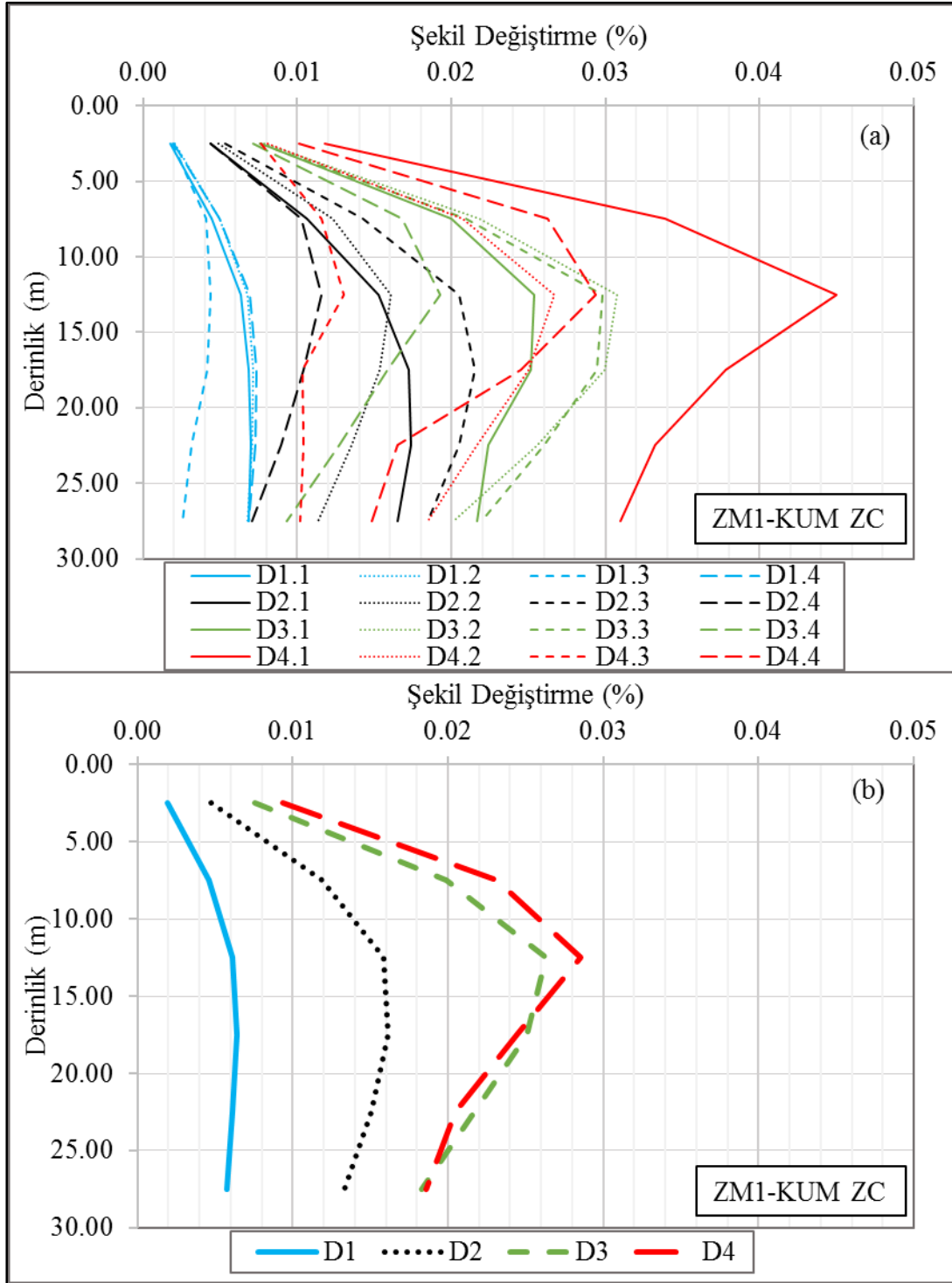
sonuç vermesi PGA değeri 0.3 g olduğu depremlere ait ortalama deplasman değerlerini de yükseltmiştir.



Şekil 5.7 : ZM1 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

ZC yerel zemin sınıfına sahip kum zeminler ile oluşturulan zemin modeli ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda zemin tabakalarında meydana

gelen şekil değiştirmeler Şekil 5.8’de gösterildiği gibi genel olarak 30 m kalınlığındaki zemin tabakasının orta noktasında en yüksek değerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.8 : ZM1 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA’ya göre ortalama.

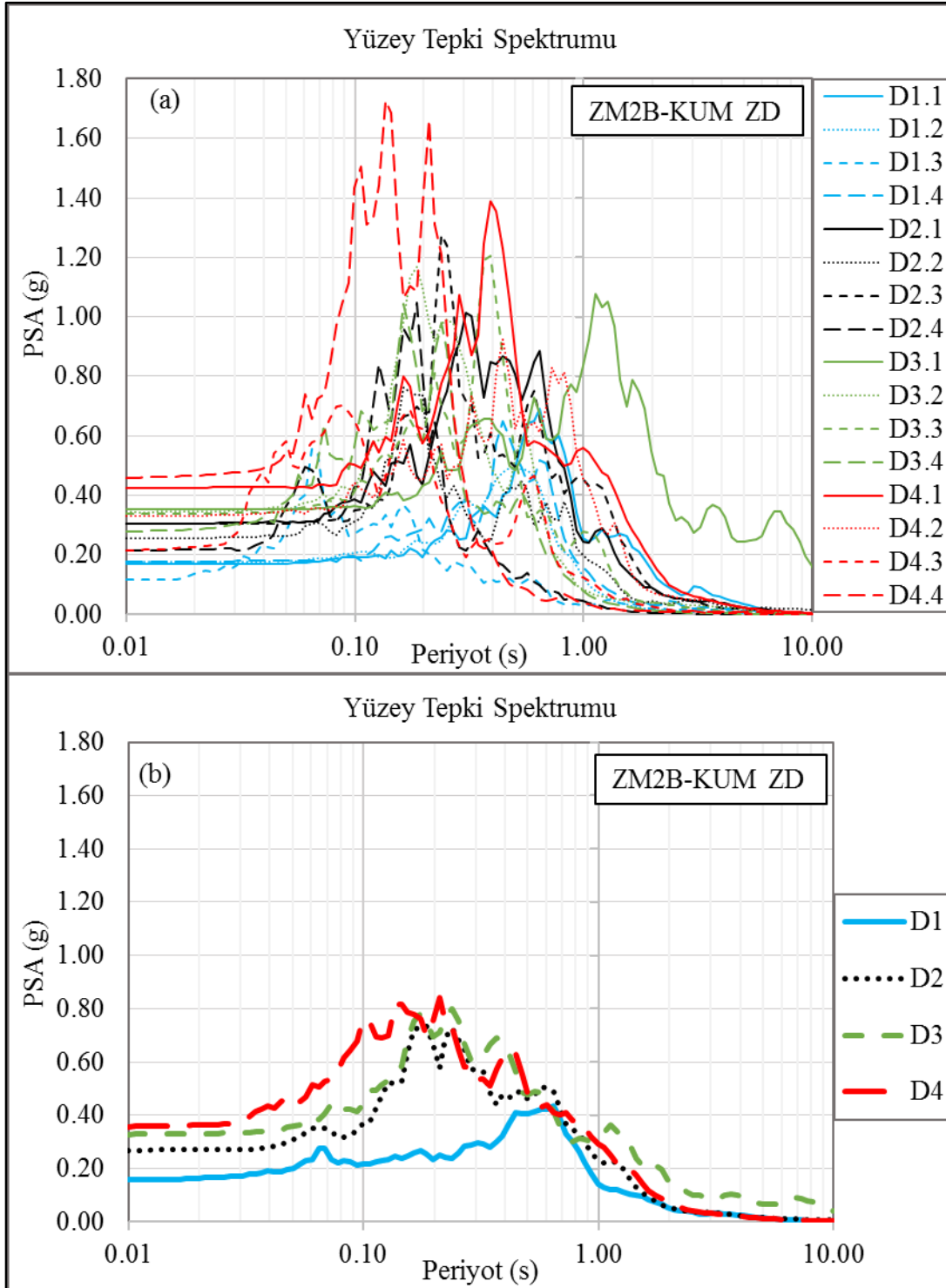
ZM1 modeli ile gerçekleştirilen analizler sonucunda şekil değiştirme değerleri PGA değeri 0.1 g olan Chichi, Coyote, Nahanni, Northridge-2 ivme kayıtları için sırasıyla

%0.007, %0.007, %0.004 ve %0.007; 0.2 g PGA değerine sahip Imperial Valley, Kocaeli, Loma Prieta, Whittier Narrows ivme kayıtları için sırasıyla %0.017, %0.016, %0.021 ve %0.011, PGA değeri 0.3 g olan Düzce, Northridge, Parkfield, San Fernando ivme kayıtları için sırasıyla %0.025, %0.037, %0.029 ve %0.019, 0.4 g PGA değerine sahip San Fernando, Loma Prieta-2, Mammothlake, Manjil ve Tottori ivme kayıtları için %0.044, %0.026, %0.013 ve %0.029 olarak bulunmuştur. Depremlerin PGA değerine göre gruplandırıldığı ortama sonuçlar da incelendiğinde ZC yerel zemin sınıfına sahip kum zeminler için deprem kaydının maksimum ivme değeri arttıkça maksimum şekil değiştirmenin arttığı görülmektedir.

Yerel zemin sınıfı ZD olan kum zeminler ile oluşturulan ZM2A, ZM2B, ZM2C ve ZM2D modellerinde anakaya sırasıyla 30 m, 35 m, 40 m ve 50 m derinlikte yer almaktadır. 30 m kalınlıktaki özelliklerin sabit tutulduğu ve anakayaya kadar geçiş tabakaları yerleştirilmesiyle oluşturulan modeller kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizler sonucunda yüzey tepki spektrumları, spektral zemin büyütmesi değerleri, deplasman ve şekil değiştirmenin derinlikle değişimleri benzerlik göstermektedir. Şekil 5.9’da gösterilen yüzey tepki spektrumları incelendiğinde ZM2B modeli için en büyük spektral ivme değerinin 0.15 s periyot değerinde 1.7 g olarak Tottori ivme kaydı ile yapılan analiz sonucunda elde edildiği görülmektedir. En büyük spektral ivme değeri ZM2A, ZM2C ve ZM2D modelleri için aynı periyot değerinde aynı deprem ivme kaydı için sırasıyla 1.6 g, 1.8 g ve 1.8 g olarak bulunmuştur. Analizler sonucunda yüzeydeki maksimum spektral ivmeler yerel zemin sınıfının ZC olduğu kum modellere göre daha düşük değerlerde elde edilmesine rağmen, bu değerlerin karşılaştığı periyot değerleri 4 zemin modeli için de büyümüştür. Periyot değerleri deprem ivme spektrumları ile karşılaştırıldığında en büyük değişiklik Düzce depremi için 0.2 s’den 1.0 s’ye yükselme ile olmuştur. Tepki spektrumlarına ait değerlerin ortalamaları alındığında maksimum spektral ivme ve periyot değerleri PGA değeri 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g olan gruplar için sırasıyla 0.4 g ve 0.6 s, 0.7g ve 0.2 s, 0.8 g ve 0.2 s, 0.8 g ve 0.2 s olarak bulunmuştur.

Yerel zemin sınıfının ZD olduğu kum zemin modelleri ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda spektral zemin büyütmesi değerleri hesaplanmıştır ve 4 zemin modeli için değerler kendi arasında çok farklılık göstermemektedir. Şekil 5.10’da ZM2B modeliyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarında elde edilen

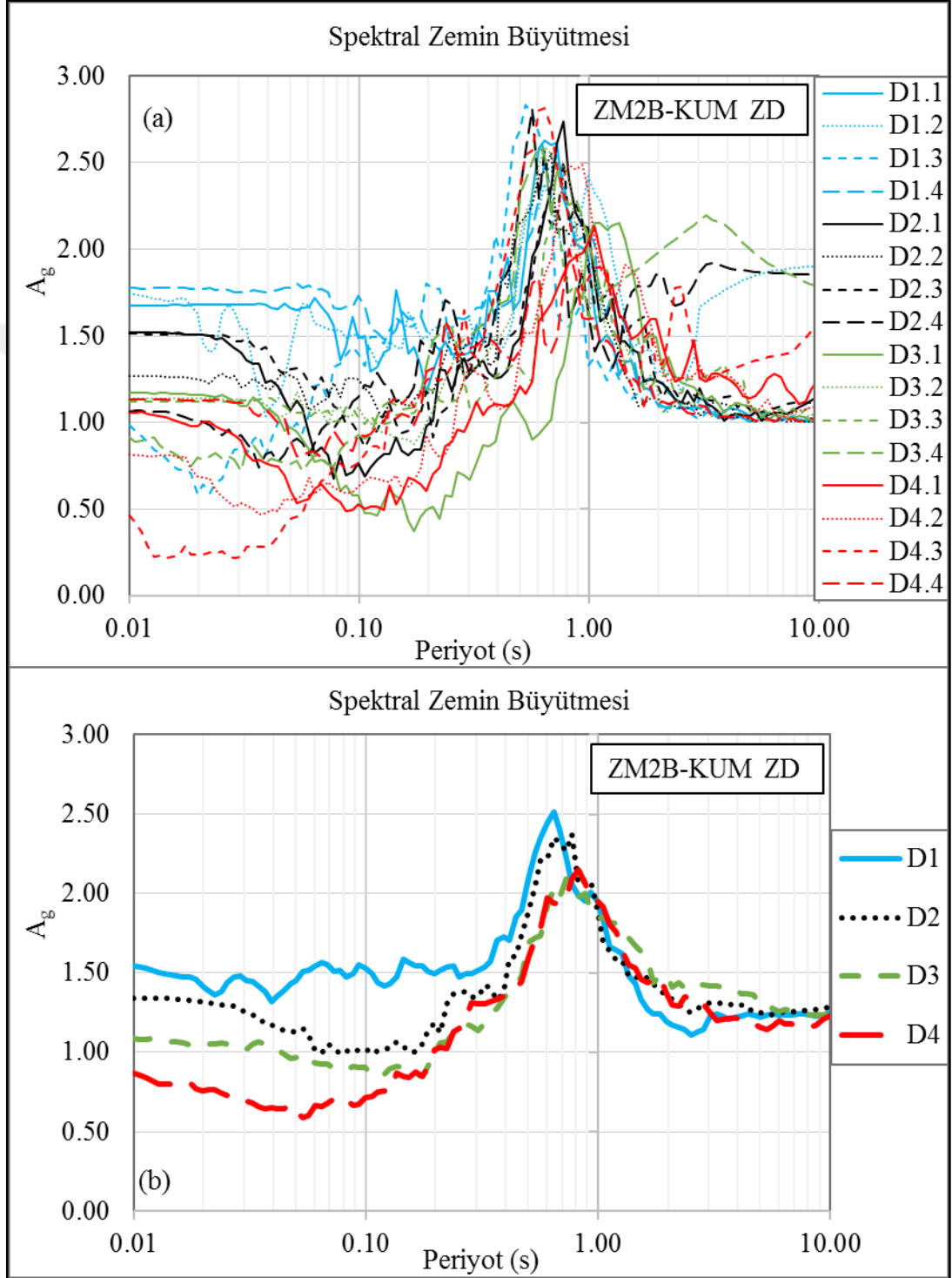
spektral zemin büyütmesi değerleri her deprem kaydı için ayrı ayrı ve PGA değerlerine göre ortalama olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : ZM2B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Spektral zemin büyütmesi sonuçları incelendiğinde D1, D2, D3 ve D4 grupları maksimum spektral zemin büyütmesi değerlerinin için sırasıyla 2.5, 2.3, 2.1 ve 2.1, bu

büyütmelerin gerçekleştiği periyotların sırasıyla 0.6 s, 0.7 s, 0.7 s ve 0.8 s olduğu görülmektedir. Yüzeydeki spektral ivmelerin yüksek periyot değerlerinde oluştuğu göz önüne alındığında spektral zemin büyütmesi değerlerinin de daha yüksek periyot aralıklarında elde edilmiş olması beklenen bir sonuç olmuştur.

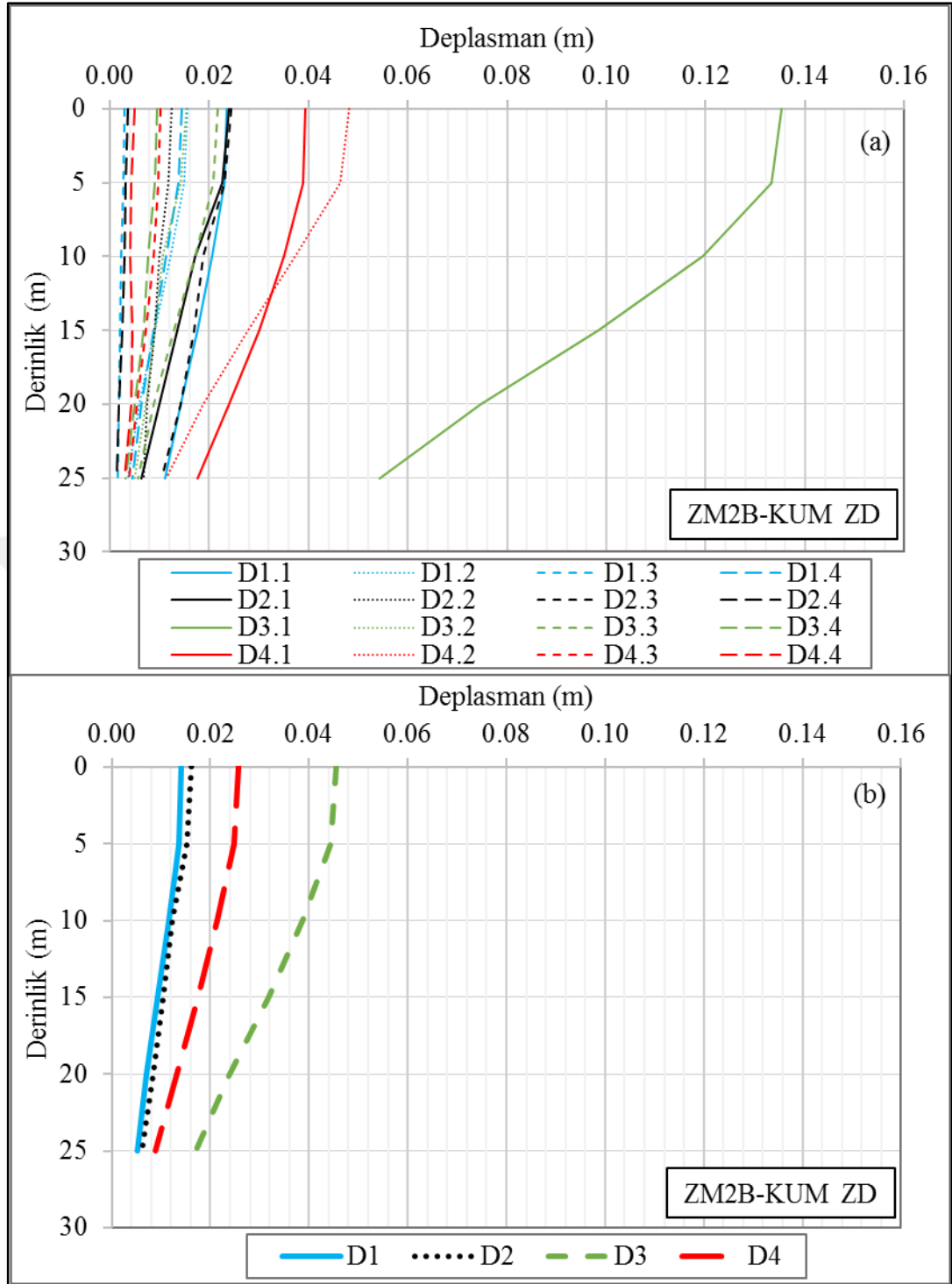


Şekil 5.10 : ZM2B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

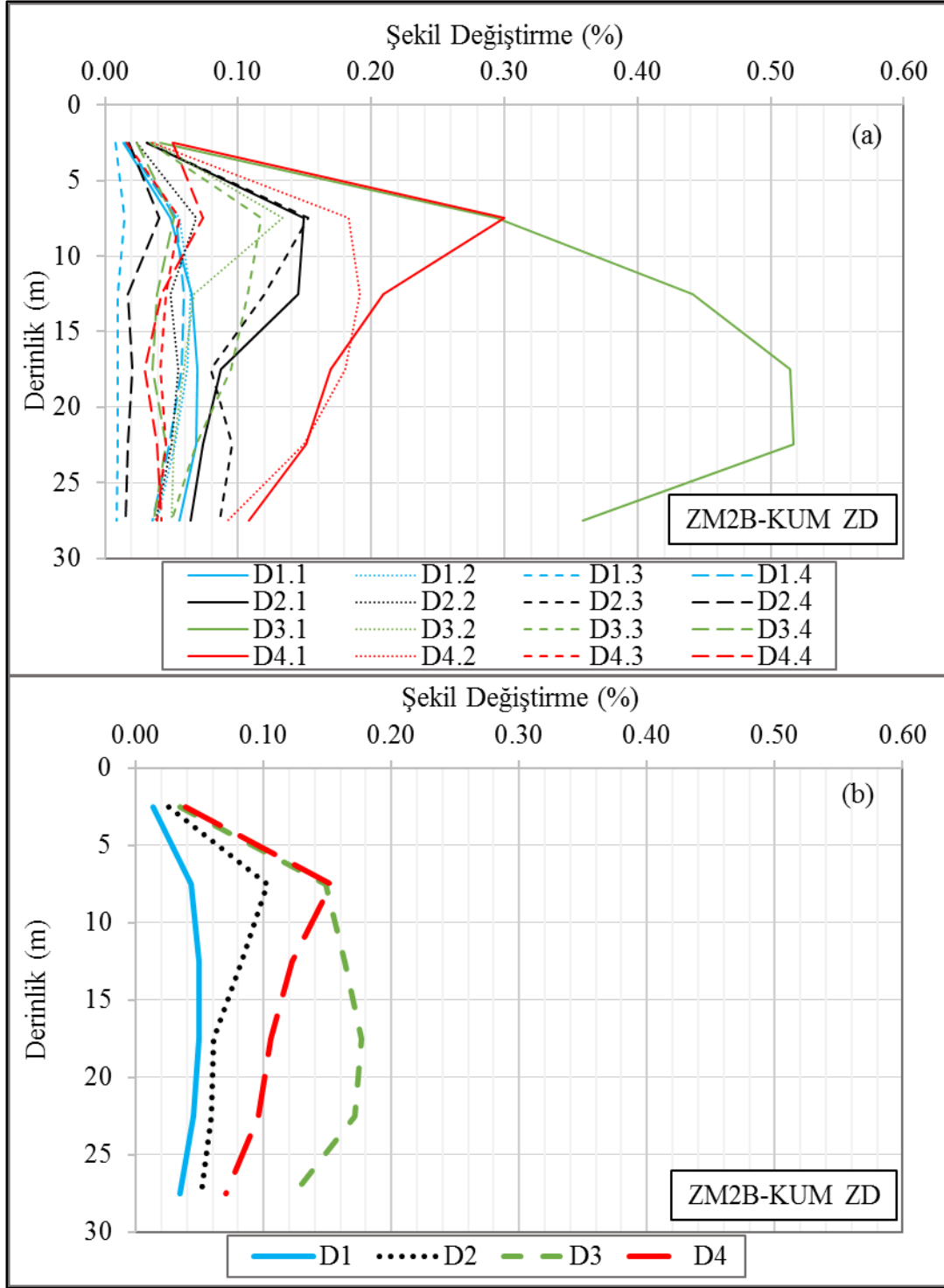
Yerel zemin sınıfının ZD olduğu kum zeminler ile oluşturulan ZM2B modeli ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda elde edilen ve Şekil 5.11’de gösterilen deplasman derinlik grafiği incelendiğinde yüzeyde oluşan maksimum deplasman değeri Düzce deprem kaydı ile gerçekleştirilen analiz sonucunda 16 cm olarak bulunmuştur. Bunun dışında en yüksek değer 0.4 g PGA değerine sahip olan Mammothlake depremi için 5 cm olarak bulunmuştur. Deprem grupları için yüzeyde elde edilen ortalama deplasman değerleri D1, D2, D3 ve D4 için sırasıyla 1.4 cm, 1.6 cm, 4.5 cm ve 2.5 cm olarak bulunmuştur. Düzce depremi ile elde edilen deplasman değeri haricinde deprem ivme kaydına ait PGA değeri arttıkça yüzeyde oluşacak deplasmanın arttığı söylenebilir.

Yerel zemin sınıfının ZD ve zemin türünün kum olduğu diğer 3 zemin modeli için deplasman değerinin derinlikle değişimleri ZM2B modeline ait sonuçlarla kıyaslandığında büyük farklılıklar göze çarpmamaktadır. Bu modellere ait sonuçlar incelendiğinde anakaya derinliği arttıkça yüzeyde oluşan deplasmanların mm seviyesinde arttığı gözlemlenmektedir. Bu modellere ait sonuç grafikleri EK C’de gösterilmiştir.

ZD yerel zemin sınıfına sahip kum zeminler ile oluşturulan modeller kullanılarak gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda zemin tabakalarında meydana gelen şekil değiştirmeler ZM2B modeli için Şekil 5.12’de gösterildiği farklı derinliklerde en yüksek değerine ulaşmaktadır. ZM2B modeli ile gerçekleştirilen analizler sonucunda maksimum şekil değiştirme değerleri PGA değeri 0.1 g olan Chichi, Coyote, Nahanni, Northridge-2 ivme kayıtları için sırasıyla %0.07, %0.06, %0.02 ve %0.06; 0.2 g PGA değerine sahip Imperial Valley, Kocaeli, Loma Prieta, Whittier Narrows ivme kayıtları için sırasıyla %0.15, %0.07, %0.15 ve %0.04, PGA değeri 0.3 g olan Düzce, Northridge, Parkfield, San Fernando ivme kayıtları için sırasıyla %0.51, %0.13, %0.11 ve %0.05, 0.4 g PGA değerine sahip San Fernando, Loma Prieta-2, Mammothlake, Manjil ve Tottori ivme kayıtları için %0.30, %0.19, %0.06 ve %0.07 olarak bulunmuştur. Depremlerin PGA değerine göre gruplandırıldığı ortama sonuçlar da incelendiğinde ZD yerel zemin sınıfına sahip kum zeminler için deprem kaydının maksimum ivme değeri arttıkça maksimum şekil değiştirme değerlerinin de arttığı görülmektedir. ZM1 ile kıyaslandığında şekil değiştirme değerlerinin artması kum zeminlerde yerel zemin sınıfı kötüleştikçe daha yüksek şekil değiştirme değerlerinin oluşacağını göstermektedir.



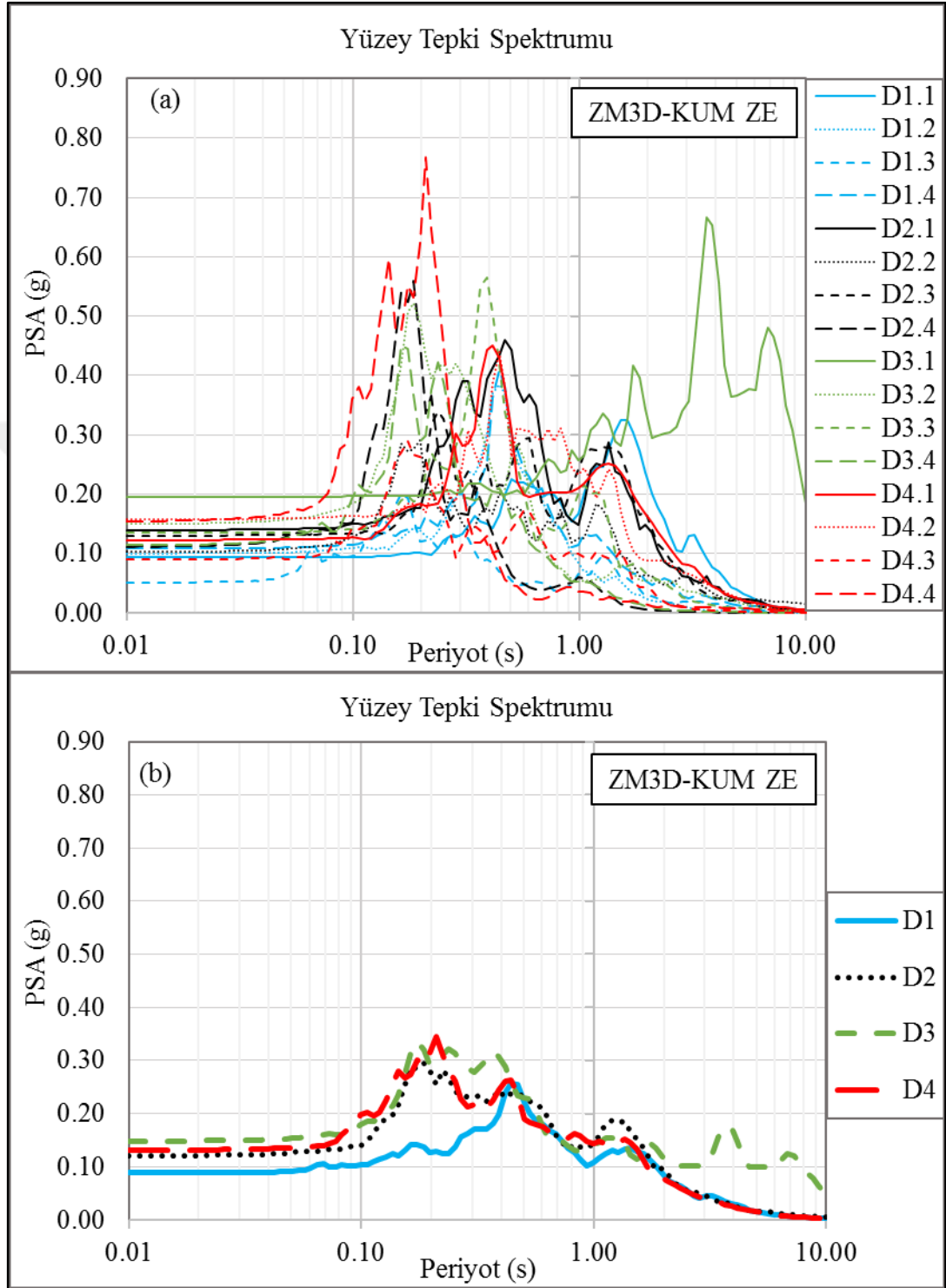
Şekil 5.11 : ZM2B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.



Şekil 5.12 : ZM2B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

ZM3A, ZM3B, ZM3C ve ZM3D kum zeminler ile yerel zemin sınıfları ZE olan ve anakayanın sırasıyla 30 m, 35 m, 40 m ve 50 m derinlikte olduğu modellerdir. Gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda 4 model için yüzey tepki

spektrumları, spektral zemin büyütmesi değerleri, deplasman ve şekil değiştirmenin derinlikle değişimleri benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.13 : ZM3D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

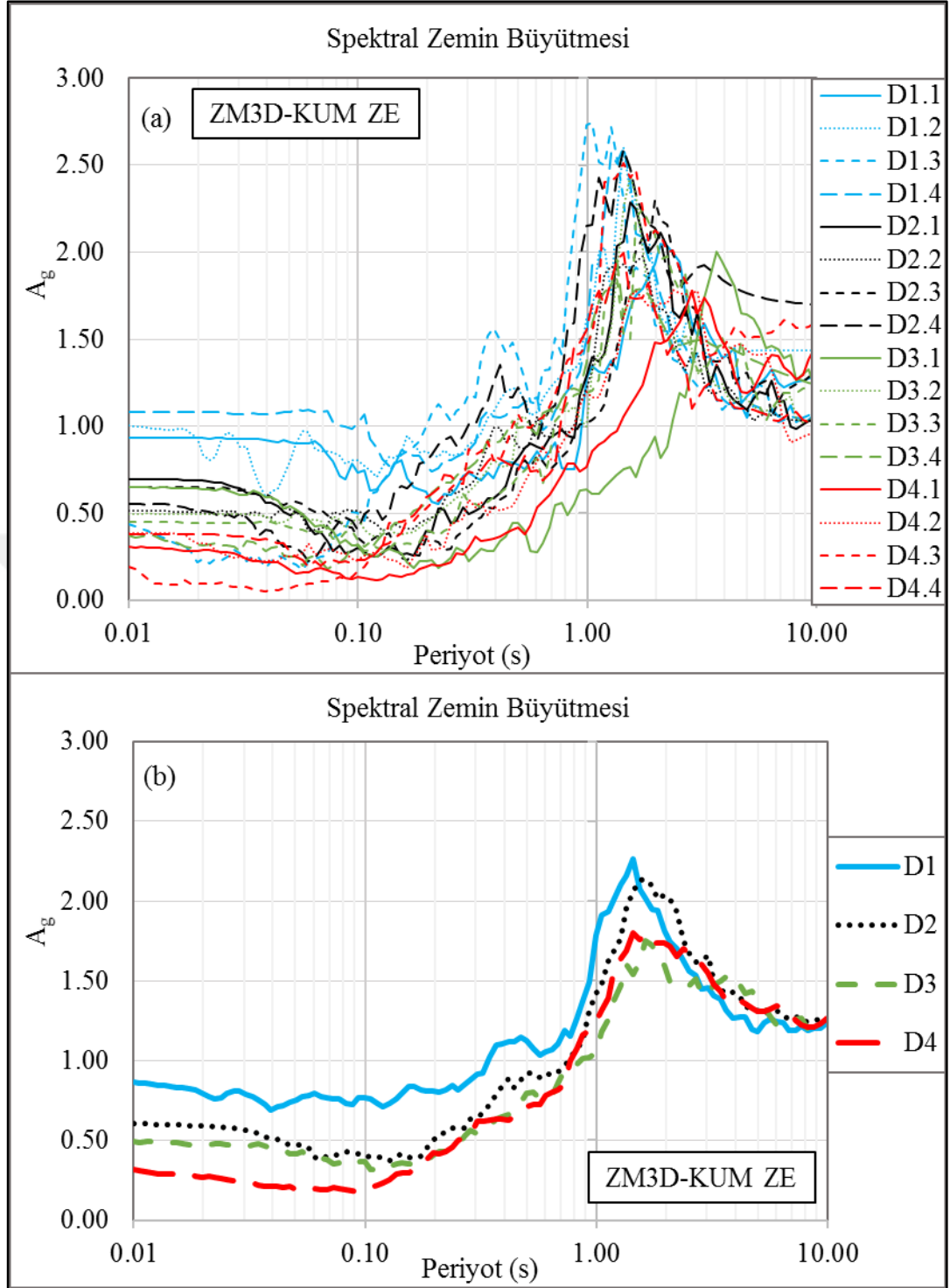
Şekil 5.13'te gösterilen yüzey tepki spektrumları incelendiğinde ZM3D modeli için en büyük spektral ivme değerinin 0.21 s periyot değerinde 0.8 g olarak Tottori ivme kaydı

ile yapılan analiz sonucunda elde edildiği görülmektedir. 16 depreme ait yüzey tepki spektrumları incelendiğinde yerel zemin sınıfının ZC ve ZD olduğu duruma göre spektral ivme değerlerinin azaldığı görülürken spektral ivmelere ait periyot değerleri artış göstermiştir. Yüzey tepki spektrumlarında ortalama maksimum spektral ivmeler ve periyotları D1, D2, D3 ve D4 deprem grupları için sırasıyla 0.25 g ve 0.47 s, 0.29 g ve 0.18 s, 0.33 g ve 0.17 s, 0.34 g ve 0.21 s olarak bulunmuştur.

Yüzey tepki spektrumlarında elde edilen spektral ivmeler her deprem ivme kaydında aynı periyotta bulunan spektral ivmelere bölünerek spektral zemin büyütmesi değerleri hesaplanmıştır. Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum zemin modelleri ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda spektral zemin büyütmesi değerleri hesaplanmıştır ve 4 zemin modeli için değerler kendi arasında çok farklılık göstermemektedir. Şekil 5.14'te anakaya derinliğinin 50 m olduğu ZM3D modeliyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarında elde edilen spektral zemin büyütmesi değerleri her deprem kaydı için ayrı ayrı ve PGA değerlerine göre ortalama olarak gösterilmiştir.

Spektral zemin büyütmesi sonuçları incelendiğinde maksimum spektral zemin büyütmesi değerinin 2.8 ile 1.0 s periyotta PGA değerinin 0.1 g olduğu Nahanni depremine ait olduğu görülmektedir. Aynı değer ZM3A modeli için 2.9 olarak 0.6 s periyotta, ZM3B ve ZM3C modelleri için 2.9 olarak 1.0 s periyotta elde edilmiştir. ZM3D modeli ile gerçekleştirilen analiz sonuçları incelendiğinde D1, D2, D3 ve D4 deprem grupları için maksimum spektral zemin büyütmesinin ortalamalarının sırasıyla 2.2, 2.1, 1.8 ve 1.8 ve bu büyütmelerin gerçekleştiği periyotların sırasıyla 1.4 s, 1.6 s, 1.6 s ve 1.4 s olduğu görülmektedir. Bu değerler ZM3A, ZM3B ve ZM3C ile elde edilen değerler ile uyumludur.

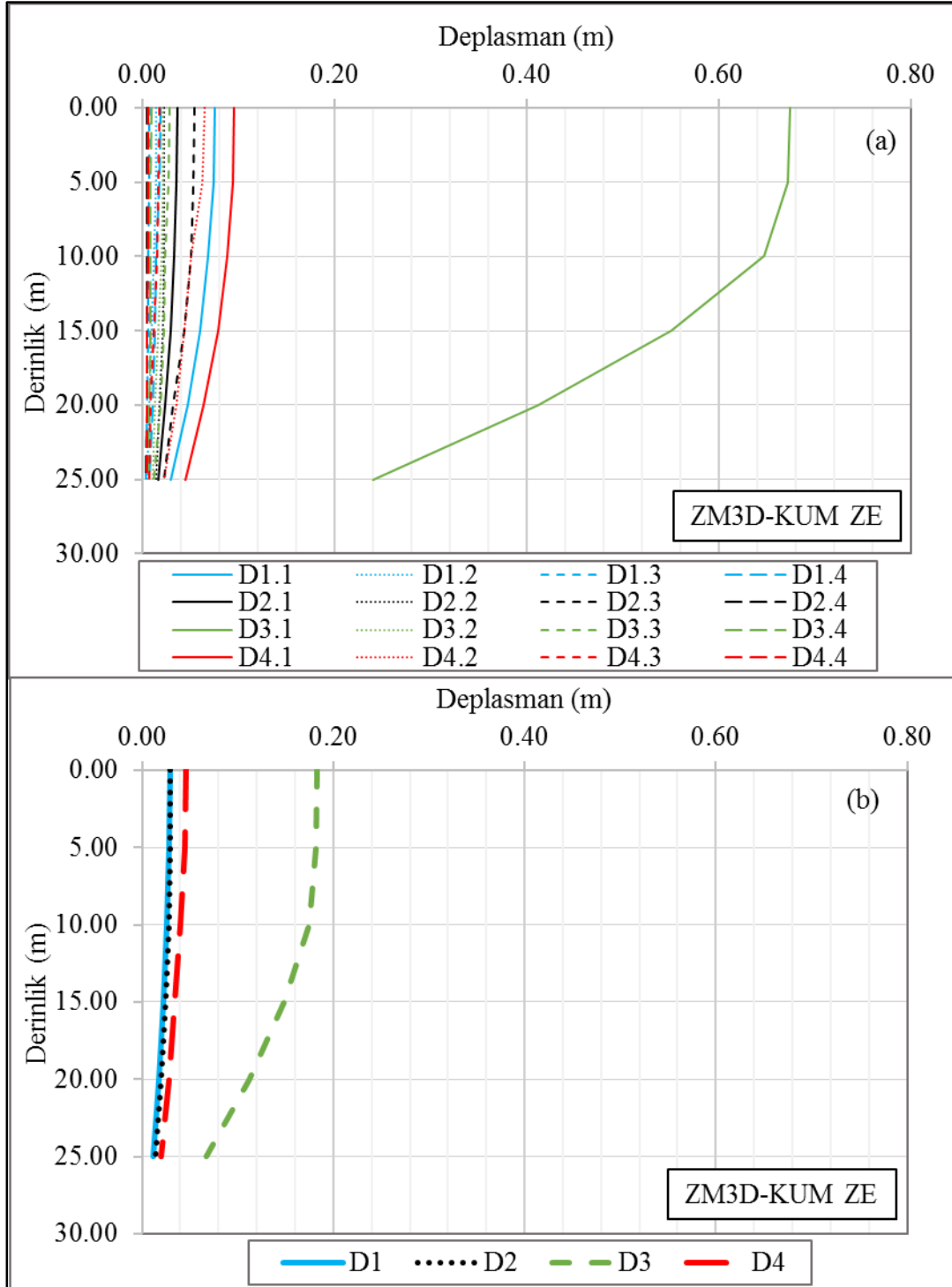
Yüzeydeki spektral ivmelerin yerel zemin sınıfının ZC ve ZD olduğu kum zemin ile oluşturulan modellere göre daha düşük olduğu fakat daha yüksek periyot değerlerinde olduğu göz önüne alındığında spektral zemin büyütmesinin daha düşük olmasına rağmen daha yüksek periyot aralıklarında elde edilmiş olması beklenen bir sonuç olmuştur. Buradan hareketle 30 m kalınlığında bir tabakanın kum zeminlerden oluşması ve ZE gibi rijitliği düşük bir yerel zemin sınıfına sahip olması durumunda zemin tabakalarının yüksek büyütme yapmadığı ama hareketin frekans içeriğini büyük oranda değiştirdiği söylenebilir .



Şekil 5.14 : ZM3D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum zeminler ile oluşturulan ZM3D modeli ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda elde edilen ve Şekil 5.15'te gösterilen deplasman derinlik grafiği incelendiğinde yüzeyde oluşan maksimum deplasman değeri Düzce deprem kaydı ile gerçekleştirilen analiz sonucunda 63 cm

olarak bulunmuştur. Deprem grupları için yüzeyde elde edilen ortalama deplasman değerleri D1, D2, D3 ve D4 için sırasıyla 2.8 cm, 3.0 cm, 18.0 cm ve 4.5 cm olarak bulunmuştur.



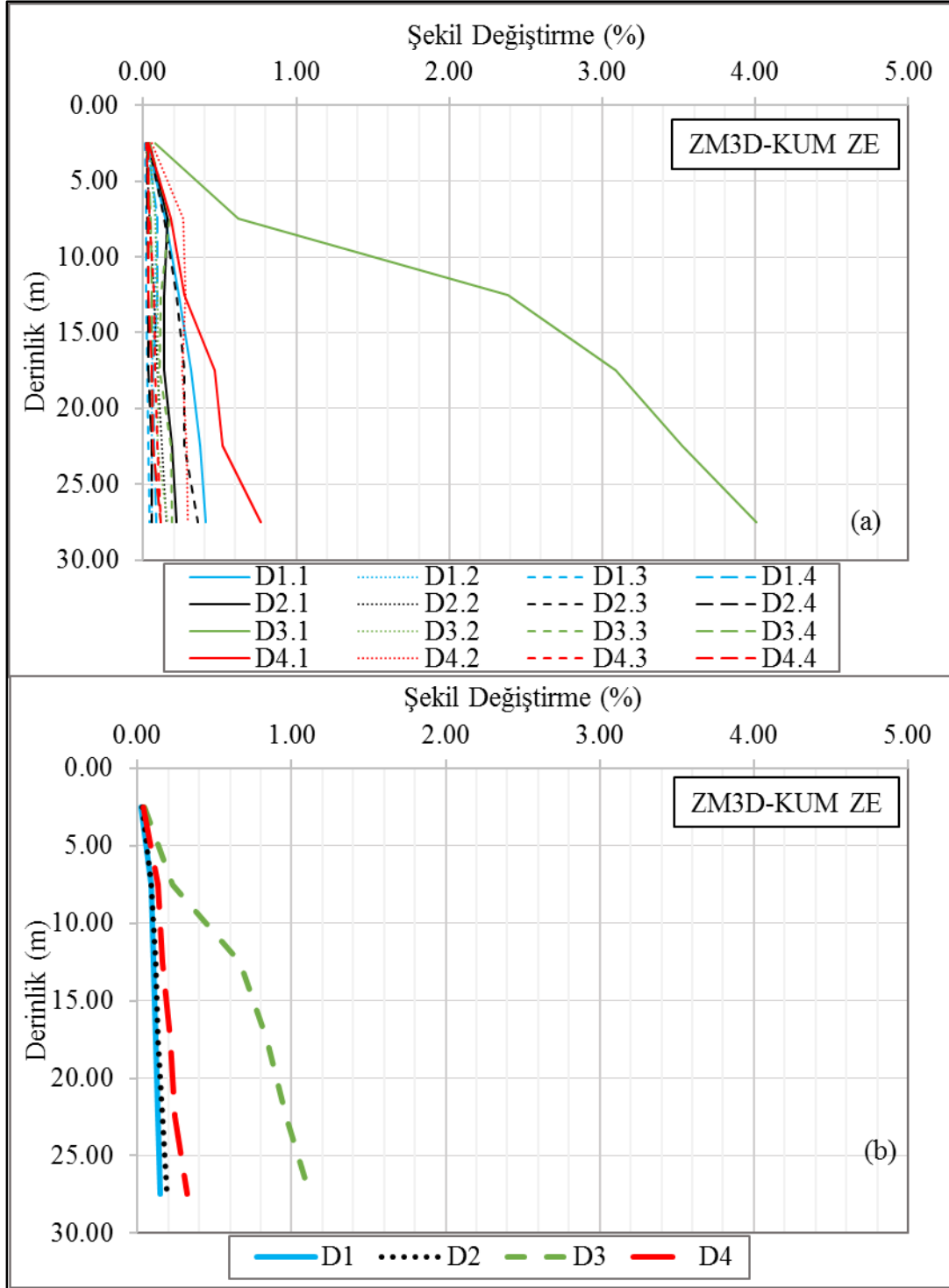
Şekil 5.15 : ZM3D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Düzce depremi ile yüzeyde elde edilen deplasman değeri haricinde deprem ivme kaydına ait PGA değeri arttıkça yüzeyde oluşacak deplasmanın arttığı söylenebilir. 0.3 g PGA değerine sahip Düzce depremi ölçeklendirilmeden önce 0.053 g PGA değerine sahiptir. Saha davranışı analizlerinde doğrusal olmayan analizlerde kullanılacak depremler için ölçeklendirme katsayısının 0.5 ile 2.0 arasında olması önerilmektedir (Fahjan, 2008). Düzce deprem ivme kaydı ölçeklendirilirken bu sınır aşılmış ve bu durum kayda ait Arias şiddetinin yükselmesine sebep olmuştur. Kayda ait maksimum Arias şiddeti değeri ölçeklendirilmemiş durumda 0.05 m/s iken ölçeklendirilmiş durumda 3.50 m/s değerine yükselerek depremin etkisini arttırmıştır.

ZE yerel zemin sınıfına sahip kum zeminler ile oluşturulan modeller kullanılarak gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda zemin tabakalarında meydana gelen şekil değiştirmeler ZM3D modeli için Şekil 5.16'da gösterildiği gibi derinlik arttıkça artmaktadır. Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum zeminler ile oluşturulan modellerde eşdeğer doğrusal analiz sonuçları şekil değiştirme açısından yakın sonuçlar vermektedir. Deplasman değerlerinde olduğu gibi en yüksek şekil değiştirme değeri %4.0 ile Düzce depremine aittir. Deprem gruplarına göre maksimum şekil değiştirme değerleri D1, D2, D3 ve D4 için sırasıyla %0.14, %0.19, %1.16 ve %0.32'dir. Bu sonuçlar incelendiğinde ZE yerel zemin sınıfına sahip kum zeminler için deprem kaydının PGA değeri arttıkça maksimum şekil değiştirme değerlerinin arttığı söylenebilir. Yerel zemin sınıfının ZC ve ZD olduğu kum zeminler ile kıyaslandığında şekil değiştirme değerlerinin artması kum zeminlerde yerel zemin sınıfının kötüleştiğinde daha yüksek şekil değiştirme değerlerinin oluşacağını göstermektedir.

Deplasmanlar ve şekil değiştirmeler Deepsoil programında farklı iterasyonlar kullanılarak hesaplanmaktadır. Deplasman değerleri anakayadan zemin yüzeyine doğru kümülatif bir şekilde hesaplanırken şekil değiştirme değerleri iki derinlik arasında hesaplanmaktadır. Düzce depremine ait sonuçlarda 20 m ile 25 m derinliklerinde deplasman değerleri 0.41 m ve 0.24 m olarak hesaplanmıştır. Şekil değiştirme en basit haliyle Denklem 5.1 ile hesaplanacak olursa 5 m kalınlığındaki tabakada deplasman değerinin değişimi 0.17 m olduğu için şekil değiştirme değeri %3.4 olacaktır. Bu değer Şekil 5.16'da 22.5 m derinlikteki %3.5 değeri ile uyumludur.

$$\gamma(z, t) = \frac{\delta u}{\delta z} \quad (5.1)$$



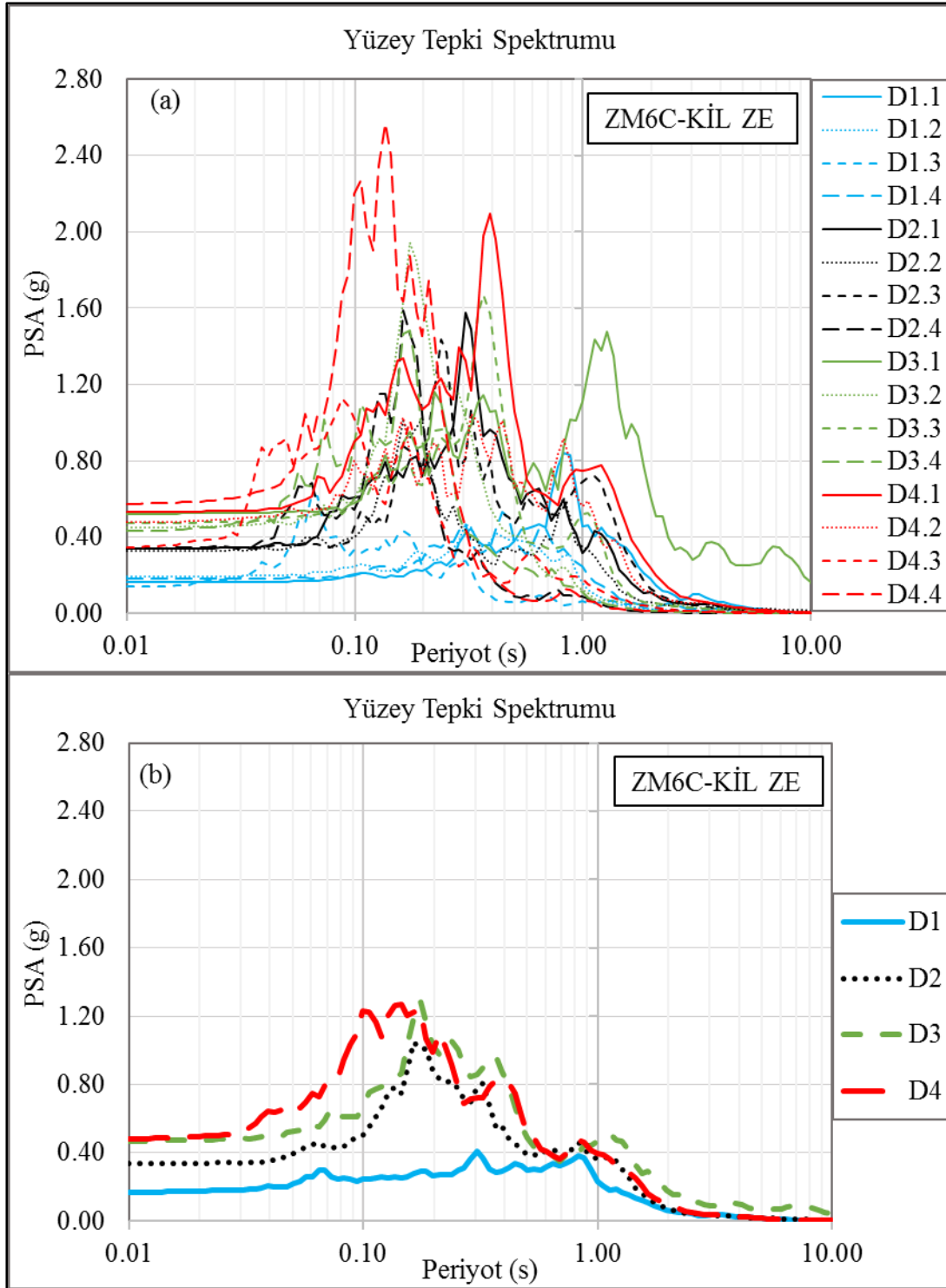
Şekil 5.16 : ZM3D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre şekil değişirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Kil zeminler ile oluşturulan ve yerel zemin sınıfının ZC ve ZD olduğu zemin modelleri kullanılarak gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları genel olarak kum zeminler ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile örtüşmektedir. ZM4 modeli ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda spektral zemin büyütmesi

değerleri 1.6-1.7 arasında bulunmuştur. Bu spektral büyütme 0.2 s ile 0.3 s arasındaki periyotlarda gerçekleşmiştir. Analizler sonucunda yeryüzünde meydana gelen en büyük ortalama deplasman değerine 0.3 g'ye ölçeklendirilen deprem kayıtları ile yapılan analizlerde 1.6 cm olarak rastlanmıştır. ZC yerel zemin sınıfına sahip kil zeminler için deprem kaydının maksimum ivme değeri arttıkça maksimum şekil değiştirme oranı artmıştır.

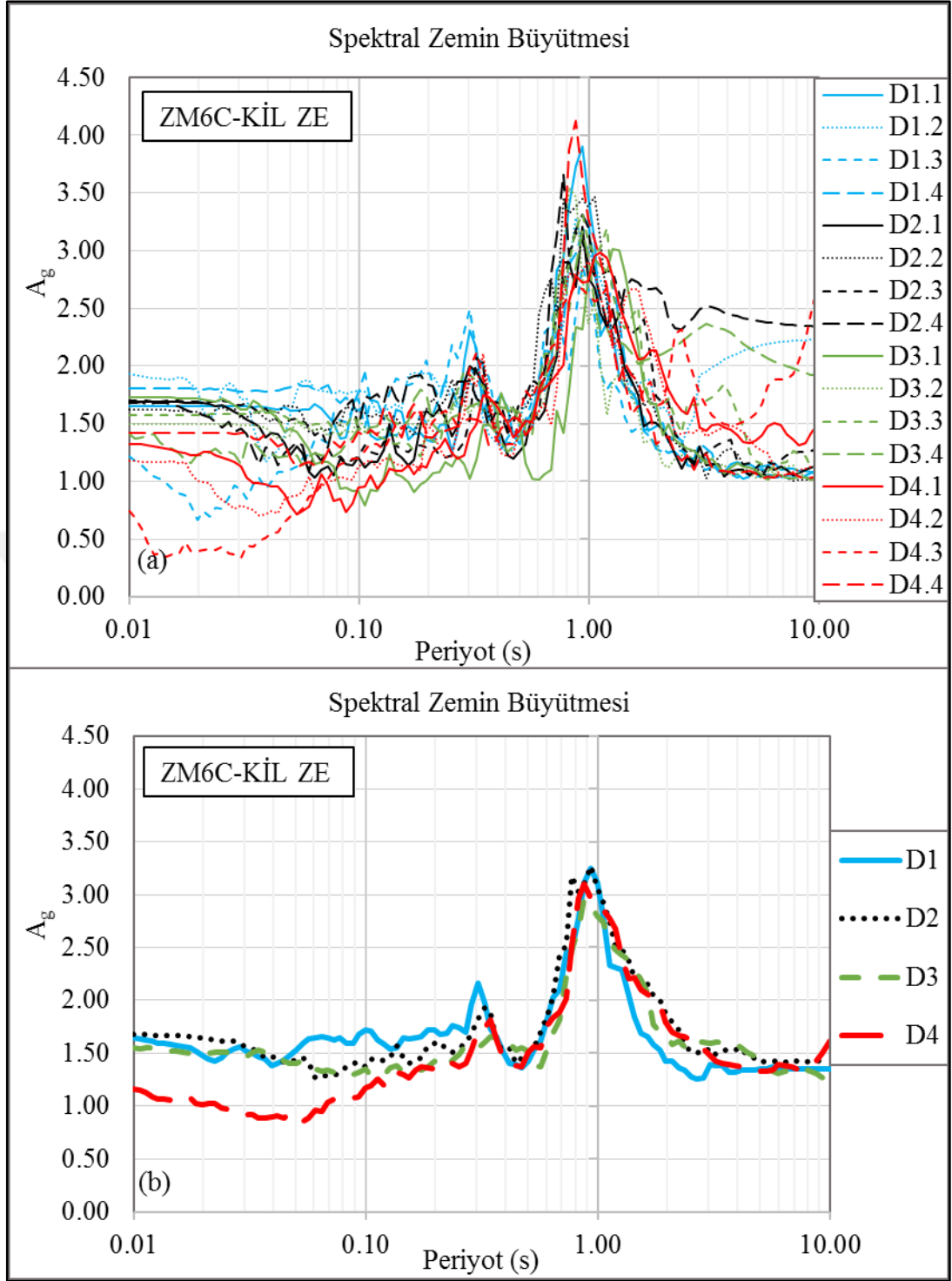
Yerel zemin sınıfı ZD olan kil zeminler ile oluşturulan ZM5A, ZM5B, ZM5C ve ZM5D zemin modelleri ile yapılan eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarında maksimum spektral büyütme değerlerinin 2.3 ile 2.7 arasında değiştiği görülmektedir. Bu büyütme değerleri 0.6 s ve 0.8 s periyot aralıklarında gerçekleşmiştir. Kum zemin ile oluşturulan ve yerel zemin sınıfı ZD olan modellere göre spektral büyütme değerleri daha yüksek olarak bulunmuştur. Yeryüzünde meydana gelen en büyük ortalama deplasman değeri 4.3 cm ile anakaya derinliğinin 50 m olduğu ZM5D zemin modeli ve PGA değerleri 0.3 g olan depremler kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilmiştir. Şekil değiştirme değerleri deprem kayıtlarına ait maksimum yer ivmesi arttıkça artmaktadır. Geçiş tabakası kalınlığı PGA değeri 0.3 g ve 0.4 g olan depremler için şekil değiştirme değerleri üzerinde farklılığa neden olmuştur.

Kil zeminler ile oluşturulan ve yerel zemin sınıfı ZE olan ZM6A, ZM6B, ZM6C ve ZM6D modelleri ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları diğer yerel zemin sınıflarının aksine kum zemin ile oluşturulan ve yerel zemin sınıfının ZE olduğu modeller ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarından farklıdır. Bu modellere ait sonuçlar kendi içinde büyük farklılık göstermezken Şekil 5.17'de gösterilen yüzey tepki spektrumları incelendiğinde ZM6C modeli için eşdeğer doğrusal analizler sonucunda en büyük spektral ivme 2.5 g ile 0.15 s periyot değerinde Tottori depremi ile yapılan analize aittir. En büyük spektral ivme değeri ZM6A, ZM6B ve ZM6D modelleri için aynı periyot değerinde aynı deprem ivme kaydı için sırasıyla 2.2 g, 2.3 g ve 2.4 g olarak bulunmuştur. Yüzey tepki spektrumlarına ait değerlerin ortalaması alındığında deprem grupları için en büyük spektral ivmeler ve periyotları D1, D2, D3 ve D4 için sırasıyla 0.4 g ve 0.30 s, 1.0 g ve 0.15 s, 1.3 g ve 0.20 s, 1.3 g ve 0.15 s olarak bulunmuştur. Bu değerler yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum modeller ile yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında killerde yüzeyde elde edilen maksimum spektral ivmelerin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.17 : ZM6C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

ZM6C modeli kullanılarak elde edilen yüzey spektral ivmeleri aynı periyot değerindeki deprem spektral ivmelerine bölünerek spektral zemin büyütmesi değerleri bulunmuştur ve bu değerler Şekil 5.18'de gösterilmiştir.



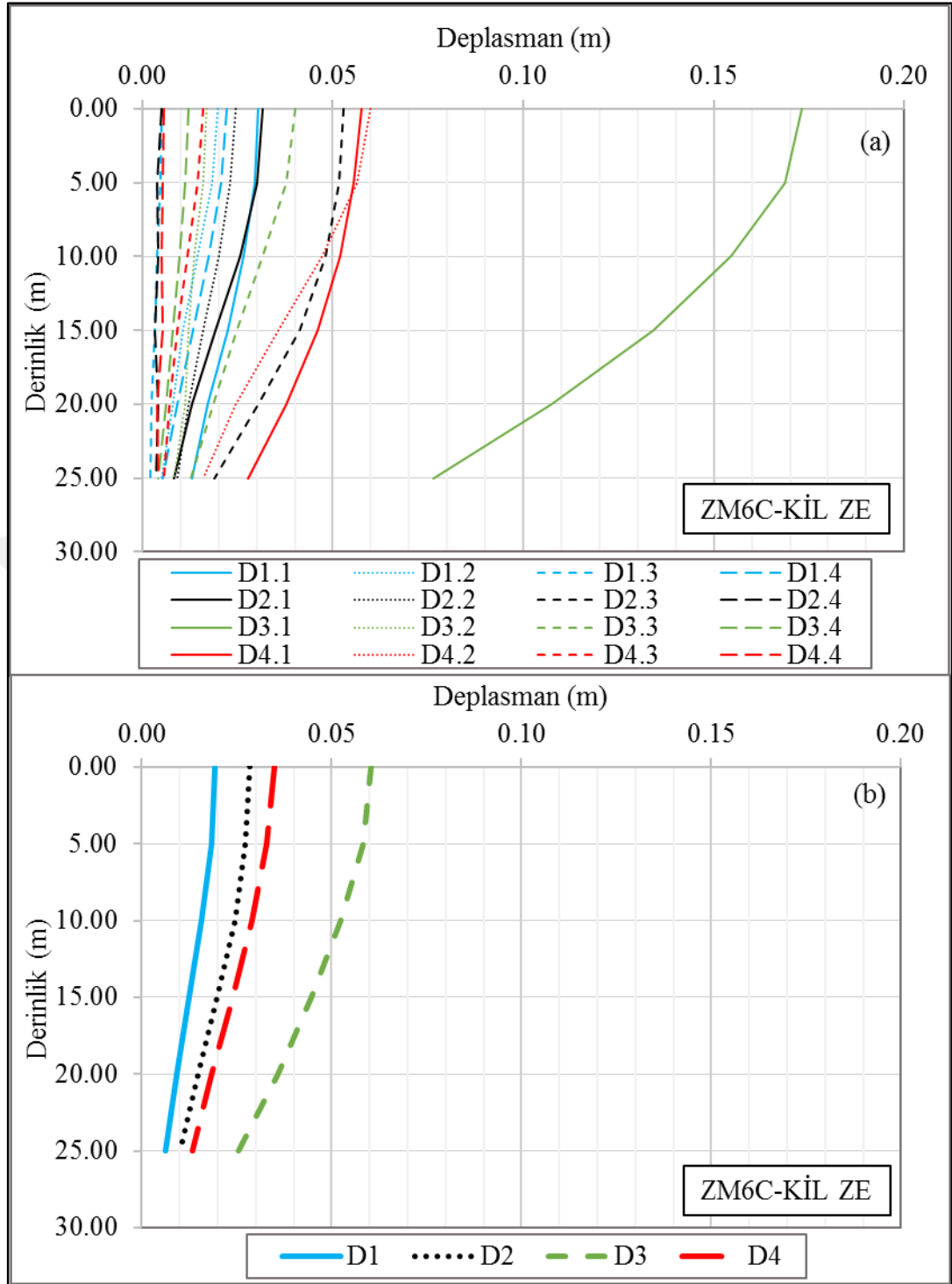
Şekil 5.18 : ZM6C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Spektral zemin büyütmesi sonuçları incelendiğinde maksimum spektral zemin büyütmesi değerlerinin 2.7 ile 4.1 arasında değiştiği görülmektedir. Bu büyütme değerleri 0.7 s ile 1.1 s periyotları arasında hesaplanmıştır. Spektral zemin büyütme değerleri PGA değerlerine göre gruplandırılan depremlere göre ortalama olarak D1, D2, D3 ve D4

grupları için sırasıyla 3.2, 3.3, 3.0 ve 3.1 olarak hesaplanmıştır ve bu büyütmelemlerin tümünün periyodu 0.9 s'dir. Buna göre spektral zemin büyütmesi değerlerinde depremlere ait PGA değerlerinin fazla etkisi yoktur. Ayrıca yüzeydeki spektral ivmelerin yüksek periyot değerlerinde oluştuğu göz önüne alındığında spektral zemin büyütmesi değerlerinin de daha yüksek periyot aralıklarında elde edilmiş olması beklenen bir sonuç olmuştur. Spektral büyütme değerleri yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum zemin modellerine ait sonuçlar ile karşılaştırıldığında kil zeminlerde spektral büyütmelemlerin daha yüksek olduğu fakat bu büyütmelemlerin daha düşük periyot aralıklarında gerçekleştiği söylenebilir.

Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kil zeminler ile oluşturulan ZM6C modeli ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda elde edilen ve 5.19'da gösterilen deplasman-derinlik grafiği incelendiğinde yüzeyde oluşan deplasmanların kum zeminlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Yüzeydeki maksimum deplasman değeri 17 cm ile Düzce depremi kullanılarak gerçekleştirilen analize aittir. PGA değerlerine göre gruplandırılan depremlere ait ortalama yüzey deplasman değerleri D1, D2, D3 ve D4 grupları için sırasıyla 2 cm, 3 cm, 6 cm ve 4 cm olarak bulunmuştur. Düzce depremine ait sonuç gözardı edildiğinde PGA değeri arttıkça yüzeyde oluşacak deplasmanın artacağı yorumu yapılabilir. Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kil zeminler ile oluşturulan diğer modeller ZM6A, ZM6B, ZM6D için yüzeyde oluşan deplasman değerleri deprem grupları için ortalama olarak incelendiğinde ZM6C değeri ile büyük farklılık bulunmamaktadır. 30 m kalınlığındaki zemin tabakası altına geçiş tabakaları yerleştirilerek oluşturulan bu modellerde 0.3 g PGA değerine sahip depremlerde ZM6A, ZM6B ve ZM6D için yüzeydeki ortalama deplasman değerleri sırasıyla 5.5 cm, 5.8 cm ve 6.9 cm olarak bulunmuştur. Bu değerler incelendiğinde anakaya derinliği arttıkça yüzeyde oluşacak deplasmanın artacağı yorumu yapılabilir.

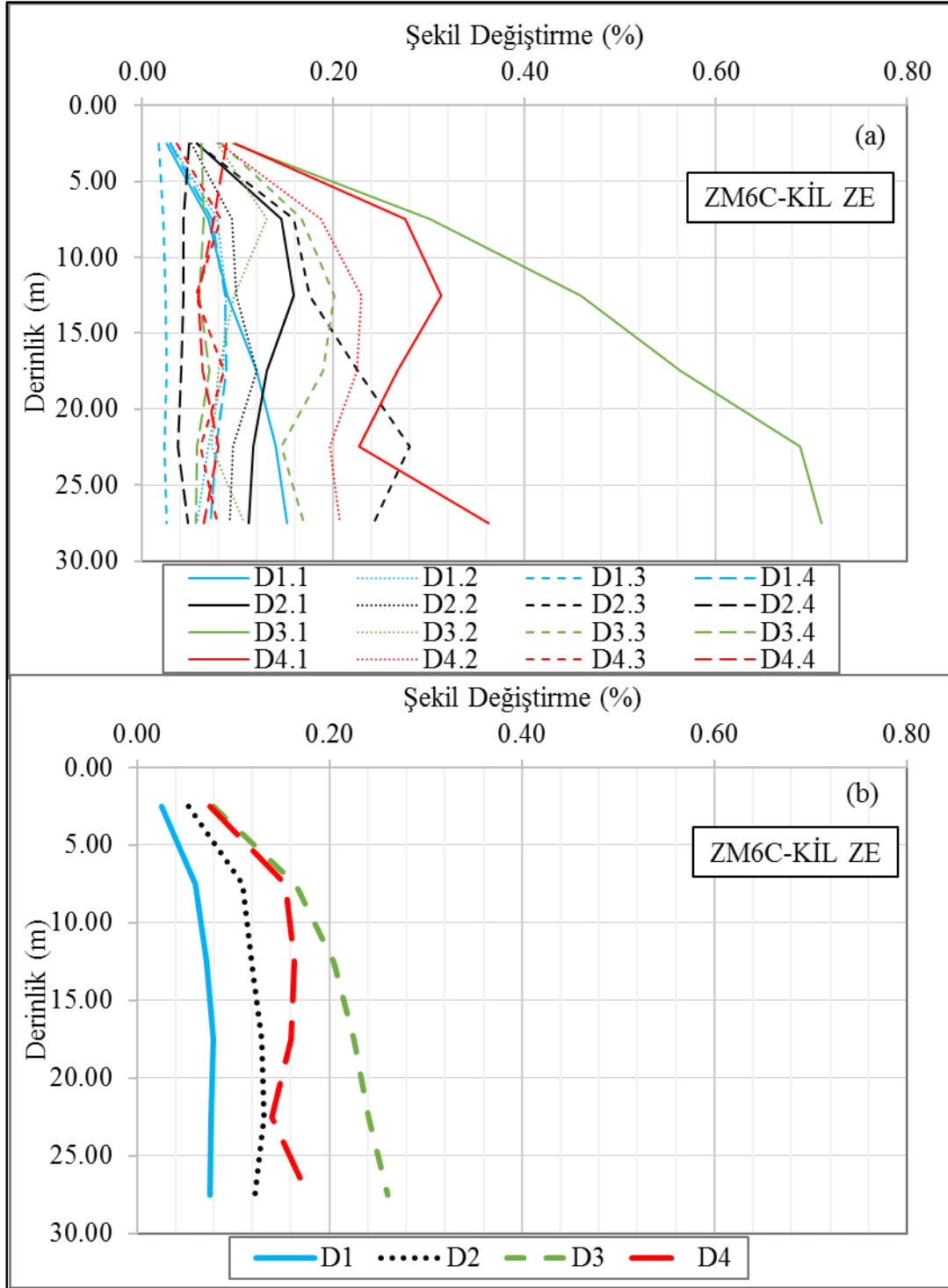
Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kil zemin ile oluşturulan modellerden anakaya derinliğinin 40 m olduğu ZM6C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda zemin tabakalarında meydana gelen şekil değiştirmeler Şekil 5.20'de gösterildiği üzere derinlik arttıkça artmaktadır. Üst 30 m ile diğer zemin tabakaları ve anakaya arasındaki empedans oranının en yüksek olduğu ZE yerel zemin sınıfına sahip modellerin tümünde ZM6C modelinde görülen şekil değiştirme-derinlik ilişkisi bulunmaktadır.



Şekil 5.19 : ZM6C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama

ZM6C modeli ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda maksimum şekil değiştirme değerleri PGA değeri 0.1 g olan Chichi, Coyote, Nahanni, Northridge 2 ivme kayıtları için sırasıyla %0.15, %0.09, %0.02 ve %0.08; 0.2 g PGA değerine sahip Imperial Valley, Kocaeli, Loma Prieta, Whittier Narrows ivme kayıtları için sırasıyla %0.16, %0.12, %0.28 ve %0.05, PGA değeri 0.3 g olan Düzce,

Northridge, Parkfield, San Fernando ivme kayıtları için sırasıyla %0.70, %0.12, %0.20 ve %0.07, 0.4 g PGA değerine sahip San Fernando, Loma Prieta-2, Mammothlake, Manjil ve Tottori ivme kayıtları için %0.36, %0.23, %0.09 ve %0.09 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.20 : ZM6C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Depremlerin PGA değerine göre gruplandırıldığı ortalama sonuçlar Düzce depremine ait sonuç gözardı edilerek incelendiğinde ZE yerel zemin sınıfına sahip kil zeminler için deprem kaydının maksimum ivme değeri arttıkça maksimum şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum zemin modellerine ait sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.

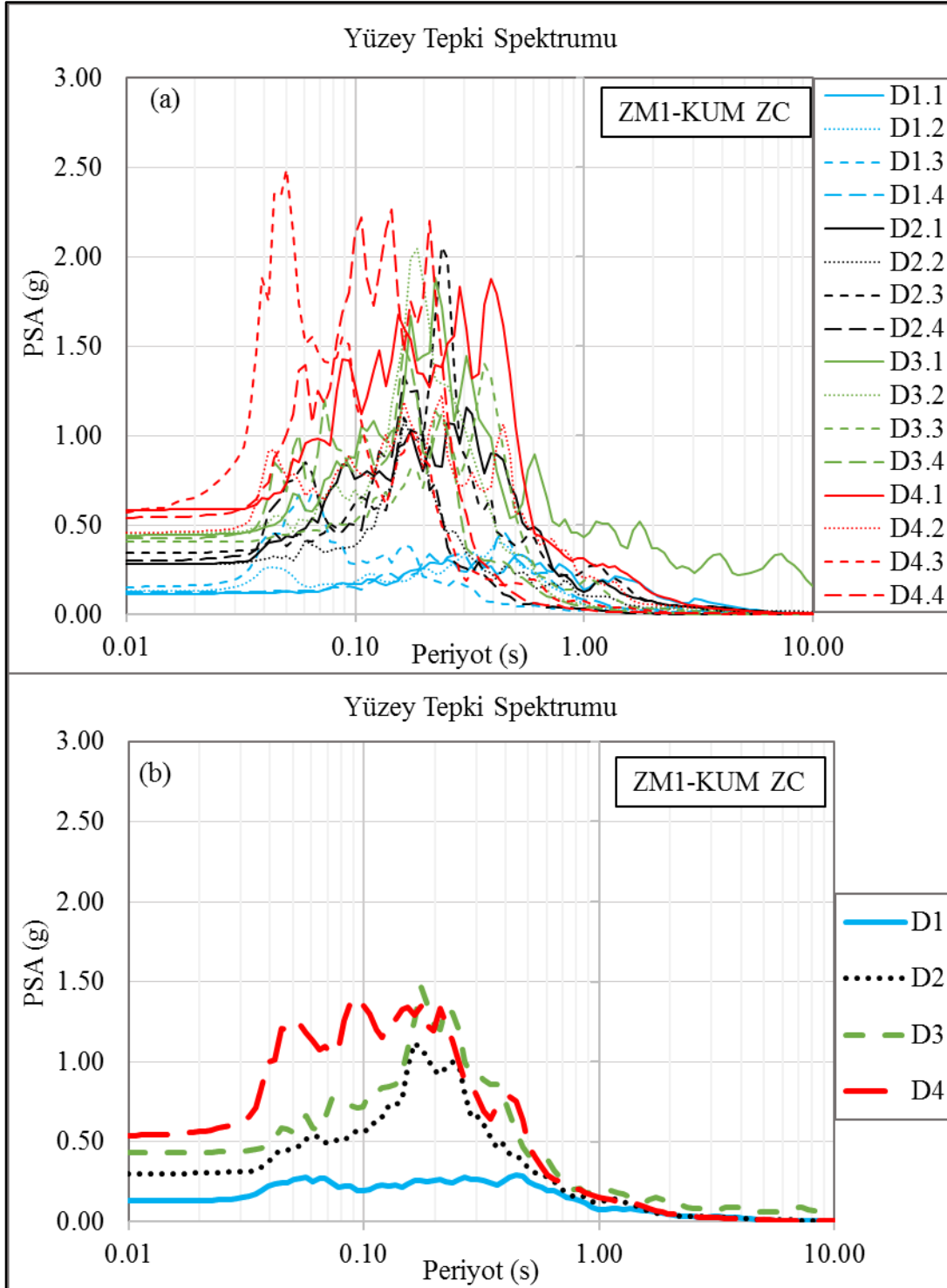
Yerel zemin sınıfı ZB olan 2 adet zemin modeli oluşturulmuştur. ZM7 ve ZM8 modelleri arasındaki temel fark anakayaya ait kayma dalgası hızının ZM7’de 1000 m/s, ZM8’de 1500 m/s olmasıdır. Bu iki model kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizler sonucunda ZM7 modeli için daha yüksek deplasman değerleri elde edilirken maksimum spektral zemin büyütmesi değerleri ZM8 modeli için elde edilmiştir. Bu iki model için de yapılan analizler sonucunda elde edilen tüm değerler diğer zemin modellerinden daha düşük bulunmuştur. ZM2A, ZM2C, ZM2D, ZM3A, ZM3B, ZM3C, ZM4, ZM5A, ZM5B, ZM5C, ZM5D, ZM6A, ZM6B, ZM6D, ZM7 ve ZM8 modelleri kullanılarak gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizlere ait sonuçlar EK C’de sunulmuştur.

5.2 Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

Doğrusal olmayan analizler zaman tanım alanında gerçekleştirilmektedir. Doğrusal olmayan analizlerde zemin tabakaları için birim hacim ağırlık, kayma dalgası hızı sönüm oranı ve kayma modülü gibi zemin parametreleri kullanılmaktadır. Kayma modülü ve sönüm oranı parametreleri azalım eğrileri ile tanımlanmaktadır. Ayrıca doğrusal olmayan dinamik zemin parametreleri hiperbolik modellerle tanımlanmaktadır ve zemin tabakalarının tekrarlı yüklemeye maruz kalması sağlanmaktadır. Bu nedenle kayma modülü ve sönüm oranı azalım eğrileri referans birim şekil değiştirmeye uygun hale getirilerek kullanılmaktadır. Analizin tekrarlı gerçekleştirilmesi birim şekil değiştirmenin kademeli olarak artırılması ile olmaktadır.

20 zemin modeli ve 16 deprem ivme kaydı kullanılarak gerçekleştirilen bir boyutlu doğrusal olmayan analizlere ait sonuçlar bu aşamada sunulacaktır. Eşdeğer doğrusal yerel saha davranışı analizi çoğu durumda makul sonuçlar verebilmektedir fakat TBDY’de de belirtildiği üzere deformasyon seviyesinin yüksek olduğu durumlarda (>%1) doğrusal olmayan analiz yapılması önerilmektedir.

Yerel zemin sınıfı ZC olan kum zeminler ile oluşturulan ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda yüzeyde elde edilen spektral ivmeler Şekil 5.21’de gösterildiği gibidir.

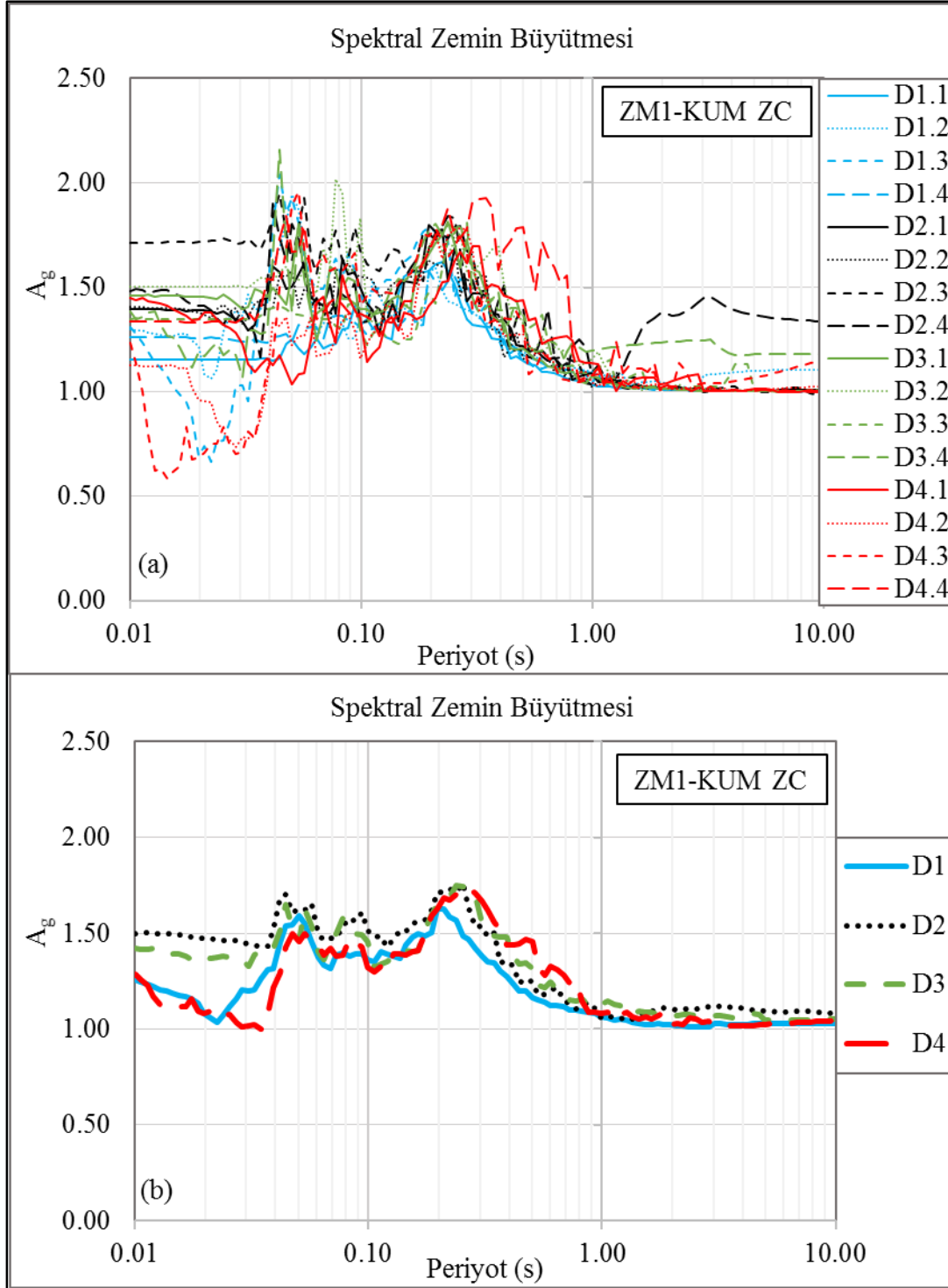


Şekil 5.21 : ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA’ya göre ortalama.

Maksimum spektral ivme değeri Manjil deprem kaydı ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda 2.5 g olarak hesaplanmıştır. Analizler sonucunda yüzey tepki spektrumlarındaki maksimum spektral ivmelerin periyotları PGA değeri 0.1 g olan Chichi, Coyote, Nahanni, Northridge-2 ivme kayıtları için sırasıyla 0.5 s, 0.4 s, 0.07 s ve 0.4 s; 0.2 g PGA değerine sahip Imperial Valley, Kocaeli, Loma Prieta, Whittier Narrows ivme kayıtları için sırasıyla 0.3 s, 0.2 s, 0.2 s ve 0.2 s; PGA değeri 0.3 g olan Düzce, Northridge, Parkfield, San Fernando ivme kayıtları için sırasıyla 0.2 s, 0.2 s, 0.4 s ve 0.2 s; 0.4 g PGA değerine sahip San Fernando, Loma Prieta-2, Mammothlake, Manjil ve Tottori ivme kayıtları için sırasıyla 0.4 s, 0.2 s, 0.05 s, 0.2 s olarak bulunmuştur. Bu değerler hem depremlere ait periyot değerleri ile hem de eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile uyumaktadır. ZC yerel zemin sınıfına sahip kum zeminlerde yüzeyde spektral ivme artarken deprem ivme kayıtlarının frekans içeriği değişmemektedir. Ayrıca PGA değerlerine göre gruplandırılan depremlere ait ortalama maksimum spektral ivmelere ait periyotlar eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarında da olduğu gibi D1, D2, D3 ve D4 deprem grupları için sırasıyla 0.4 s, 0.2 s, 0.2 s ve 0.2 s olarak elde edilmiştir.

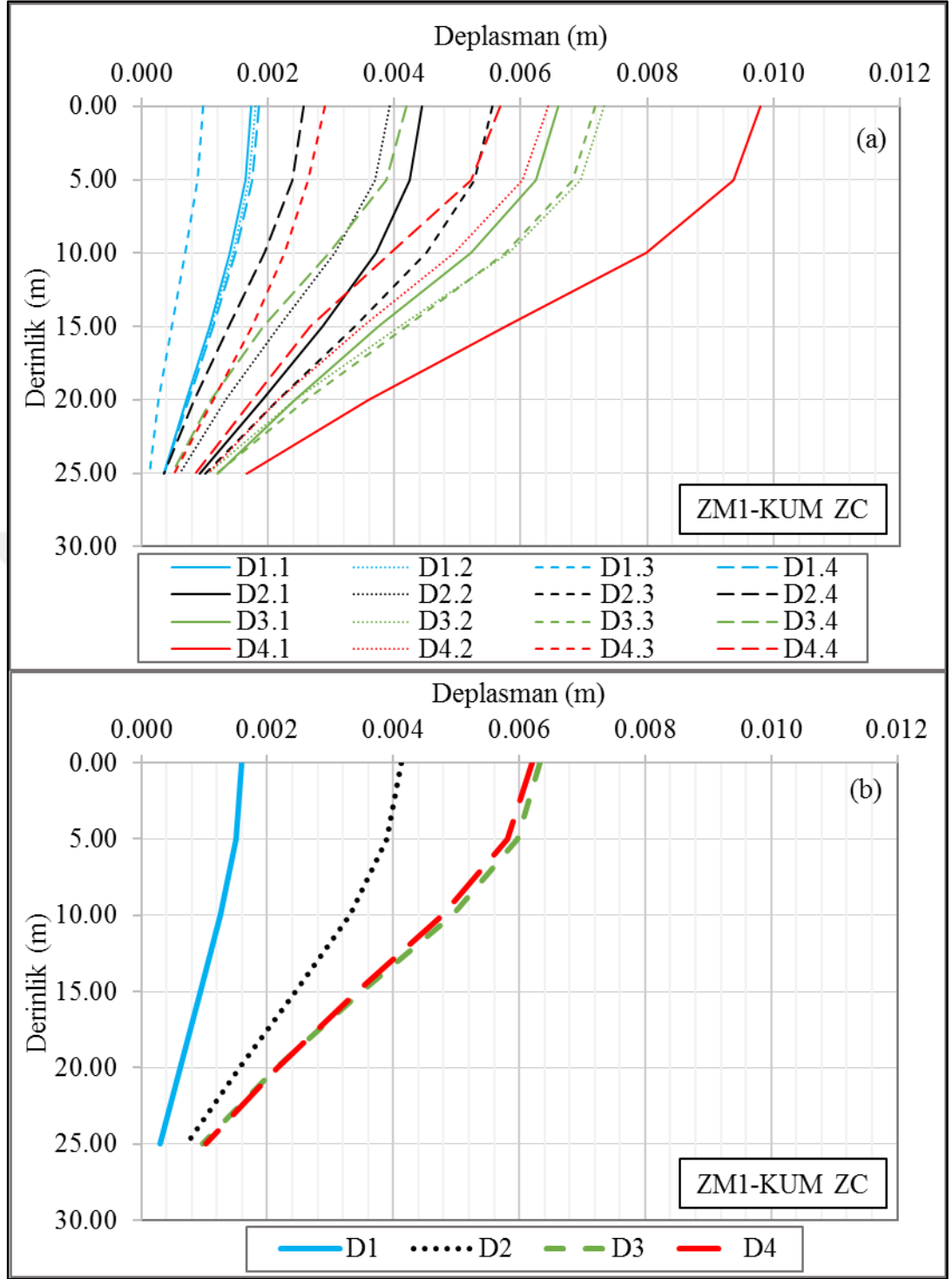
ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen maksimum spektral zemin büyütmesi değeri Şekil 5.22’de gösterildiği gibi 2.2 olarak 0.3 g PGA değerine sahip San Fernando deprem kaydı ile gerçekleştirilen analize aittir. Diğer deprem ivme kayıtlarına göre gerçekleştirilen analizler sonucunda spektral zemin büyütmesi değerleri 1.6 ve 2.2 arasındadır. Bu değerler genel olarak eşdeğer doğrusal analizlerde de olduğu gibi 0.2 s ile 0.3 s periyotları arasında elde edilmiştir. Fakat deprem gruplarına göre spektral zemin büyütmesi ve periyotları incelendiğinde zeminlerin 0.04 s ve 0.06 s arasında da spektral büyütme yapıldığı görülmektedir.

Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre doğrusal olmayan analizler ile ZM1 modeli kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde genel olarak daha yüksek spektral zemin büyütmesi değerleri bulunmuştur. Yine deprem grupları için ortalama maksimum spektral zemin büyütmesi değerleri hesaplandığında D1, D2, D3 ve D4 grupları için sırasıyla 1.6, 1.8, 1.7 ve 1.7 şeklinde eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarıyla örtüşen değerler elde edilmektedir. Sıkı kum zeminlerde spektral ivmeler deprem hakim periyotlarına yakın değerlerde en yüksek değerine ulaşırken spektral zemin büyütme değerleri zeminlerin hakim periyoduna yakın değerlerde hesaplanmıştır.



Şekil 5.22 : ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

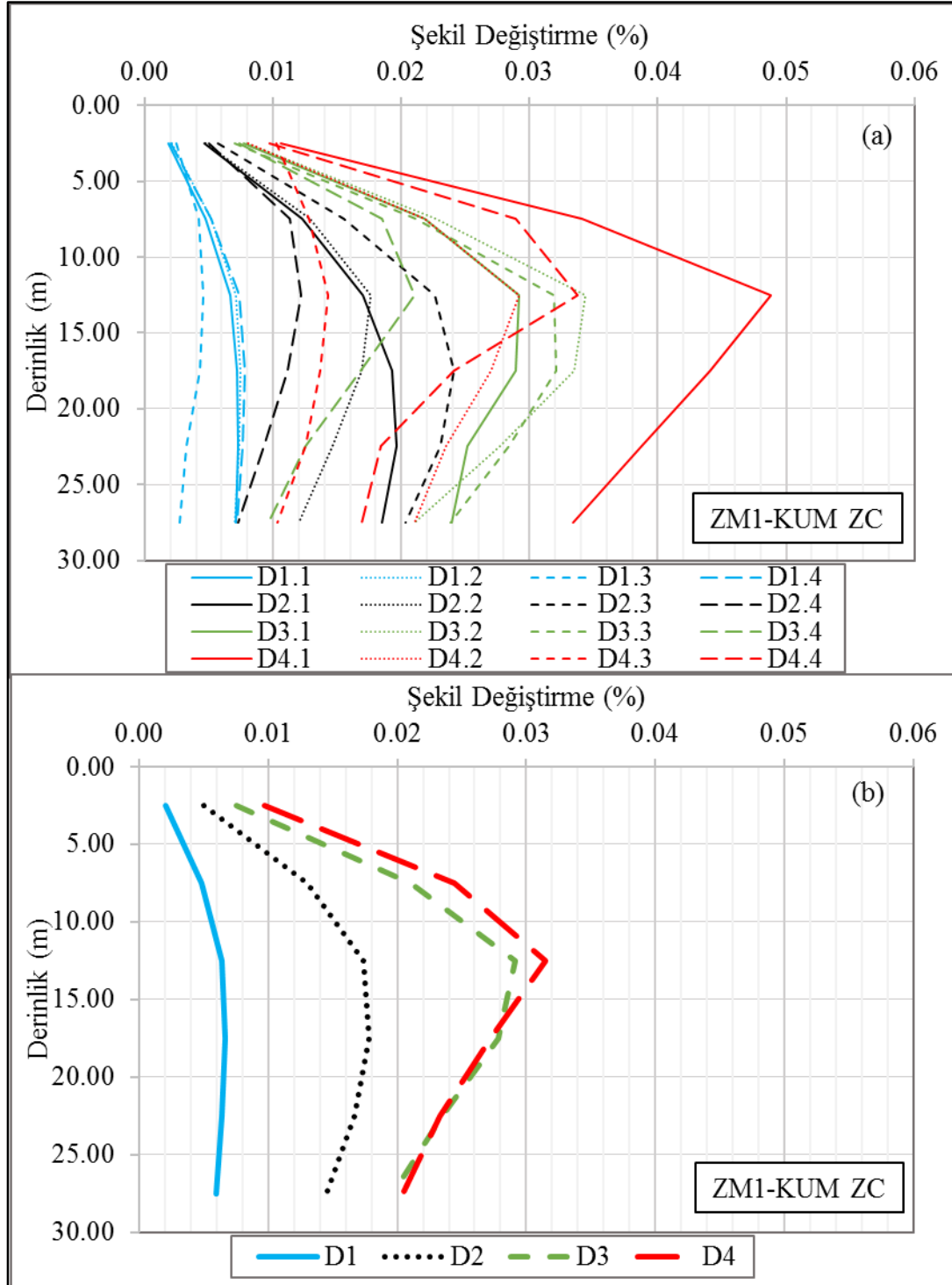
ZM1 modeli ve 16 deprem ivme kaydı kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen deplasman değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 5.23'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5.23 : ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama

Depremler sonucunda yüzeyde oluşan deplasmanlar incelendiğinde doğrusal olmayan analizler ile elde edilen sonuçlar eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Düzce depremi ile elde edilen yüzey deplasman değeri eşdeğer doğrusal analizler sonucunda 4.1 cm iken doğrusal olmayan analizler sonucunda 0.6

cm bulunmuştur. Bunun dışında kalan depremler ve deprem gruplarına ait ortalama yüzey deplasman değerleri her iki analiz çeşidinde de mm seviyesinde farklılık göstermektedir.



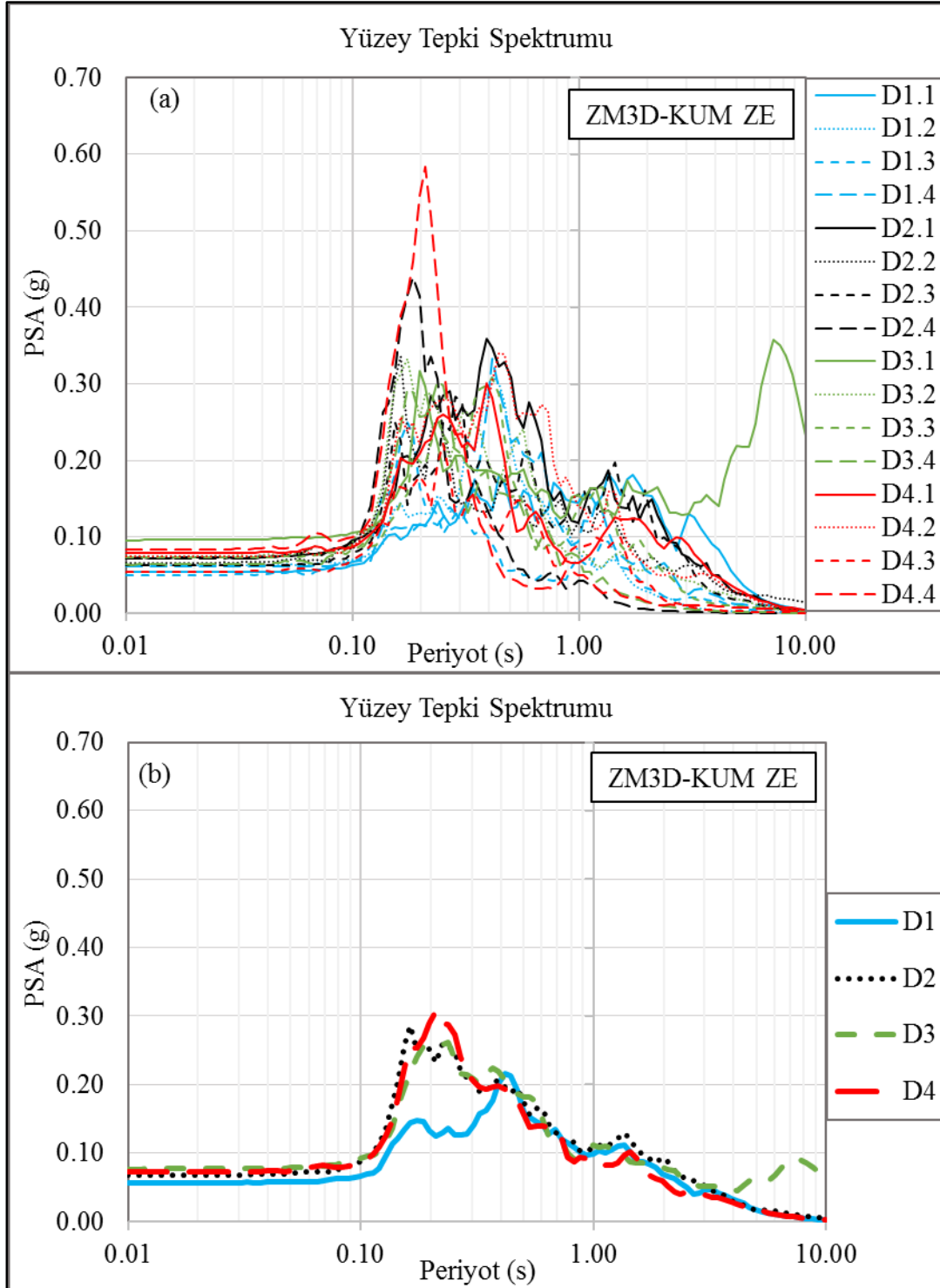
Şekil 5.24 : ZM1 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Benzer şekilde doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen şekil değiştirmeler Şekil 5.24 üzerinden incelendiğinde tüm şekil değıştme değerlerinin çok yakın olduğu görölmektedir. Eşdeğer doğrusal analizlerde olduğu gibi doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre de depremlere ait PGA değeri arttıkça yerel zemin sınıfının ZC olduğu kum zeminlerde şekil değıştirmeler artış göstermektedir.

Yerel zemin sınıfı ZD olan kum zeminler ile oluşturulan ZM2A, ZM2B, ZM2C ve ZM2D zemin modelleri ile yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre maksimum spektral zemin büyütmesi değeri 1.9 ile 2.8 arasında değışmektedir. Bu büyütme değeri göröldüğü periyot aralıkları 0.6 s ve 0.9 s'dir. Bu değeri ile eşdeğer doğrusal analiz sonuçları uyusmaktadır. Eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile uyusmayan tek sonuç Loma Prieta-2 ivme kaydına aittir. 0.4 g PGA değeri sahip olan bu kayıt ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda maksimum spektral zemin büyütmesi değeri 2.3 olarak 1.1 s periyodunda bulunmuştur. Bu periyot değeri 0.4 g değeri sahip depremler için spektral zemin büyütme değeri ortalaması alınırken 2 noktada pik olmasına sebep olmaktadır ve bu nedenle ZM2B, ZM2C, ZM2D modellerinde maksimum spektral zemin büyütme değeri 1.2 s periyodunda hesaplanmıştır. Yeryüzünde meydana gelen en büyük deplasman değeri 5.4 cm olarak anakaya derinliğinin 50 m, geçiş tabakası kalınlığının 20 m olduğu ZM2D zemin modeli ve PGA değeri 0.3 g olan depremler kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilmiştir. Deplasman değeri eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarında da olduğu gibi Düzce depremine ait sonuçlar gözardı edildiğinde şekil değıştirme değeri deprem kayıtlarına ait maksimum yer ivmesi arttıkça artmaktadır. Yerel zemin sınıfının ZD olduğu kum zeminlerde geçiş tabakası kalınlığının şekil değıştirme değeri üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır.

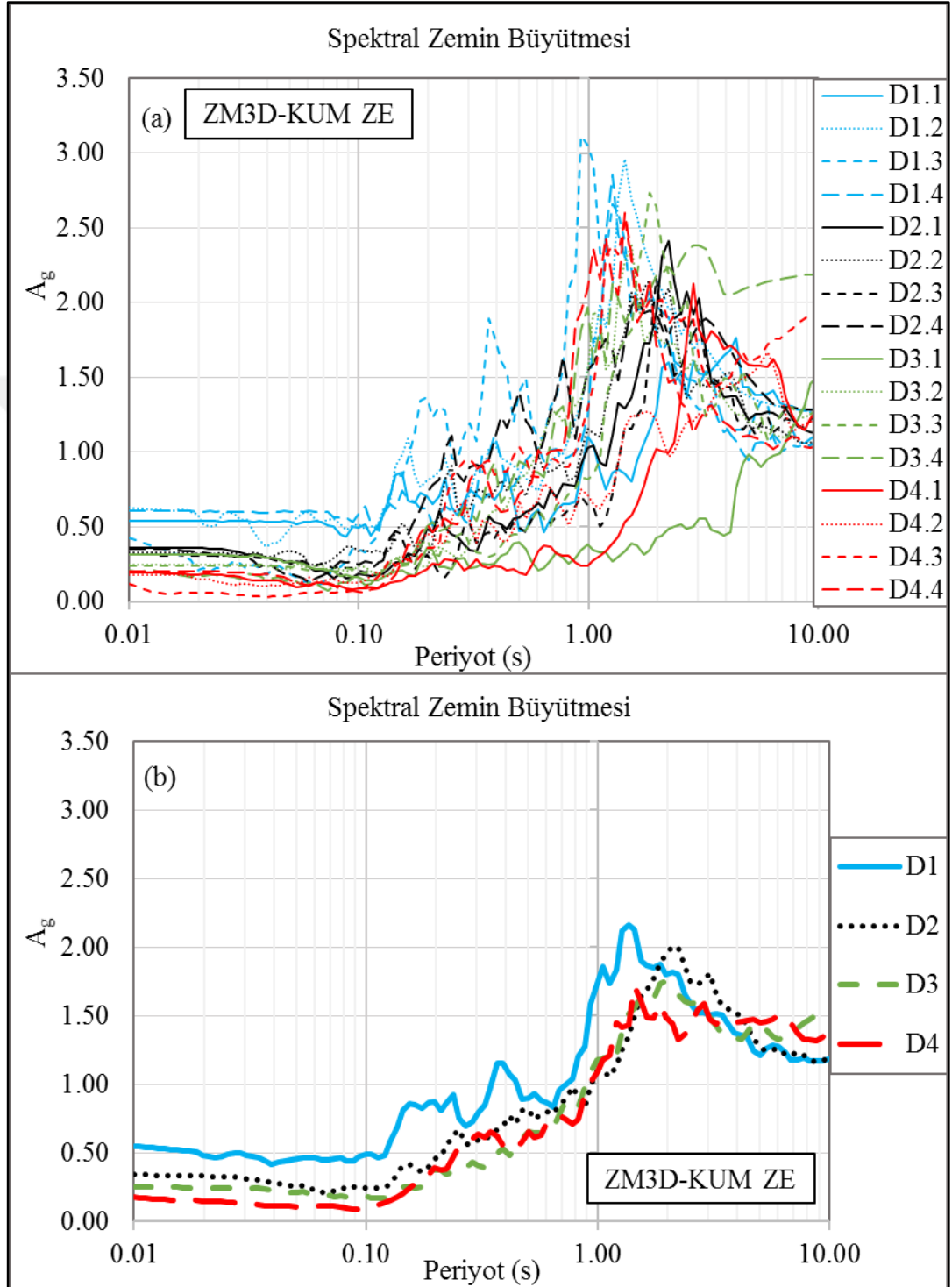
ZM3A, ZM3B, ZM3C ve ZM3D kullanılarak yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçları incelendiğinde ZM3A modeli ile yüzeyde elde edilen spektral ivme değeri diğer 3 modelden farklılık göstermektedir. ZM3A modeli ile doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen spektral ivmeler 0.5 g ile 2.0 g arasında değışmektedir. Diğer 3 modelde ise bu değeri 0.2 g ile 0.6 g arasında değışmektedir. 3 model için sonuçların benzerlik gösterdiği ZE yerel zemin sınıfına sahip kum zeminler için Şekil 5.25'te gösterilen ZM3D modeline ait yüzey tepki spektrumları incelendiğinde PGA değeri göre oluşturulan deprem grupları D1, D2, D3 ve D4 için maksimum spektral

ivmeler sırasıyla 0.20 g, 0.30 g, 0.25 g ve 0.20 g olarak; bu ivmelerin periyotları ise 0.50 s, 0.15 s, 0.20 s ve 0.20 s şeklinde hesaplanmıştır. Bu değerler ile eşdeğer doğrusal analiz sonuçları arasında benzerlik bulunmaktadır.



Şekil 5.25 : ZM3D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum zemin modelleri ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda spektral zemin büyütmesi değerleri 4 zemin modeli için çok farklılık göstermemektedir.



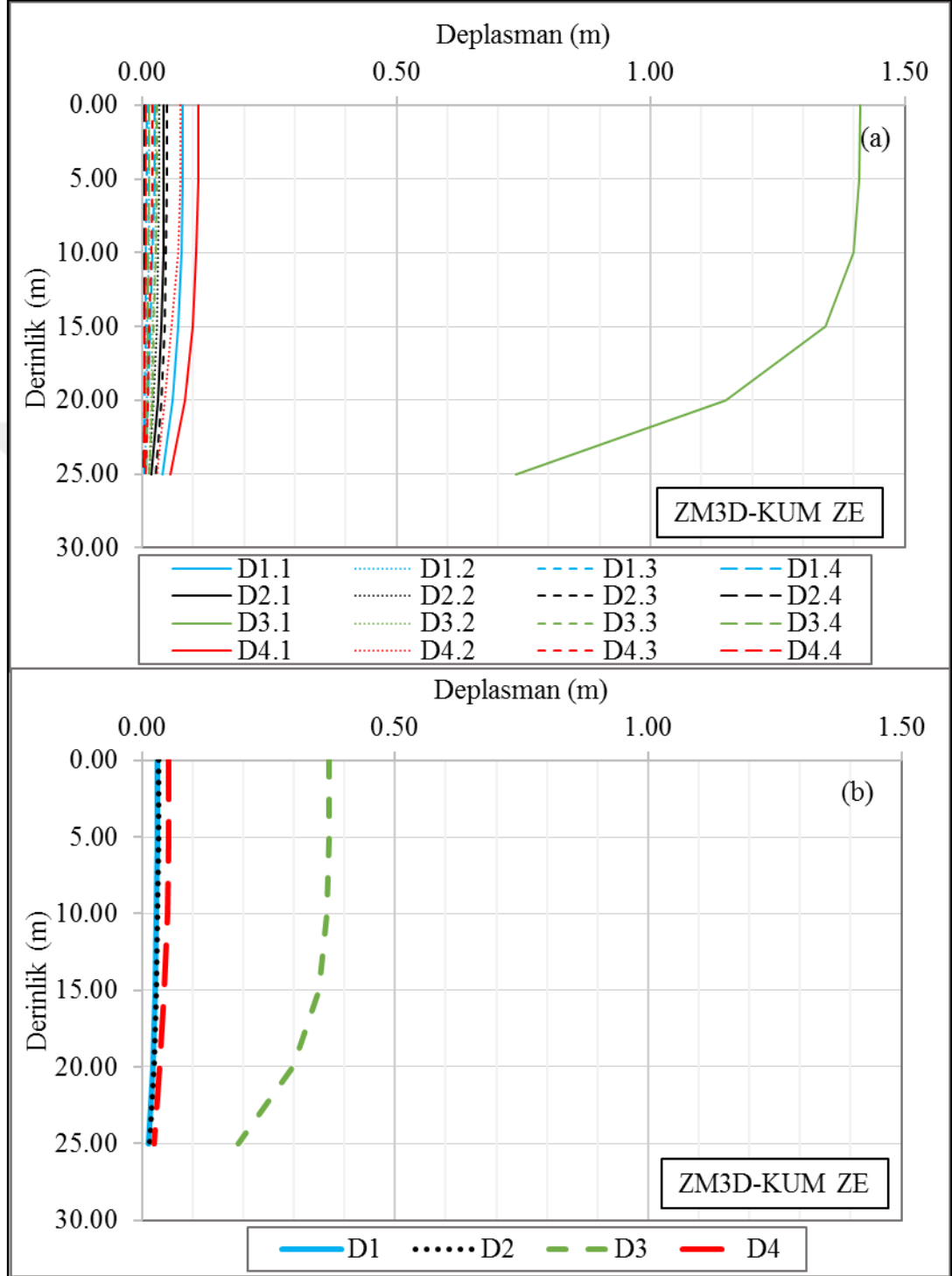
Şekil 5.26 : ZM3D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Şekil 5.26’da anakaya derinliğinin 50 m olduğu ZM3D modeliyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarında elde edilen spektral zemin büyütmesi değerleri her deprem kaydı için ayrı ayrı ve PGA değerlerine göre ortalama olarak gösterilmiştir. Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum modellerde spektral zemin büyütmesi değerleri 1.7 ile 3.1 arasında değişiklik gösterirken geçiş tabakası uygulamasının yapılmadığı ZM3A modeline ait sonuçlarda büyütmelerin meydana geldiği periyotlar 0.5 s ile 1.0 s arasında değişmektedir. Diğer 3 model için ise bu değerler 0.9 s ile 3.0 s arasındadır. Deprem gruplarına göre ortalama maksimum spektral büyütme alındığında bu 3 zemin modeli için spektral büyütme ve periyot değerleri D1 için 2.1 ve 1.4 s, D2 için 1.9 ve 2.1 s, D3 için 1.6 ve 2.0 s, D4 için 1.6 ve 1.4 s olarak bulunmuştur. Bu değerler ZM3A modeli ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda D1 için 2.5 ve 0.6 s, D2 için 2.5 ve 0.6 s, D3 için 2.3 ve 0.7 s, D4 için 2.3 ve 0.6 s olarak hesaplanmıştır.

Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum zeminler ile oluşturulan modeller ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda ZM3A ile diğer modeller arasındaki farklar deplasman değerlerinde de elde edilmiştir. Özellikle Düzce depremine ait sonuçların çok yüksek olduğu 3 zemin modeli için deplasman derinlik değişimlerinde büyük farklılık görülmemektedir. Şekil 5.27’de ZM3D için gösterilen deplasman-derinlik değişimi incelendiğinde deprem grupları için yüzeyde oluşan deplasmanlar D1, D2, D3, D4 için sırasıyla 3.1 cm, 3.2 cm, 36.2 cm ve 5.2 cm’dir. Düzce depremine ait sonuç gözardı edilirse D3 grubu için yüzeydeki deplasman ortalama 1.7 cm olmaktadır. Yüzeyde elde edilen deplasman değerleri eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında doğrusal olmayan analizlerde daha yüksek deplasmanlar elde edildiği görülmektedir. Diğer modellerden farklı sonuçlar veren ZM3A modelinde ise yüzeydeki deplasmanların deprem grupları için ortalama değerleri sırasıyla 1.2 cm, 1.8 cm, 2.8 cm, 2.3 cm olarak bulunmuştur.

ZM3D modeli ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen şekil değiştirme değerleri Şekil 5.28’de gösterildiği üzere derinlik ile artış göstermektedir. Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarında ve deplasman değişimlerinde olduğu gibi Düzce depremine ait şekil değiştirme, deprem gruplarına göre ortalama şekil değiştirmeleri büyük oranda etkilemektedir. Deprem gruplarına göre maksimum şekil değiştirme değerleri D1, D2, D3 ve D4 için sırasıyla %0.25, %0.29, %3.79 ve %0.44’tür. Bu sonuçlar incelendiğinde ZE yerel zemin sınıfına sahip kum zeminler

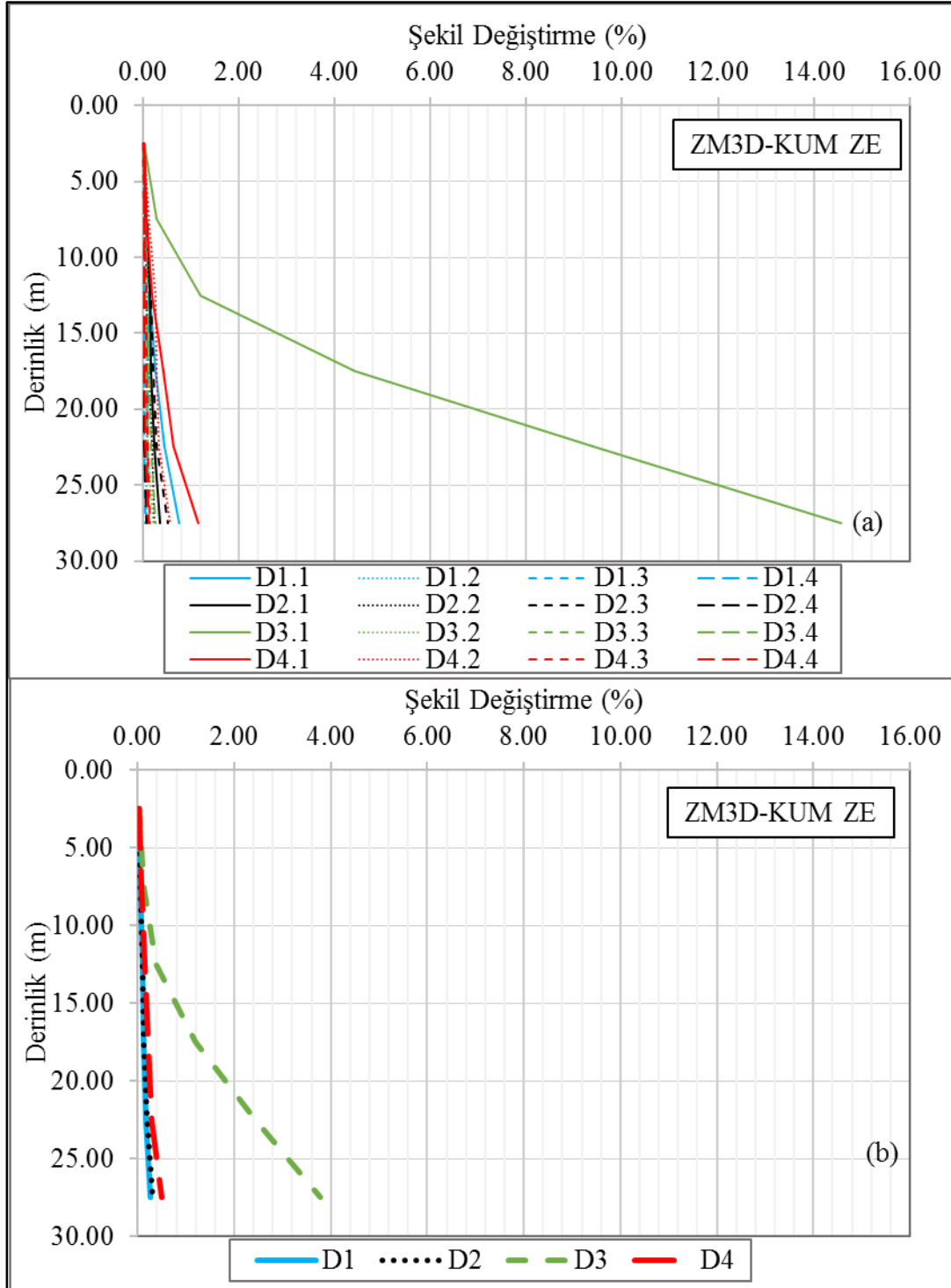
için deprem kaydının PGA değeri arttıkça maksimum şekil değıştirme değerlerinin arttığını söylenebilir.



Şekil 5.27 : ZM3D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değışimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile doğrusal olmayan analizlere ait sonuçlar deplasman ve şekil değıştirme açısından kıyaslandığında yerel zemin sınıfının ZC ve

ZD olduğu durumlarda büyük farklılık gözlenmezken zemin rijitliğinin iyice düştüğü ZE yerel zemin sınıfında kum zeminlerde doğrusal olmayan analizler daha yüksek sonuçlar vermektedir.

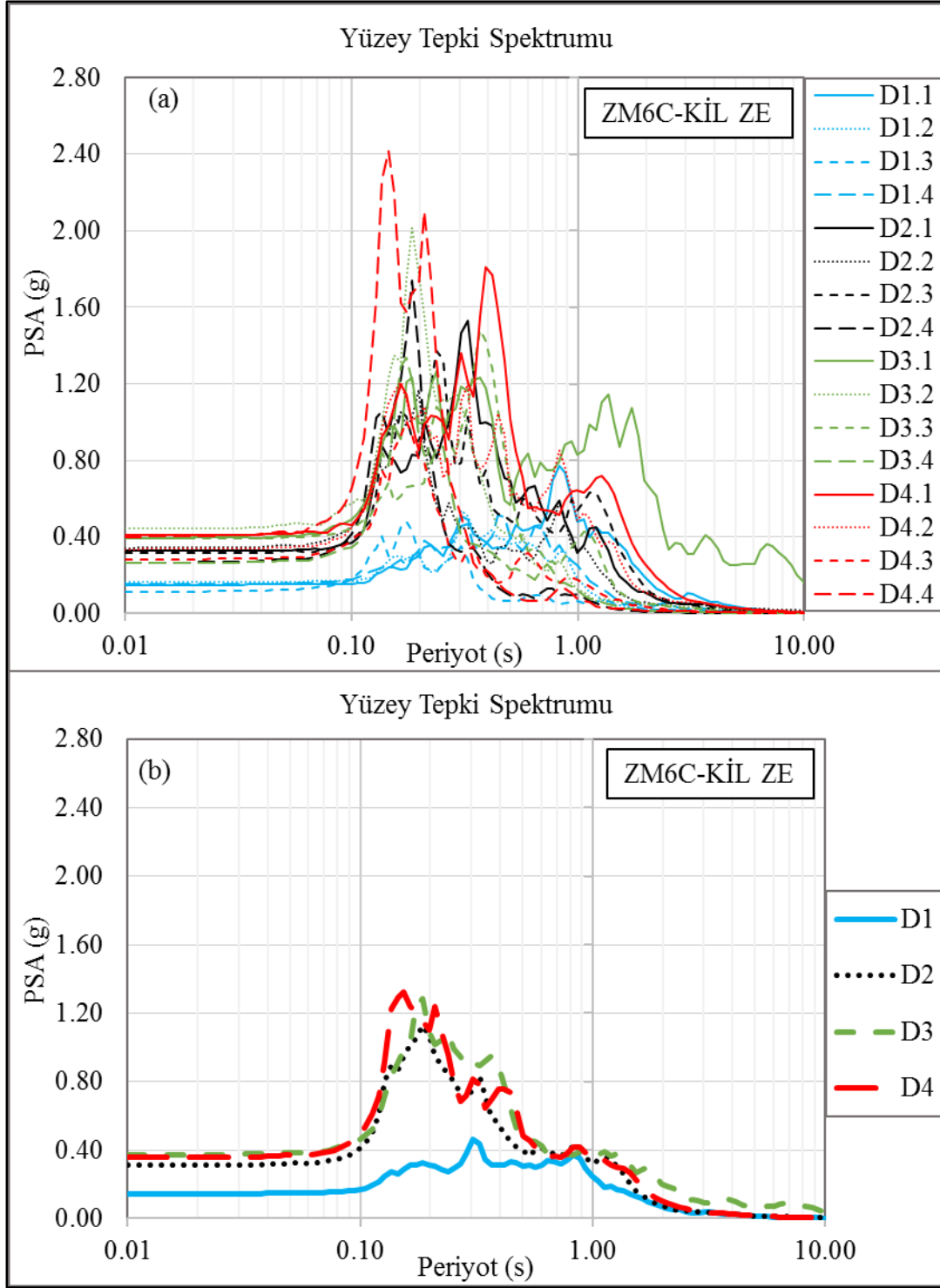


Şekil 5.28 : ZM3D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre şekil değişirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Kil zeminler ile oluşturulan ve yerel zemin sınıfının ZC olduğu zemin modelleri kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları genel olarak kum zeminler ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile örtüşmektedir. Bu modellere ait sonuçlar ile eşdeğer doğrusal analiz sonuçları da benzerlik göstermektedir.

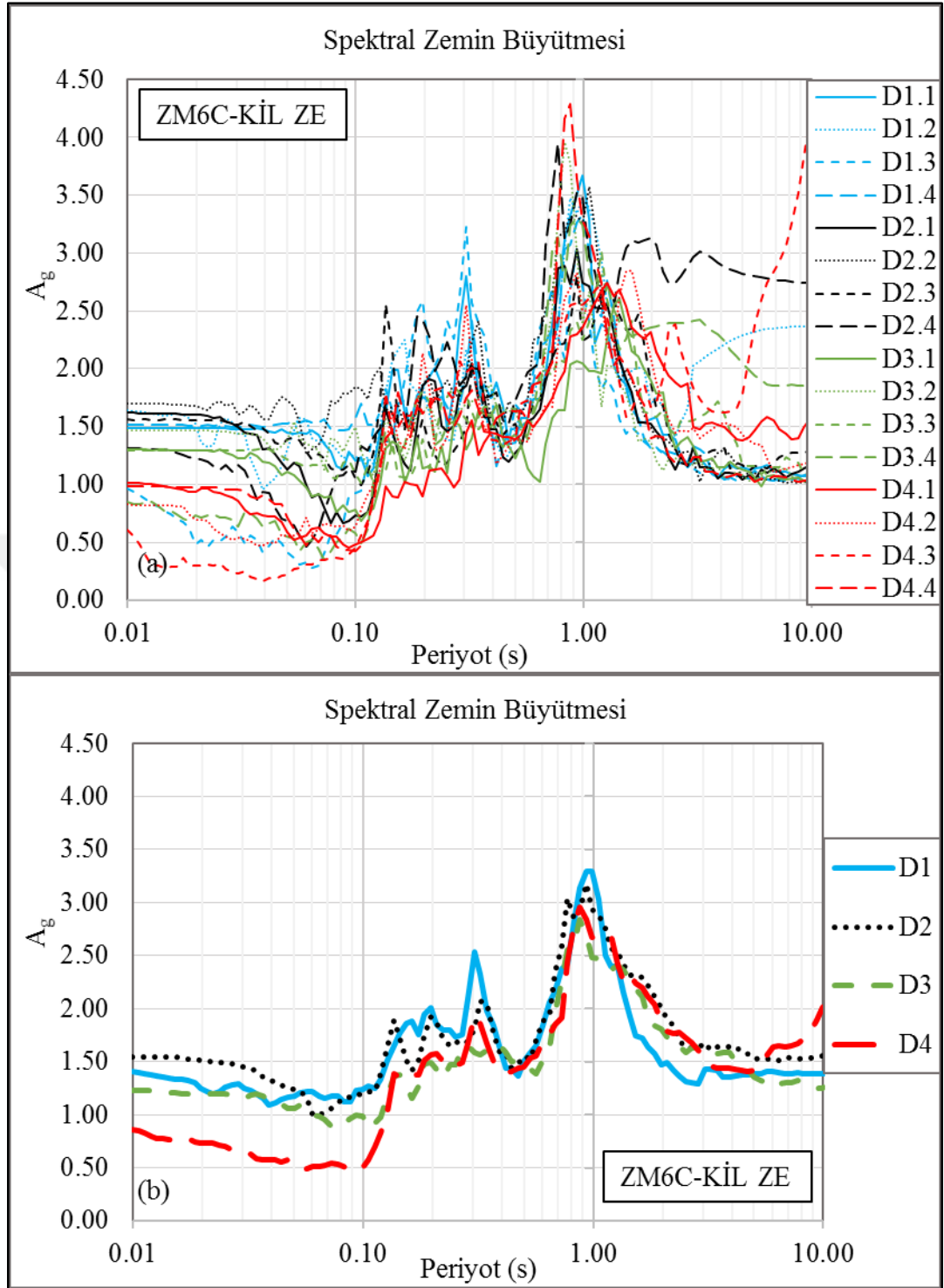
Yerel zemin sınıfı ZD olan kil zeminler ile oluşturulan ZM5A, ZM5B, ZM5C ve ZM5D zemin modelleri kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçlarında maksimum spektral zemin büyütmesi değerlerinin 2.2 ile 3.0 arasında değiştiği görülmektedir. Bu büyütme değerleri genel olarak 0.5 s ve 0.8 s periyot aralıklarında gerçekleşmiştir. Deprem gruplarına göre spektral zemin büyütmesi değerleri D1, D2, D3 ve D4 için sırasıyla 2.6, 2.5, 2.3, 2.2 olarak bulunmuştur. PGA artışı ile spektral zemin büyütmesi arasında ters orantının olduğu ZD yerel zemin sınıfına sahip kil zemin modelleri kum zemin ile oluşturulan modellere göre deprem ivme kayıtlarını daha çok büyütmektedir. Yeryüzünde meydana gelen en büyük ortalama deplasman değeri 4.4 cm ile anakaya derinliğinin 50 m olduğu ZM5D zemin modeli ve PGA değerleri 0.3 g olan depremler kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilmiştir. Bu değer eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile kıyaslandığında analiz türünün ZD yerel zemin sınıfına sahip kil zeminlerde deplasmanları büyük mertebelerde etkilemediği görülmektedir.

Kil zeminler ile oluşturulan ve yerel zemin sınıfı ZE olan ZM6A, ZM6B, ZM6C ve ZM6D modelleri ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarında olduğu gibi kum zemin ile oluşturulan ve yerel zemin sınıfının ZE olduğu modeller ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarından farklıdır. Bu modellere ait sonuçlar kendi içerisinde büyük farklılık göstermezken Şekil 5.29'da gösterilen yüzey tepki spektrumları incelendiğinde ZM6C modeli için doğrusal olmayan analizler sonucunda en büyük spektral ivme 2.4 g ile 0.15 s periyot değerinde Tottori depremi ile yapılan analize aittir. Yüzey tepki spektrumlarına ait değerlerin ortalaması alındığında deprem grupları için en büyük spektral ivmeler ve periyotları D1, D2, D3 ve D4 için sırasıyla 0.4 g ve 0.30 s, 1.1 g ve 0.20 s, 1.3 g ve 0.20 s, 1.3 g ve 0.15 s olarak bulunmuştur. Bu değerler eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile benzerlik gösterirken yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum modeller ile yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında killerin yüzeyde elde edilen maksimum spektral ivmelerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.29 : ZM6C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre yüzey tepki spektrumları: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

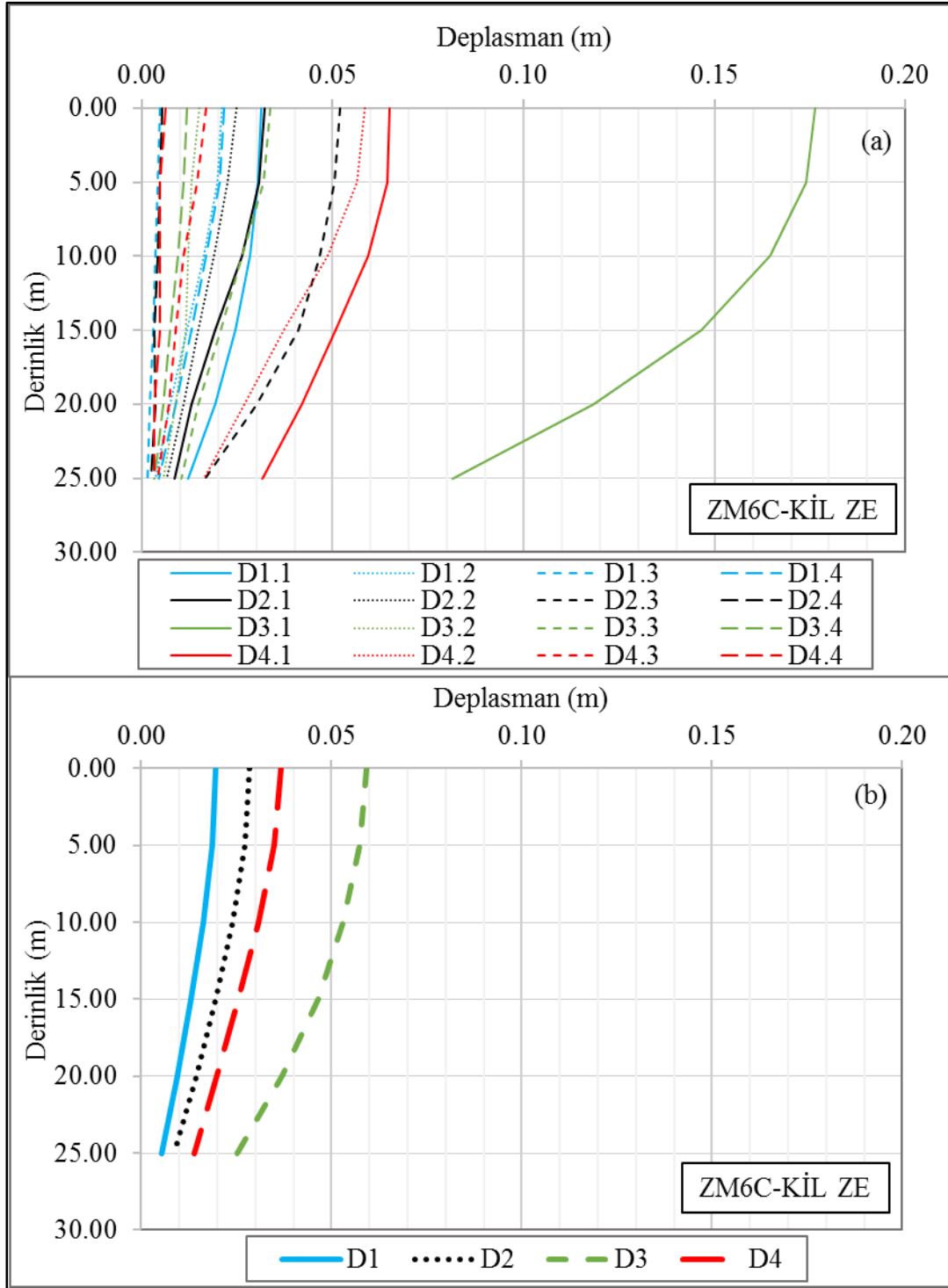
ZM6C modeli kullanılarak yüzeyde elde edilen spektral ivmeler aynı periyot değerindeki deprem spektral ivmelerine bölünerek spektral zemin büyütmesi değerleri bulunmuştur ve bu değerler Şekil 5.30'da gösterilmiştir



Şekil 5.30 : ZM6C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre spektral zemin büyütmesi değerleri: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

Spektral zemin büyütmesi sonuçları incelendiğinde maksimum spektral zemin büyütmesi değerlerinin 2.7 ile 4.3 arasında değiştiği görülmektedir. Bu büyütme değerleri 0.7 s ile 1.1 s periyotları arasında hesaplanmıştır. Spektral zemin büyütme değerleri PGA değerlerine göre gruplandırılan D1, D2, D3 ve D4 deprem grupları için 0.8 s ve 0.9 s

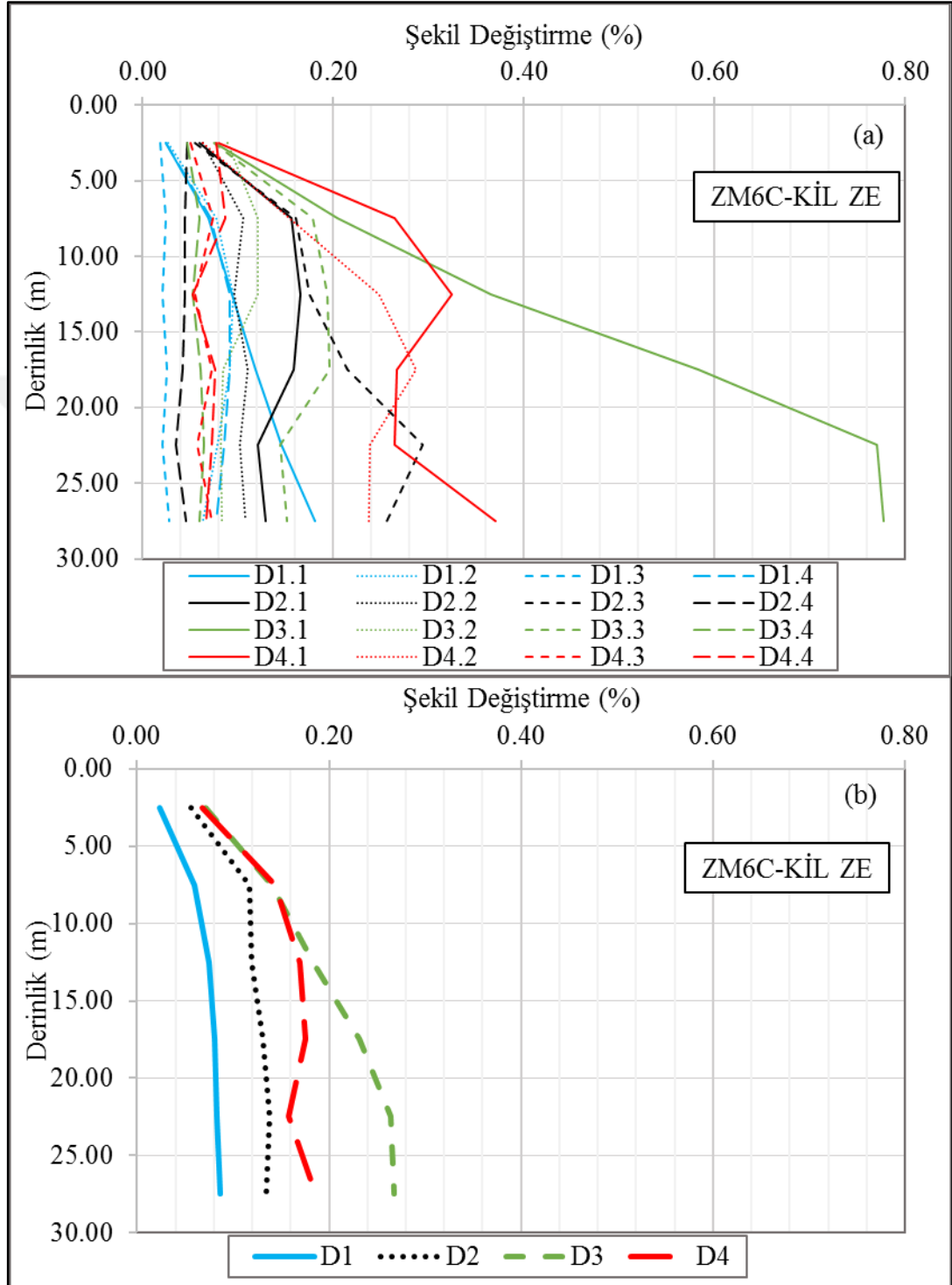
periyotlarında sırasıyla 3.3, 3.2, 2.9 ve 3.0 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile uyuşmaktadır.



Şekil 5.31 : ZM6C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre deplasman değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA'ya göre ortalama.

ZM6C modeli ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen deplasman-derinlik grafiği Şekil 5.31 'de ve şekil değiştirme-derinlik grafiği

Şekil 5.32’de gösterilmiştir. Bu değişimler incelendiğinde eşdeğer doğrusal analiz ile doğrusal olmayan analizler sonucunda yerel zemin sınıfının ZE olduğu kil zeminlerde deplasman ve şekil değiştirme açısından büyük farklılık gözlenmemiştir.



Şekil 5.32 : ZM6C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize göre şekil değiştirme değerlerinin derinlikle değişimi: (a) 16 deprem için (b) PGA’ya göre ortalama.

Yerel zemin sınıfı ZB olan ZM7 ve ZM8 modelleri kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda maksimum spektral zemin büyütmesi değerleri ZM8 modeli için daha yüksek elde edilmiştir. ZM7 ve ZM8 için doğrusal olmayan analiz sonuçları deplasman, şekil değiştirme ve periyot açısından büyük benzerlik göstermektedir. Yerel zemin sınıfının ZB olduğu modellerde eşdeğer doğrusal analizler sonucunda daha yüksek deplasman değerleri elde edilmiştir. ZM1, ZM3D ve ZM6C dışında kalan modeller kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlere ait sonuçlar EK D’de sunulmuştur.

5.3 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında 20 zemin modeli ve 16 deprem ivme kaydı kullanılarak bir boyutlu dinamik eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g’ye ölçeklendirilen deprem ivme kayıtlarına ait sonuçlar her bir ivme grubu için ortalama olarak ele alınmıştır. Analizler sonucunda yüzey tepki spektrumları, spektral zemin büyütmesi değerleri, deplasman-derinlik grafikleri ve şekil değiştirme-derinlik grafikleri sunulmuştur. Bu bölümde her analiz ile elde edilen maksimum değerler dikkate alınarak deprem maksimum ivmesinin, yerel zemin sınıfının, analizin eşdeğer doğrusal veya doğrusal olmayan analiz olarak gerçekleştirilmesinin, zeminin kil veya kum olması ile zayıf zeminlerde 30 m kalınlığındaki tabakalar altındaki geçiş tabakası kalınlığının ve anakaya özelliklerinin zeminin dinamik davranışını nasıl etkilediği irdelenmiştir.

Gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler ile yüzeyde elde edilen maksimum deplasman değeri 0.3 g maksimum yer ivmesine sahip depremlere ait sonuçların ortalaması olarak ZM3C ve ZM3D modellerinde 18 cm olarak bulunmuştur. Bu değer doğrusal olmayan analiz sonuçlarında ZM3D için 37 cm’dir. Şekil değiştirme değeri eşdeğer doğrusal analizlere göre %1.16, doğrusal olmayan analizlere göre %3.7 olarak bulunmuştur. Maksimum spektral zemin büyütmesi değeri eşdeğer doğrusal analizlerde 3.3 olarak, doğrusal olmayan analizlerde 3.4 olarak yerel zemin sınıfı ZE olan kil zemin modellerinde sırası ile 0.9 s ve 1.0 s periyotlarında bulunmuştur.

Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar zemin modellerine, analizin eşdeğer doğrusal veya doğrusal olmayan analiz olarak gerçekleştirilmiş olmasına ve depremlere ait maksimum yer ivmesi gruplarına göre ortalamaları alınarak Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar.

Zemin Modeli	PGA (g)	Eşdeğer Doğrusal Analiz				Doğrusal Olmayan Analiz			
		Yüzeydeki Deplasman (m)	Maksimum Şekil Değiştirme (%)	Maksimum Spektral Zemin Büyütmesi (Ag)	Periyot (T)	Yüzeydeki Deplasman (m)	Maksimum Şekil Değiştirme (%)	Maksimum Spektral Zemin Büyütmesi (Ag)	Periyot (T)
ZM1	0.1	0.004	0.01	1.6	0.2	0.001	0.01	1.6	0.2
	0.2	0.006	0.02	1.7	0.3	0.004	0.02	1.8	0.3
	0.3	0.016	0.03	1.7	0.2	0.006	0.03	1.7	0.2
	0.4	0.008	0.03	1.7	0.2	0.006	0.03	1.7	0.3
ZM2A	0.1	0.013	0.05	2.5	0.6	0.013	0.06	2.4	0.7
	0.2	0.015	0.10	2.3	0.6	0.018	0.10	2.2	0.7
	0.3	0.043	0.17	2.1	0.7	0.049	0.27	2.0	0.7
	0.4	0.024	0.15	2.1	0.8	0.027	0.15	2.0	0.7
ZM2B	0.1	0.014	0.05	2.5	0.6	0.013	0.06	2.4	0.7
	0.2	0.016	0.10	2.4	0.8	0.018	0.10	2.2	0.7
	0.3	0.045	0.17	2.1	0.7	0.050	0.27	2.0	0.7
	0.4	0.025	0.15	2.1	0.8	0.030	0.15	2.0	1.2
ZM2C	0.1	0.015	0.05	2.5	0.6	0.014	0.06	2.4	0.7
	0.2	0.016	0.10	2.4	0.8	0.019	0.10	2.2	0.7
	0.3	0.048	0.18	2.1	0.7	0.051	0.28	2.1	0.7
	0.4	0.027	0.16	2.1	0.8	0.030	0.16	2.0	1.2
ZM2D	0.1	0.016	0.05	2.5	0.6	0.015	0.06	2.4	0.7
	0.2	0.018	0.10	2.5	0.8	0.020	0.10	2.3	0.7
	0.3	0.054	0.18	2.2	0.7	0.054	0.30	2.2	0.7
	0.4	0.030	0.17	2.2	0.8	0.033	0.16	2.1	1.2

Çizelge 5.1 (devam) : Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar.

Zemin Modeli	PGA (g)	Eşdeğer Doğrusal Analiz				Doğrusal Olmayan Analiz			
		Yüzeydeki Deplasman (m)	Maksimum Şekil Değiştirme (%)	Maksimum Spektral Zemin Büyütmesi (Ag)	Periyot (T)	Yüzeydeki Deplasman (m)	Maksimum Şekil Değiştirme (%)	Maksimum Spektral Zemin Büyütmesi (Ag)	Periyot (T)
ZM3A	0.1	0.026	0.14	2.1	1.4	0.012	0.06	2.5	0.6
	0.2	0.027	0.17	2.1	1.5	0.018	0.10	2.5	0.6
	0.3	0.170	1.07	1.6	1.6	0.028	0.13	2.3	0.7
	0.4	0.040	0.27	1.8	1.4	0.023	0.13	2.3	0.6
ZM3B	0.1	0.027	0.14	2.1	1.4	0.030	0.24	2.1	1.4
	0.2	0.027	0.17	2.1	1.5	0.030	0.28	1.9	2.1
	0.3	0.170	1.08	1.7	1.6	0.360	3.70	1.6	2.0
	0.4	0.043	0.27	1.8	1.4	0.050	0.44	1.6	1.4
ZM3C	0.1	0.027	0.14	2.2	1.4	0.030	0.24	2.1	1.4
	0.2	0.027	0.18	2.1	1.5	0.030	0.29	1.9	2.1
	0.3	0.180	1.08	1.7	1.6	0.367	3.70	1.6	2.0
	0.4	0.044	0.29	1.8	1.4	0.052	0.46	1.6	1.4
ZM3D	0.1	0.028	0.14	2.3	1.4	0.031	0.25	2.2	1.4
	0.2	0.030	0.19	2.1	1.6	0.032	0.29	2.0	2.1
	0.3	0.180	1.16	1.8	1.6	0.370	3.70	1.8	2.0
	0.4	0.045	0.32	1.8	1.4	0.052	0.49	1.7	1.4
ZM4	0.1	0.004	0.01	1.6	0.2	0.001	0.01	1.6	0.2
	0.2	0.006	0.02	1.7	0.2	0.004	0.02	1.7	0.3
	0.3	0.016	0.03	1.7	0.3	0.007	0.03	1.7	0.3
	0.4	0.008	0.03	1.7	0.3	0.008	0.04	1.7	0.3

Çizelge 5.1 (devam) : Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar.

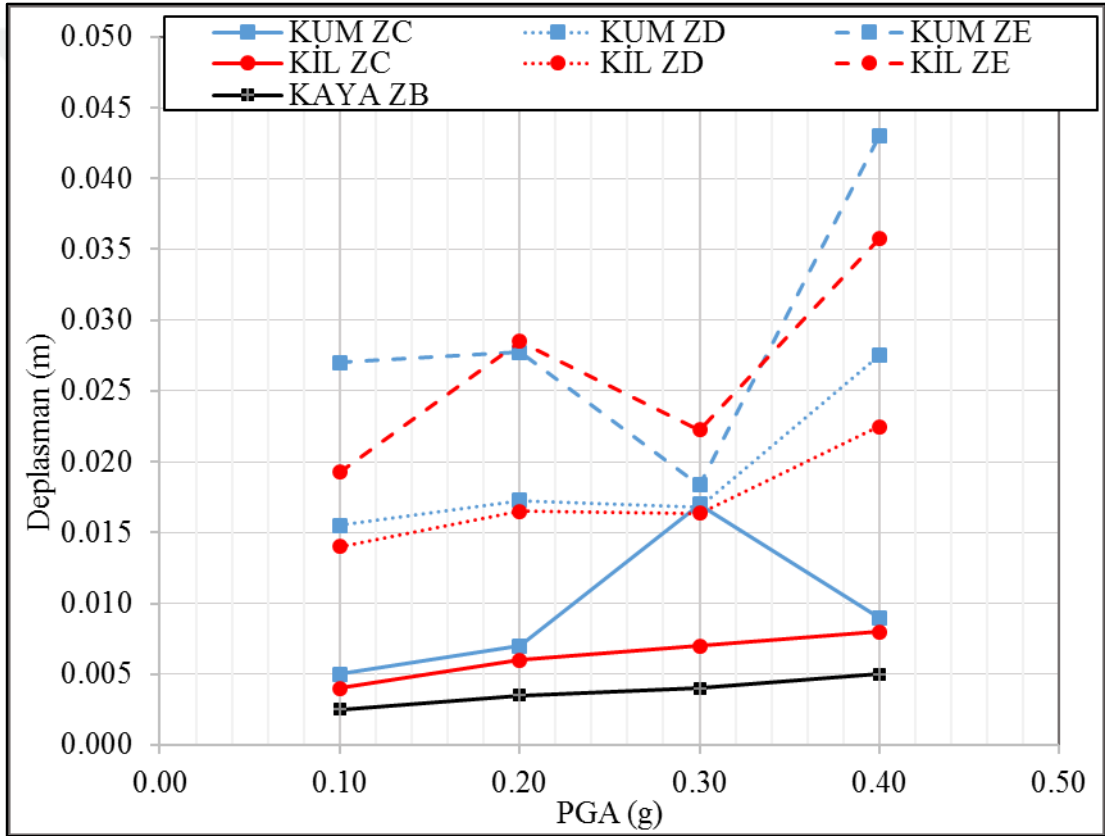
Zemin Modeli	PGA (g)	Eşdeğer Doğrusal Analiz				Doğrusal Olmayan Analiz			
		Yüzeydeki Deplasman (m)	Maksimum Şekil Değiştirme (%)	Maksimum Spektral Zemin Büyütmesi (Ag)	Periyot (T)	Yüzeydeki Deplasman (m)	Maksimum Şekil Değiştirme (%)	Maksimum Spektral Zemin Büyütmesi (Ag)	Periyot (T)
ZM5A	0.1	0.013	0.05	2.6	0.6	0.012	0.05	2.5	0.6
	0.2	0.016	0.09	2.6	0.6	0.018	0.10	2.5	0.6
	0.3	0.030	0.10	2.4	0.6	0.028	0.13	2.3	0.7
	0.4	0.021	0.12	2.3	0.6	0.023	0.12	2.3	0.6
ZM5B	0.1	0.014	0.04	2.6	0.6	0.013	0.05	2.6	0.6
	0.2	0.016	0.09	2.6	0.6	0.018	0.10	2.5	0.6
	0.3	0.033	0.10	2.4	0.6	0.030	0.14	2.3	0.7
	0.4	0.022	0.12	2.3	0.6	0.023	0.13	2.3	0.6
ZM5C	0.1	0.013	0.04	2.7	0.5	0.013	0.05	2.6	0.6
	0.2	0.016	0.06	2.7	0.6	0.018	0.10	2.5	0.6
	0.3	0.030	0.08	2.6	0.6	0.033	0.14	2.3	0.7
	0.4	0.020	0.09	2.4	0.6	0.025	0.13	2.2	0.6
ZM5D	0.1	0.016	0.05	2.6	0.6	0.014	0.05	2.6	0.7
	0.2	0.018	0.09	2.5	0.6	0.019	0.09	2.4	0.7
	0.3	0.043	0.12	2.3	0.7	0.044	0.12	2.3	0.7
	0.4	0.027	0.13	2.3	0.8	0.027	0.12	2.1	0.8
ZM6A	0.1	0.019	0.08	3.2	0.9	0.019	0.08	3.3	0.9
	0.2	0.026	0.12	3.3	0.9	0.027	0.13	3.2	0.9
	0.3	0.055	0.26	3.0	0.9	0.053	0.31	3.0	0.9
	0.4	0.034	0.17	3.1	0.9	0.034	0.20	3.0	0.9

Çizelge 5.1 (devam) : Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar.

Zemin Modeli	PGA (g)	Eşdeğer Doğrusal Analiz				Doğrusal Olmayan Analiz			
		Yüzeydeki Deplasman (m)	Maksimum Şekil Değiştirme (%)	Maksimum Spektral Zemin Büyütmesi (Ag)	Periyot (T)	Yüzeydeki Deplasman (m)	Maksimum Şekil Değiştirme (%)	Maksimum Spektral Zemin Büyütmesi (Ag)	Periyot (T)
ZM6B	0.1	0.019	0.08	3.2	0.9	0.019	0.08	3.3	0.9
	0.2	0.027	0.13	3.3	0.8	0.028	0.14	3.3	0.9
	0.3	0.058	0.26	3.0	0.9	0.054	0.32	3.0	0.9
	0.4	0.034	0.17	3.1	0.9	0.035	0.20	3.0	0.9
ZM6C	0.1	0.019	0.08	3.2	0.9	0.019	0.08	3.3	1.0
	0.2	0.028	0.13	3.3	0.9	0.028	0.14	3.2	0.9
	0.3	0.060	0.26	3.0	0.9	0.059	0.27	2.8	0.9
	0.4	0.034	0.18	3.1	0.9	0.036	0.19	3.0	0.9
ZM6D	0.1	0.020	0.08	3.2	1.0	0.020	0.08	3.4	1.0
	0.2	0.033	0.14	3.2	0.9	0.033	0.14	3.1	1.1
	0.3	0.069	0.24	2.8	1.0	0.066	0.26	2.6	0.9
	0.4	0.041	0.17	2.9	0.9	0.042	0.17	2.7	1.2
ZM7	0.1	0.003	0.01	1.2	0.1	0.001	0.01	1.2	0.1
	0.2	0.004	0.01	1.3	0.2	0.002	0.01	1.3	0.1
	0.3	0.011	0.01	1.3	0.2	0.002	0.01	1.3	0.2
	0.4	0.005	0.01	1.3	0.2	0.002	0.01	1.3	0.2
ZM8	0.1	0.002	0.01	1.5	0.1	0.001	0.01	1.6	0.1
	0.2	0.003	0.01	1.8	0.2	0.002	0.01	1.8	0.2
	0.3	0.008	0.01	1.7	0.2	0.003	0.01	1.8	0.2
	0.4	0.005	0.02	1.8	0.2	0.003	0.01	1.9	0.2

Çizelgede verilen sonuçlarda Düzce deprem kaydına ait sonuçlar da ortalamaya dahil edilmiştir. Fakat daha önce de belirtildiği üzere Arias şiddetinin de yüksek olması ile birlikte Düzce depremi özellikle yerel zemin sınıfı ZE olan kum zeminlerde çok yüksek deplasman ve şekil değiştirme değerleri vermektedir. Bu nedenle anakaya derinliğinin, yerel zemin sınıfının, zemin türünün, maksimum yer ivmesinin ve dinamik analiz çeşidinin sonuçlara olan etkisi değerlendirilirken Düzce depremine ait sonuçlar gözardı edilmiştir.

Yerel zemin sınıfının, zemin türünün ve maksimum yer ivmesinin yüzeyde oluşacak deplasmanlar üzerindeki etkisi eşdeğer doğrusal analizler için Şekil 5.33 kullanılarak değerlendirilmiştir.

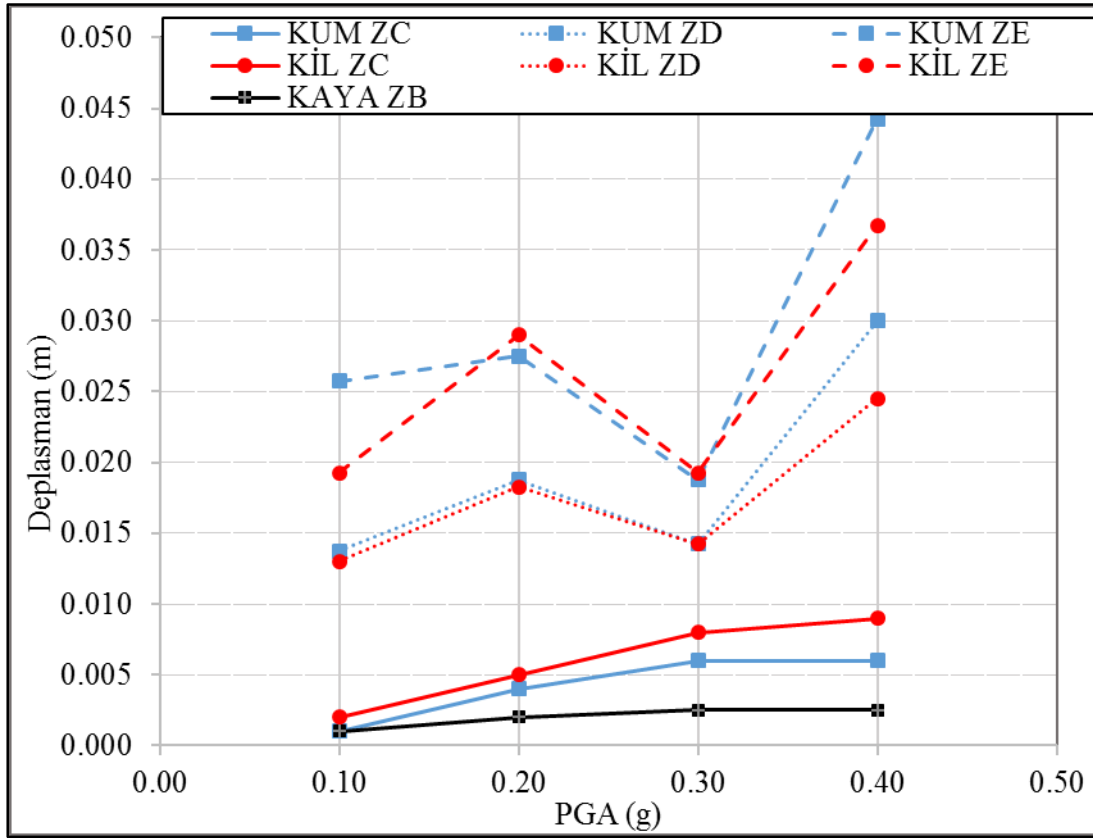


Şekil 5.33 : Eşdeğer doğrusal analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre deplasman değerinin değişimi.

Buna göre kayma dalgası hızı, birim hacim ağırlık ve yerel zemin sınıfının aynı olduğu durumlarda kum zeminlerde meydana gelen deplasmanlar ile kil zeminlerde meydana gelen deplasmanlar arasında büyük farklılık olmamasına rağmen 0.3 g PGA değerinde kil zeminler, 0.4 g PGA değerinde kum zeminler daha yüksek deplasman yapma eğilimindedirler. Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarında ZE yerel zemin sınıfına dahil

olan kum ve killeri haricinde PGA değeri arttıkça yüzeyde oluşan deplasmanın arttığı görülmektedir. Tüm PGA değerlerinde zemin türünden bağımsız olarak yerel zemin sınıfının kötüleşmesi deplasman değerlerini arttırmıştır. Yerel zemin sınıfı ZB olan kaya modeli benzer davranış göstermesi ile birlikte diğer modellerden daha düşük deplasman değerlerine sahiptir.

Aynı karşılaştırma doğrusal olmayan analizler için de yapılmış ve deplasman değerlerinin PGA, zemin cinsi ve yerel zemin sınıfının etkisiyle nasıl değiştiği Şekil 5.34'te sunulmuştur.

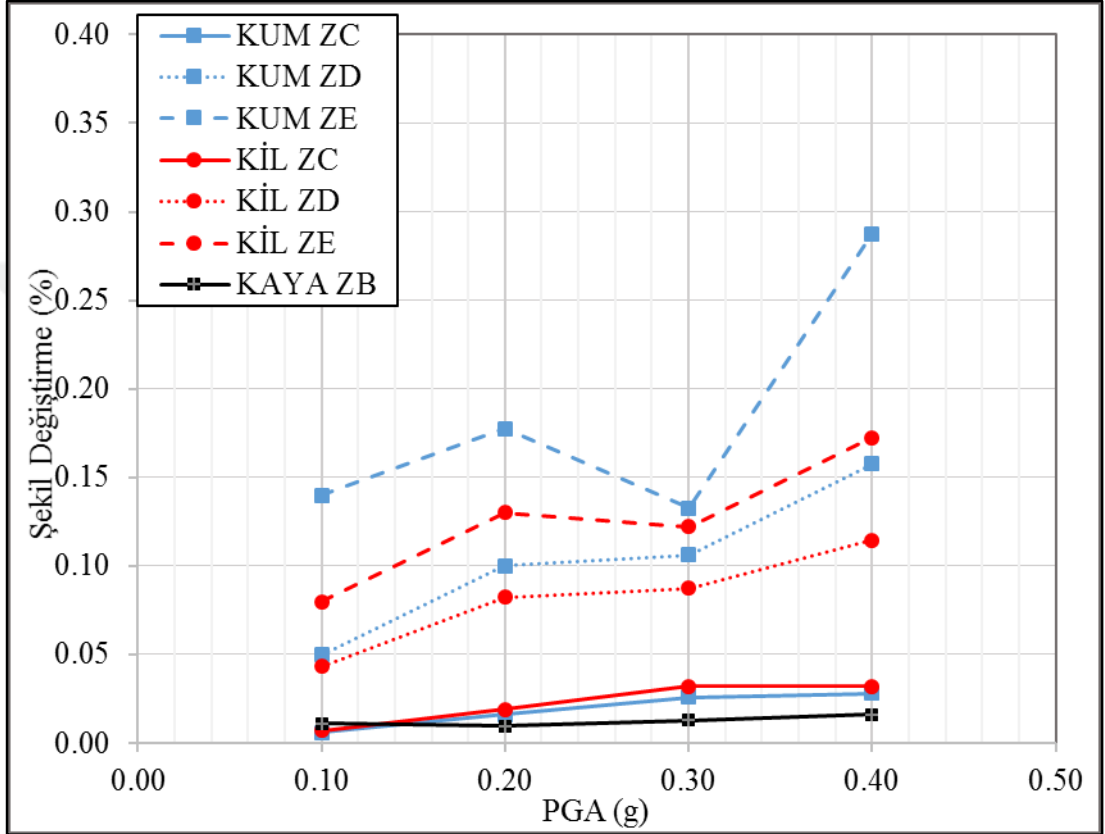


Şekil 5.34 : Doğrusal olmayan analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre deplasman değerinin değişimi.

Doğrusal olmayan analiz sonuçları eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında benzerlik görülmektedir. Doğrusal olmayan analizlerde kum ve kil zeminlerde meydana gelen deplasmanlarda büyük farklılıklar oluşmamıştır. Doğrusal olmayan analizlerde de maksimum yer ivmesi arttıkça ve yerel zemin sınıfı kötüleştikçe yüzeyde oluşacak deplasmanın artacağı söylenebilir.

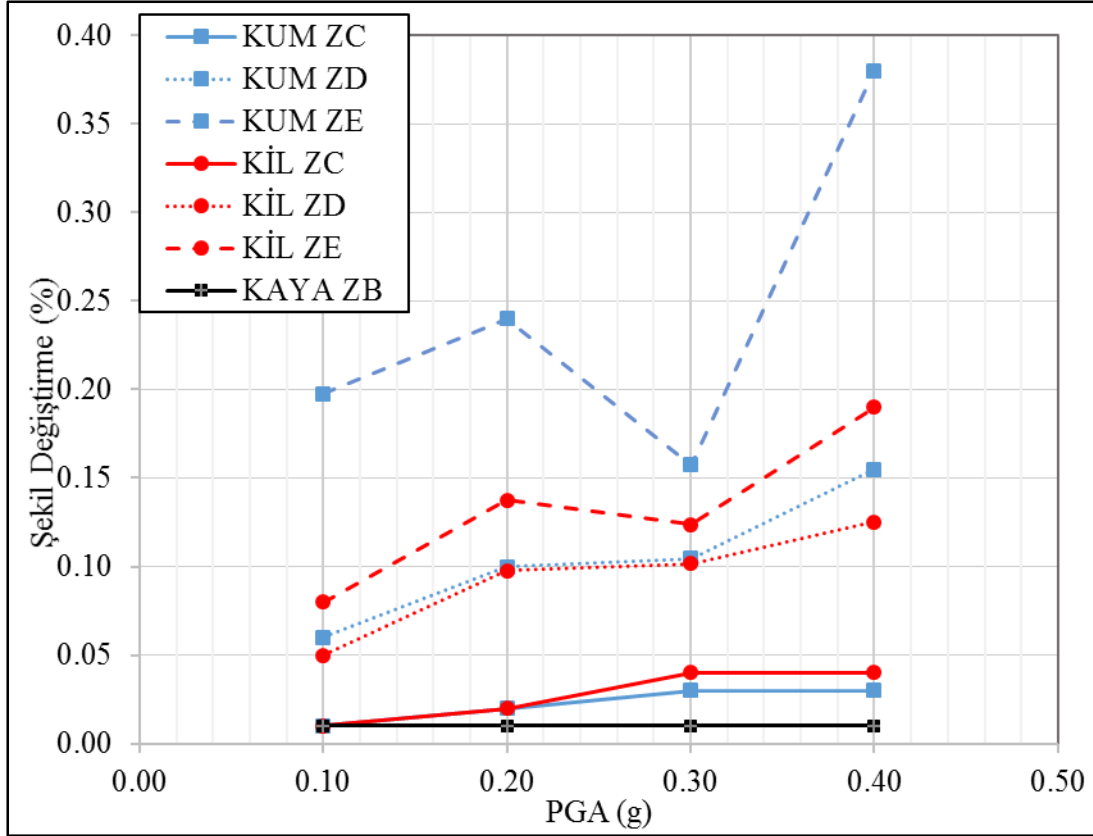
Yerel zemin sınıfının, zemin türünün ve maksimum yer ivmesinin zemin tabakalarında oluşacak şekil değiştirmeler üzerindeki etkileri eşdeğer doğrusal analizler için Şekil

5.35'te gösterildiği gibidir. Buna göre yerel zemin sınıfı kötüleştikçe zemin tabakalarında oluşan şekil değiştirmeler artmaktadır. Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum ve kil zeminler hariç maksimum yer ivmesinin artışı ile şekil değiştirme değerinin artışı doğrusallık göstermektedir. Ayrıca yerel zemin sınıfının ZC olduğu durum için kil ve kum zeminlerde benzer şekil değiştirme değerleri elde edilirken diğer tüm durumlar için kum zeminler daha fazla şekil değiştirmeye maruz kalmıştır.



Şekil 5.35 : Eşdeğer doğrusal analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre şekil değiştirmenin değişimi.

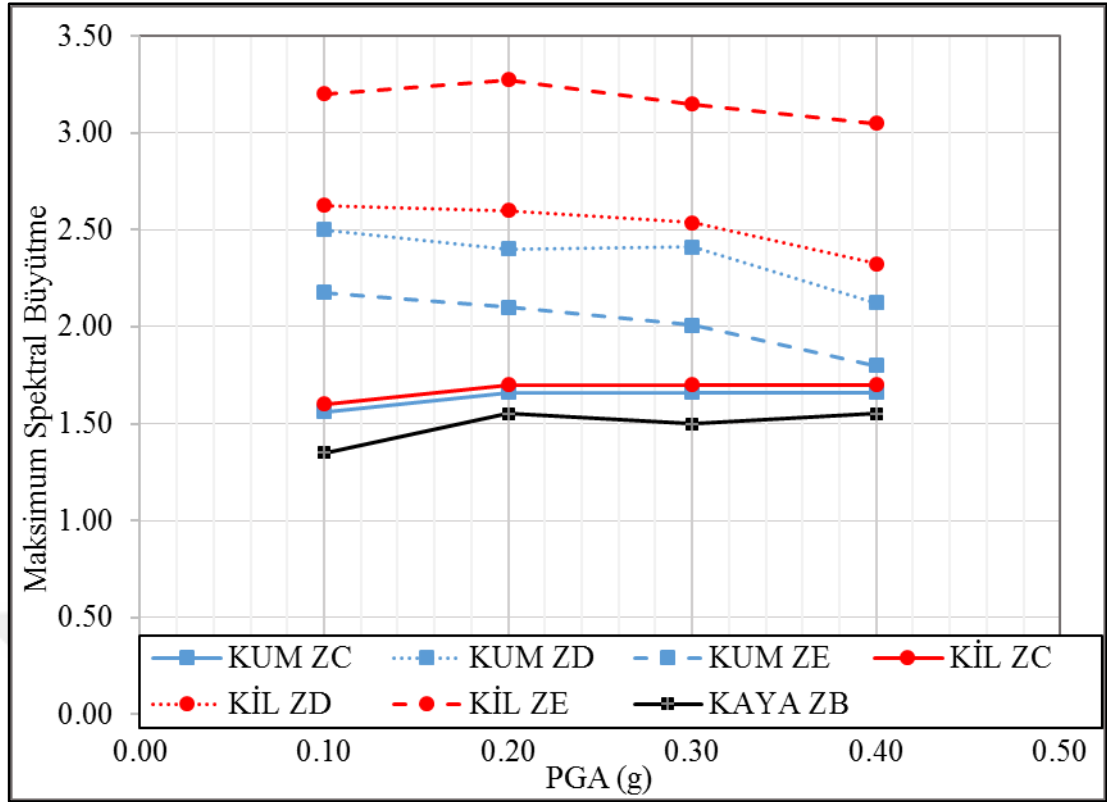
Benzer değerlendirme doğrusal olmayan analiz için gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.36'da görüldüğü üzere doğrusal olmayan analizlerde yerel zemin sınıfı kötüleştikçe zemin tabakalarında oluşan şekil değiştirmeler artmaktadır. Yerel zemin sınıfının aynı olduğu kum ve killerde şekil değiştirme değerleri benzerlik göstermektedir fakat ZE yerel zemin sınıfına sahip kum zeminler kil zeminlere göre daha yüksek şekil değiştirmeye maruz kalmaktadır. ZE yerel zemin sınıfı haricinde PGA değerinin artışı zeminlerde oluşan şekil değiştirmeleri arttırmıştır. Doğrusal olmayan analiz ile eşdeğer doğrusal analizler karşılaştırıldığında yerel zemin sınıfı, PGA ve zemin türlerinin eşit olması durumunda doğrusal olmayan analizlerde daha yüksek şekil değiştirmeler görülmektedir.



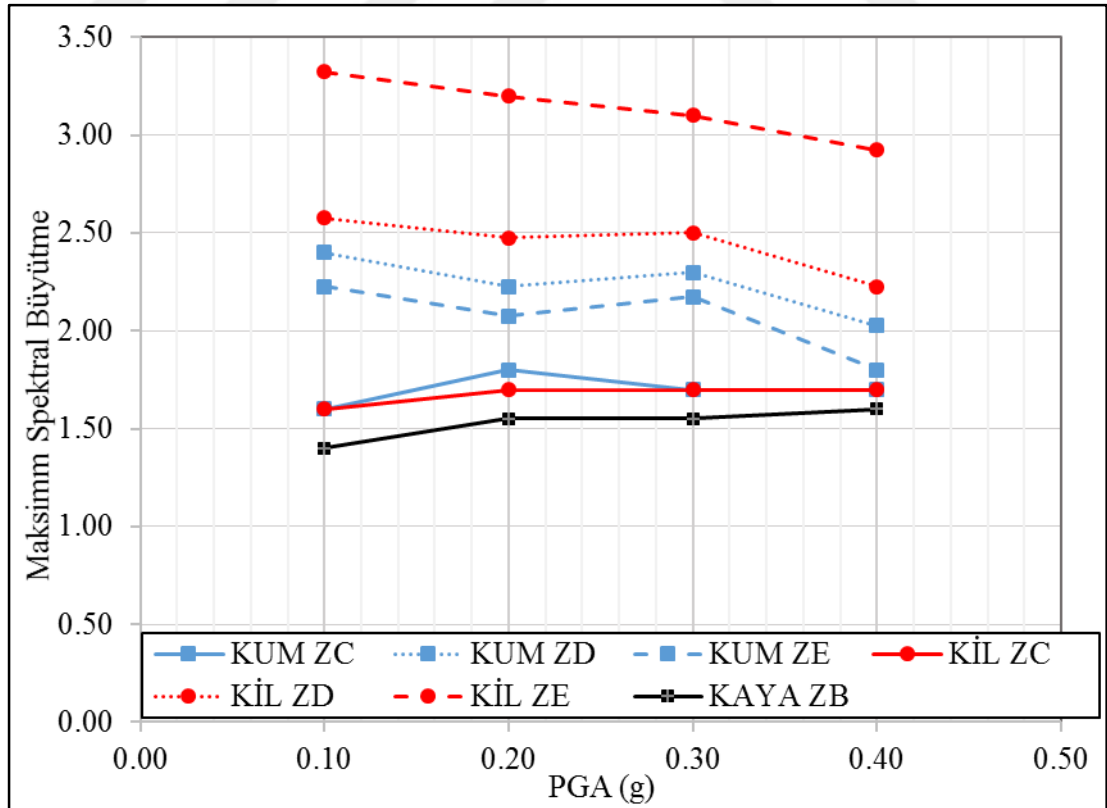
Şekil 5.36 : Doğrusal olmayan analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre şekil değiştirmenin değişimi.

Analizler sonucunda elde edilen maksimum spektral zemin büyütmesi değerleri yerel zemin sınıfına, zemin türüne ve deprem maksimum yer ivmesine göre değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda Şekil 5.37’de görüldüğü üzere kil zeminlerde elde edilen maksimum spektral zemin büyütmesi değerleri tüm yerel zemin sınıflarında ve tüm PGA değerlerinde kum zeminlerden daha yüksektir. Tüm yerel zemin sınıfları ve zemin türleri için PGA değerinin artışı ile maksimum spektral zemin büyütmesi değerleri arasında ters orantı olduğu söylenebilir. Fakat yerel zemin sınıfının ZB olduğu kayalar tüm PGA değerlerinde benzer sonuçlar gösterdiği için bu değerlenirdirme dışında tutulabilir. Kil zeminlerde yerel zemin sınıfı kötüleştikçe maksimum spektral zemin büyütmesi değerlerinde artış gözlenmektedir fakat kum zeminlerde yerel zemin sınıfının ZE olduğu durumda ZD olduğu duruma göre daha düşük maksimum spektral zemin büyütmesi elde edilmektedir.

Benzer değerlendirme doğrusal olmayan analizler ile elde edilen maksimum spektral zemin büyütmesi için Şekil 5.38’de gösterilmiştir.



Şekil 5.37 : Eşdeğer doğrusal analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre spektral zemin büyütmesinin değişimi.



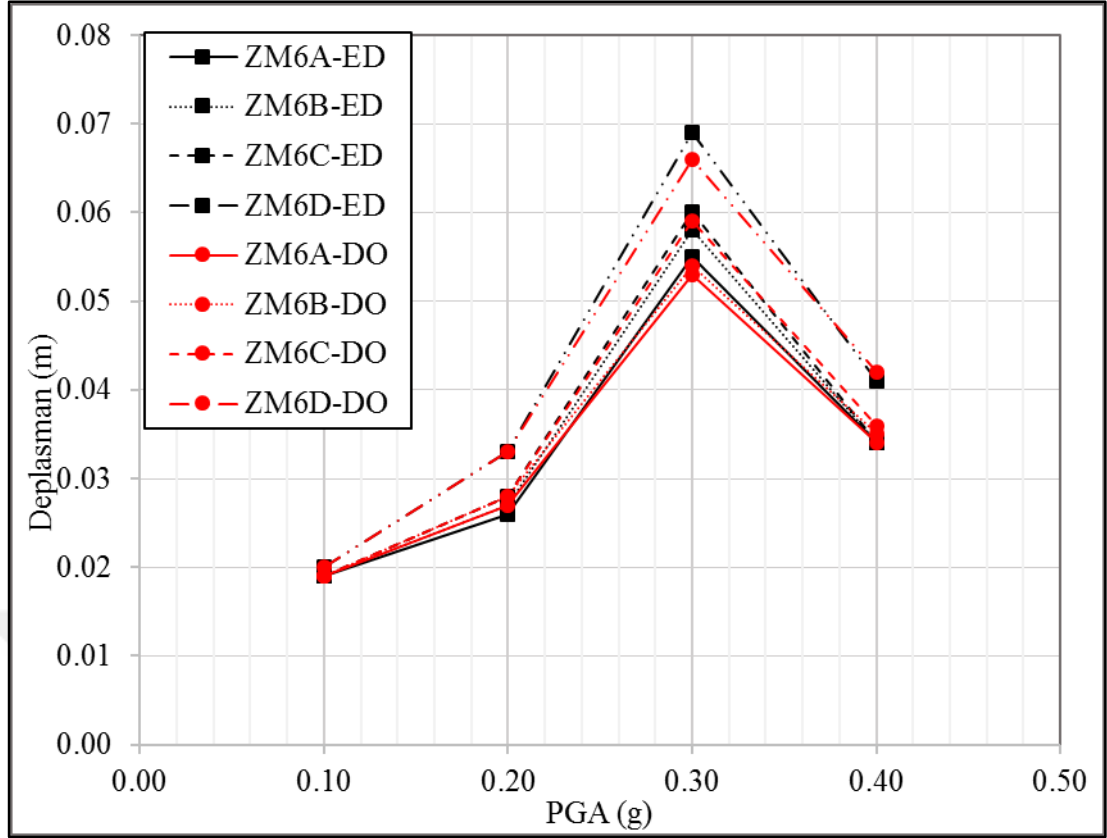
Şekil 5.38 : Doğrusal olmayan analiz ile PGA, yerel zemin sınıfı ve zemin türüne göre spektral zemin büyütmesinin değişimi.

Doğrusal olmayan analizler kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda Şekil 5.38’de görüldüğü üzere ZC yerel zemin sınıfı haricinde kil zeminlerde kum zeminlere göre daha yüksek spektral zemin büyütmesi olduğu söylenebilir. Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarında olduğu gibi doğrusal olmayan analiz sonuçlarında da tüm yerel zemin sınıfları ve zemin türleri için PGA değerinin artışı ile maksimum spektral zemin büyütmesi değerleri arasında genel olarak ters orantı olduğu söylenebilir. Bu durum üçüncü bölümde bahsedilen Idriss’in (1990) yaptığı çalışma ile karşılaştırıldığında benzerlik olduğu görülmektedir. Kil zeminlerde yerel zemin sınıfı kötüleştikçe maksimum spektral zemin büyütmesi değerlerinde artış gözlenmektedir fakat kum zeminlerde yerel zemin sınıfının ZE olduğu durumda ZD olduğu duruma göre daha düşük maksimum spektral zemin büyütmesi elde edilmektedir.

Spektral zemin büyütmesi değerlerinin yerel zemin sınıfına, PGA değerine ve zemin türüne göre farklılık göstermesinin yanında bu spektral zemin büyütmesinin saptandığı periyot değerleri de farklılık göstermektedir. PGA değerlerinin farklılaşması bu periyot değerleri üzerinde etkiye sahip değilken yerel zemin sınıfı kötüleşmesiyle zeminlerin rijitliği azaldıkça spektral zemin büyütme değerleri daha yüksek periyot aralıklarında gerçekleşmektedir. Ayrıca genel olarak kum zeminlerde spektral zemin büyütme değerlerinin kil zeminlere göre daha yüksek periyotta gerçekleştiği söylenebilir.

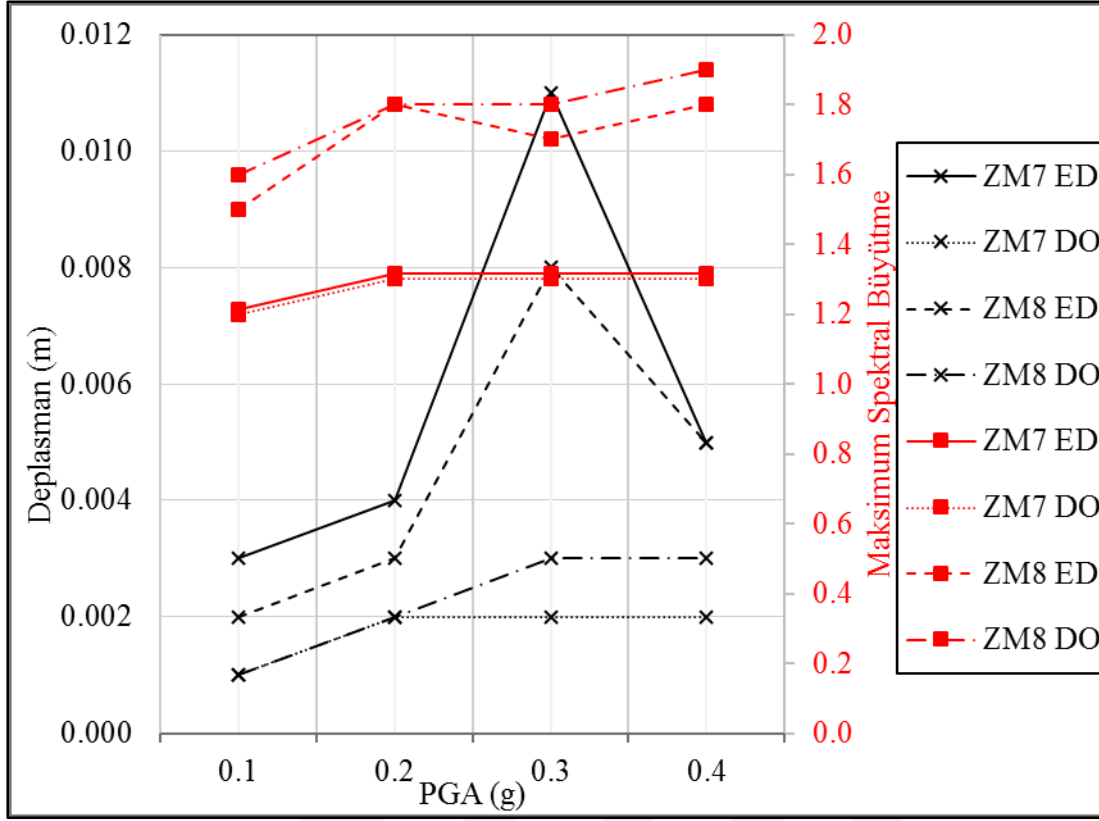
Analiz çeşidinin maksimum spektral zemin büyütme değerleri ve bu büyütme değerlerinin gerçekleştiği periyot değerleri üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Eşdeğer doğrusal analiz ve doğrusal olmayan analiz yapılmasının farklılığı deplasman ve şekil değiştirme değerleri üzerinde daha net görülmektedir.

Bu değerlendirmelerin dışında yerel zemin sınıfı ZD, ZE olan kum ve kil zeminlerde 30 m kalınlığındaki tabakaların altına geçiş tabakası eklenerek zemin modelleri oluşturulmuştur. Anakaya derinliğinin analiz sonuçlarına olan etkisini incelemek için gerçekleştirilen analizlerde yüzey tepki spektrumlarındaki spektral ivmelerde, spektral zemin büyütmesi değerlerinde büyük farklılıklar oluşmamıştır. ZE yerel zemin sınıfına sahip olan kil zemin modelleriyle gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen deplasman değerlerinde gözle görülür bir farklılık olduğu Şekil 5.39’da görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde geçiş tabakası kalınlığı arttıkça yüzeyde meydana gelen deplasmanın tüm PGA değerleri için arttığı görülmektedir. Ayrıca eşdeğer doğrusal analiz ile elde edilen deplasman değerleri doğrusal olmayan analiz değerlerinden daha yüksektir.



Şekil 5.39 : Geçiş tabakası kalınlığının analiz sonuçlarına etkisi.

Analizlerde yerel zemin sınıfı ZB olan 2 adet kaya zemin modeli kullanılmıştır. Bu modeller arasındaki temel fark anakayaya ait kayma dalgası hızının ZM7’de 1000 m/s, ZM8’de 1500 m/s olmasıdır. Bu iki model için karşılaştırma grafiği Şekil 5.40’ta sunulmuştur. Burada amaç anakayanın ZB ve ZA yerel zemin sınıfına sahip olmasının analiz sonuçları üzerindeki etkisini görebilmektir. Bu iki model kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları incelendiğinde yüzeyde elde edilen deplasman değerlerinde çok ufak farklılıklar olması ile birlikte anakayanın 1000 m/s kayma dalgası hızına sahip olduğu ZM7 modelinde değerler daha yüksek çıkmaktadır. Ayrıca analizin doğrusal olmayan veya eşdeğer doğrusal olarak yapılması kıyaslandığında eşdeğer doğrusal analiz ile elde edilen deplasmanlar daha yüksektir. Deplasman değerlerinin aksine maksimum spektral büyütme değerleri ZM8 modelinde daha yüksek bulunmuştur. ZM7 modelinde eşdeğer doğrusal analiz ile doğrusal olmayan analizlere ait sonuçlar eşitken, ZM8’de küçük bir mertebe farkıyla doğrusal olmayan analizlerde daha yüksek maksimum spektral büyütme hesaplanmıştır.



Şekil 5.40 : ZM7-ZM8 modellerine ait sonuçların karşılaştırılması.

5.4 Analiz Sonuçlarının TBDY 2018 ile Belirlenen Tasarım Spektrumları ile Karşılaştırılması

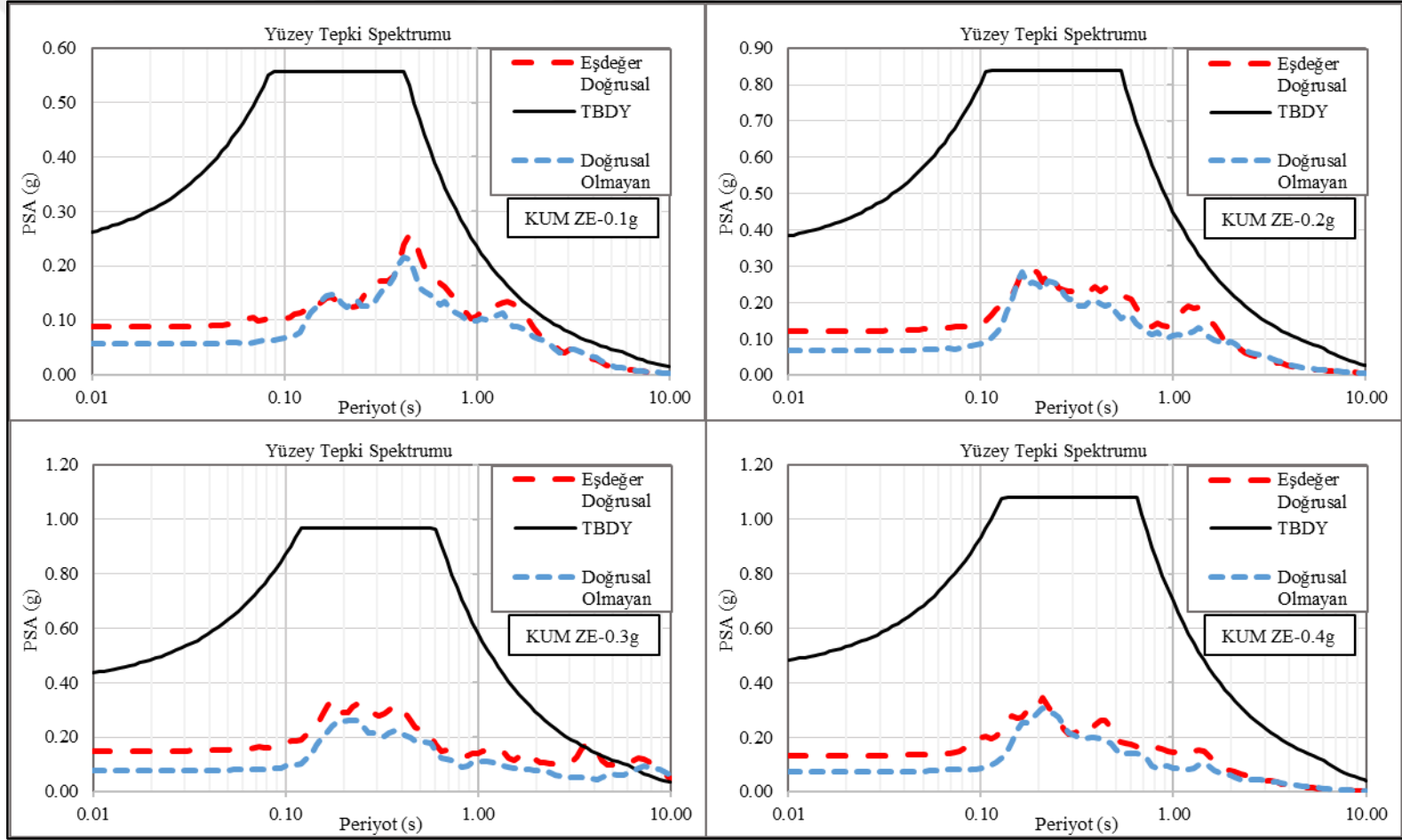
Yapılan analizler sonucunda elde edilen yüzey tepki spektrumları TBDY kapsamında belirlenen tasarım spektrumları ile kıyaslanmıştır. İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Konya ili sınırları içerisinde bulunan ve maksimum yer ivmesi 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4 g olan 4 noktadan DD-2 deprem yer hareketi için alınan tepki spektrumları ile eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler ile elde edilen yüzey tepki spektrumları karşılaştırılmıştır. Yönetmelik kapsamında tasarım spektrumu belirlenen noktalara ait enlem ve boylam bilgileri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : Tasarım spektrumu alınan noktalar.

PGA (g)	Enlem (°)	Boylam (°)
0.1	37.717202	33.328371
0.2	38.055161	32.027370
0.3	38.105114	31.846705
0.4	38.148755	31.689302

Deprem yönetmeliği kullanılarak yerel zemin sınıfının ZB, ZC, ZD ve ZE olduğu durumlar için belirlenen tasarım spektrumları ile yapılan analizler sonucunda elde edilen yüzey tepki spektrumları karşılaştırıldığında spektrumların genel olarak birbirine benzediği görülmektedir. Şekil 5.41’de gösterilen yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum zeminler ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen yüzey tepki spektrumlarında deprem yönetmeliği ile belirlenen tasarım spektrumlarından daha düşük spektral ivme değerleri elde edilmiştir. Spektrumlara ait hakim periyot aralığının benzer olduğu bu karşılaştırmada eşdeğer doğrusal analizlerin doğrusal olmayan analizlere göre daha yüksek spektral ivme değerleri verdiği de görülmektedir. Yerel zemin sınıfının ZE olduğu kum zeminlerde eşdeğer doğrusal veya doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilerek yüzeyde oluşacak spektral ivmelerin ve hakim periyotların daha doğru saptanması sağlanabilir. Böylece üstyapı tasarımları yapılırken güvenlik ve ekonomik şartlar iyileştirilebilir.

Bunun yanında yerel zemin sınıfının ZC, ZD, ZE olduğu kil zeminler, ZC ve ZD olduğu kum zeminler ve ZB olan kaya için deprem yönetmeliği ile belirlenen tasarım spektrumları ile eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonuçlarında elde edilen spektrumlar örtüşmektedir. Bu 6 durum için karşılaştırma grafikleri EK E’de verilmiştir.



Şekil 5.41 : Yerel zemin sınıfı ZE olan kum zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yerel zemin koşullarının ve deprem özelliklerinin tek boyutlu dinamik davranış üzerindeki etkilerini görebilmek amacıyla farklı maksimum yer ivmesi değerlerine ölçeklendirilmiş 16 adet anakaya mostrası kuvvetli yer hareketi ivme kaydı ile yerel zemin sınıfının, zemin türünün ve anakaya derinliğinin farklı olduğu 20 zemin modeli kullanılarak eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan bir boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem ivme kayıtları 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g ve 0.4 g değerlerine ölçeklendirilmiş ve ivme seviyelerine göre her grupta 4 deprem ivme kaydı olacak şekilde gruplandırılmıştır. Zemin modelleri TBDY 2018’de deranajsız kayma dayanımı, standart penetrasyon testi darbe sayısı ve kayma dalgası hızı değerleri üzerinden tanımlanmış olan yerel zemin sınıflarından ZB, ZC, ZD ve ZE yerel zemin sınıfına dahil olacak şekilde seçilmiş ve tabakalara ait ortalama kayma dalgası hızı değerlerinin değişimi bu kapsamında belirlenmiştir. Gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlere ait sonuçlar yüzey tepki spektrumları, spektral zemin büyütmesi, zemin yüzeyinde oluşan deplasman değerleri ve zemin tabakalarında meydana gelen şekil değiştirmeler olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar anakaya derinliği, yerel zemin sınıfı, zemin türü, maksimum yer ivmesi değerleri ve analiz yöntemi açısından karşılaştırılmış ve yüzey tepki spektrumları ile TBDY kapsamında belirlenen tasarım spektrumları arasındaki farklar incelenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Analizler sonucunda yüzeydeki spektral ivmeler, spektral zemin büyütmesi değerleri, yüzeyde oluşan deplasmanlar, tabakalarda meydana gelen şekil değiştirme değerleri incelendiğinde en düşük değerlerin kaya ile oluşturulan ZM7 ve ZM8 modellerine ait olduğu görülmektedir. Bu modellerde anakaya tabakasına ait kayma dalgası hızları 1000 m/s ve 1500 m/s olarak ZB ve ZA yerel zemin sınıfı koşullarını sağlayacak şekilde seçilirken maksimum spektral zemin büyütme ZM8 için 1.9, ZM7 için 1.7 olarak 0.4 g maksimum yer ivmesine sahip depremler ile hesaplanmıştır. Kaya ile oluşturulan modellerde anakayanın kayma dalgası hızı değerinin 1500 m/s olduğu durumda zemin

tabakaları ile anakaya arasındaki empedans farkının daha yüksek olması ile birlikte spektral zemin büyütmesi daha yüksek iken, yüzeydeki deplasmanlar iki kaya modelinde de 8 mm ve 11 mm olarak birbirine yakın hesaplanmıştır. Rijit zeminlerde anakaya tabakasının özellikleri zemin büyütmesini etkilerken tabakalarda deplasman ve deformasyon şeklinde oluşacak hasarları etkilememektedir.

- Yüksek Arias şiddetine sahip olan Düzce depremine ait sonuçlar gözardı edildiğinde yüzeydeki en büyük deplasmanlar ortalama olarak 0.1 g PGA değerine sahip D1 grubu depremler için 2.7 cm, 0.2 g PGA değerine sahip D2 grubu depremler için 2.9 cm, PGA değeri 0.3 g olan D3 grubu depremler için 1.8 cm, 0.4 g değerine sahip D4 grubu depremler için 4.3 cm olarak hesaplanmıştır. Eşdeğer doğrusal analiz sonuçları ile doğrusal olmayan analiz sonuçları deprem kayıtlarına ait maksimum yer ivmesi değerleri açısından değerlendirildiğinde yüzeyde oluşan deplasmanların maksimum yer ivmesi arttıkça artış gösterdiği söylenebilir.
- Benzer bir değerlendirme şekil değiştirme değerleri için yapıldığında minimum şekil değiştirmeler tüm gruplar için %0.01 ile ortak olurken maksimum şekil değiştirmeler eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarında D1 için %0.14, D2 için %0.18, D3 için %0.13 ve D4 için %0.29 olarak bulunmuştur. Bu değerler doğrusal olmayan analizler sonucunda sırasıyla %0.20, %0.24, %0.16 ve %0.38 olmaktadır. Depreme ait PGA değerinin artışı şekil değiştirme değerlerini artırırken doğrusal olmayan analiz yapılması da şekil değiştirmeyi arttırmaktadır.
- Yerel zemin sınıfının ve zemin türünün bir boyutlu dinamik davranışa olan etkileri incelendiğinde kaya ile oluşturulan modellerde spektral zemin büyütmeleri 1.4 ile 1.8 arasında, bu büyütmelemlerin hesaplandığı periyotlar 0.1 s ile 0.2 s arasında değişmektedir. Sıkı kum, orta sıkı kum, katı kil ve orta katı kil zeminler kullanılarak oluşturulan ve yerel zemin sınıfının ZC ve ZD modellerde spektral zemin büyütmelemleri sırasıyla 1.6 ile 1.8 ve 2.0 ile 2.6 arasında, büyütmelemlerin olduğu periyotlar 0.2 s ile 0.3 s arasında ve 0.6 s ve 0.8 s arasında değişmektedir. Bu modellerde zemin türünün belirgin bir etkisi görülmemekle birlikte zemin sınıfı kötüleştikçe büyütmelemlerin ve periyot değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Yerel zemin sınıfının ZE olduğu

durumda zemin türünün farklılığı ortaya çıkmaktadır. Gevşek kumlarda spektral zemin büyütme 1.8 ile 2.2 aralığında yumuşak killerde ise 2.9 ile 3.3 arasında değişmektedir. Bu değerlerin hesaplandığı periyotlar diğer zemin sınıflarına göre daha yüksek değerlerde olurken kumlara ait değerler 1.2 s ve 1.7 s arasında değişerek killere ait 0.9 s ile 1.0 s aralığının üzerinde kalmaktadır.

- Yerel zemin sınıfının ve zemin türünün deplasman ve şekil değiştirmeler üzerinde etkileri incelendiğinde tüm maksimum yer ivmesi değerleri için yerel zemin sınıfı kötüleştikçe bu değerlerin artış gösterdiği söylenebilir. Ayrıca birbirinden çok farklı sonuçlar vermemekle birlikte kumlarda oluşan deplasmanlar ve şekil değiştirmeler killere göre daha yüksek olmaktadır. Şekil değiştirmelerin genel olarak TBDY’de de belirtildiği üzere %1’in altında kalması analiz türünün sonuçlara etkisini düşürmüştür.
- Yerel zemin sınıfının ZD ve ZE olduğu modellerde anakaya derinliğinin sonuçlara olan etkisi incelendiğinde kumlarda anakaya derinliğini 30 m ile 50 m arasında değişmesi analiz sonuçlarını etkilemezken killerde anakaya derinliği arttıkça yüzeydeki deplasman ve tabakalarda oluşan şekil değiştirmelerin kademeli olarak artış gösterdiği söylenebilir.

Yapılan çalışmada yerel zemin özelliklerinin, zemin türünün, maksimum yer ivmesinin ve anakaya derinliğinin zeminlerin dinamik davranışına olan etkileri ölçeklendirilen 16 kuvvetli yer hareketi ivme kaydı ve TBDY esas alınarak oluşturulan 20 zemin modeli kullanılarak bir boyutlu saha tepki analizleri gerçekleştirilmesi ile incelenmiştir. Analizlerin 1 boyutlu olarak gerçekleştirilmiş olması yamaçlarda, ova ve vadi geometrilerinde; ayrıca anakaya derinliğinin yüksek olmaması derin zemin profillerinde bu çalışmaya ait verilerden yararlanılmasını kısıtlamaktadır. Topoğrafik etkiler ve sınır koşulları dikkate alınarak daha fazla zemin modeli oluşturması ile 2 veya 3 boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmesi halinde bu çalışmaya ait sonuçlar geliştirilmeye açıktır.



KAYNAKLAR

- Amir-Faryar, B., & Aggour, M. S.** (2016). *Effect of fibre inclusion on dynamic properties of clay*. Geomechanics and Geoengineering. <https://doi.org/10.1080/17486025.2015.1029013>
- Ansal, A., & Tönük, G.** (2011). *Zemin Büyütme Analizleri ve Saya Özel Tasarım Depremi Özelliklerinin Belirlenmesi*. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, 1–8.
- Ansal, Atilla, Kurtuluş, A., & Tönük, G.** (2010). *Seismic microzonation and earthquake damage scenarios for urban areas*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.004>
- Arslan, H., & Siyahi, B.** (2006). *A comparative study on linear and nonlinear site response analysis*. Environmental Geology, 50(8), 1193–1200. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0291-4>
- Assimaki, D., Gazetas, G., & Kausel, E.** (2005). *Effects of Local Soil Conditions on the Topographic Aggravation of Seismic Motion: Parametric Investigation and Recorded Field Evidence from the 1999 Athens Earthquake*. Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 1059–1089. <https://doi.org/10.1785/0120040055>
- Aydın, C.** (2018). *Dinamik Özellikleri Belirlenen Sıkıştırılmış Killi Bir Zemin Tabakasının Tek Boyutlu Sismik Yer Tepki Analizleri*. (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bahar, R., Saci, L., Louadj, S., & Vincens, E.** (2012). *Numerical evaluation of shear modulus degradation and damping curves of Algerian soils using geophysical tests*. 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE).
- Bardet, J. ., Ichii, K., & Lin, C. H.** (2000). *EERA A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits*. In University of Southern California, Department of Civil Engineering.
- Capilleri, P. P., Massimino, M. R., Motta, E., & Todaro, M.** (2018). *Two-dimensional site seismic response analysis for a strategic building in Catania*. Annals of Geophysics, 61(2), 1–8. <https://doi.org/10.4401/ag-7704>
- Cara, F., Cultrera, G., Azzara, R. M., De Rubeis, V., Di Giulio, G., Giammarinaro, M. S., Tosi, P., Vallone, P., & Rovelli, A.** (2008). *Microtremor measurements in the City of Palermo, Italy: Analysis of the correlation between local geology and damage*. Bulletin of the Seismological Society of America. <https://doi.org/10.1785/0120060260>

- Carlton, B., & Pestana, J. M.** (2012). *Small Strain Shear Modulus of High and Low Plasticity Clays and Silts*. 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE).
- Celep, Z., & Kumbasar, N.** (2004). *Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı*. Beta Dağıtım.
- Civelekler, E., Okur, D. V., & Afacan, K. B.** (2018). *Eşdeğer Analiz Yöntemi ile Zeminin Dinamik Davranışının Değerlendirilmesi: Eskişehir Örneği*. Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi - B Teorik Bilimler, 124–132. <https://doi.org/10.20290/aubtdb.489966>
- Cılız, S., Özkan, M. Y., & Çetin, K. Ö.** (2007). *Effect of Basin Edge Slope on the Dynamic Response of Soil Deposits*. Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1309.
- Darendeli, M. B.** (2001). *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping*. In IEEE Transactions on Communications. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1977.1093818>
- Edinçliler, A., & Çalıkoglu, M.** (2018). *Nonlinear Site Response Analysis for the İzmir Region: A Case Study*. Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture, 2(2), 51–58.
- Fahjan, Y. M.** (2008). *Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) tasarım ivme spektrumuna uygun gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklenmesi*. Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers.
- Falcone, G., Boldini, D., & Amorosi, A.** (2018). *Site response analysis of an urban area: A multi-dimensional and non-linear approach*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 109(November 2017), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.02.026>
- Flores-Estrella, H., Yussim, S., & Lomnitz, C.** (2007). *Seismic response of the Mexico City Basin: A review of twenty years of research*. In Natural Hazards. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-0034-6>
- Freeman, S. A.** (2007). *Response spectra as a useful design and analysis tool for practicing structural engineers*. ISET Journal of Earthquake Technology.
- Hardin, B. O., & Drnevich, V. P.** (1972). *Shear Modulus and Damping in soils: Measurements and Parameter Effects*. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(73\)90212-7](https://doi.org/10.1016/0022-4898(73)90212-7)
- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., & Park, D.** (2016). *“DEEPSOIL 6.1, User Manual.”*
- Hashash, Youssef M.A., & Park, D.** (2001). *Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment*. Engineering Geology. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00061-8)
- Huang, H. C., Shieh, C. S., & Chiu, H. C.** (2001). *Linear and nonlinear behaviors of soft soil layers using Lotung downhole array in Taiwan*. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. [https://doi.org/10.3319/TAO.2001.12.3.503\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2001.12.3.503(T))

- Idriss, I. M.** (1990). *“Response of Soft Soil Sites during Earthquakes.”* Proceedings, Memorial Symposium to Honor Professor Harry Bolton Seed, 273–289.
- Iglesia, G. R., Einstein, H. H., & Whitman, R. V.** (2014). *Investigation of soil arching with centrifuge tests.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000998](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000998)
- Ishibashi, I.** (1992). *Discussion of “effect of soil plasticity on cyclic response” by Vucetic, M. and Dobry, R.* Journal of Geotechnical Engineering, 118(5), 830–832.
- Ishibashi, I., & Zhang, X.** (1993). *Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay.* Soils and Foundations. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.33.182>
- Ishihara, K.** (1996). *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics.* Clerandon Press, Oxford.
- İyisan, R., & Haşal, M. E.** (2011). *Zemin büyümesi ve yerel koşulların spektral ivmeye etkisi.* Itü dergisi, 2011, 47–56.
- İyisan, R., & Haşal, M. E.** (2006). *Farklı Deprem Hareketinin ve Yerel Zemin Sınıfının Dinamik Davranışa Etkisi.* Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Trabzon, 133–142.
- Jeong, S., & Bradley, B. A.** (2017). *Amplification of strong ground motions at Heathcote Valley during the 2010–2011 Canterbury earthquakes: Observation and 1D site response analysis.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.06.004>
- Kaklamanos, J., Baise, L. G., Thompson, E. M., & Dorfmann, L.** (2015). *Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 69, 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.10.016>
- Kale, P., Kılıç, H., & Özyayın, K.** (2008). *Yerel Arazi Etkilerinin Bir ve İki Boyutlu Dinamik Davranış Analizleri ile İncelenmesi-Zeytinburnu Örneği.* Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi, Konya, 153–179.
- Khanbabazadeh, H., Iyisan, R., Ansal, A., & Zulfikar, C.** (2018). *Nonlinear dynamic behavior of the basins with 2D bedrock.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.011>
- Khosravi, A., & McCartney, J. S.** (2012). *Impact of hydraulic hysteresis on the small-strain shear modulus of low plasticity soils.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000713](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000713)
- Kramer, S. L.** (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering.* Prentice-Hall.
- Likitlersuang, S., Teachavorasinskun, S., Surarak, C., Oh, E., & Balasubramaniam, A.** (2013). *Small strain stiffness and stiffness degradation curve of Bangkok Clays.* Soils and Foundations. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.003>

- Livaoğlu, H., Irmak, T. S., & Güven, I. T.** (2019). *Seismic vulnerability indices of ground for Değirmendere (Kocaeli Province, Turkey)*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(1), 507–517. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1102-8>
- Mahmood, K., Iqbal, Q., & Khan, H.** (2019). *One Dimensional Non-Linear Ground Response Analysis-A Site Specific Case Study of Peshawar District , Pakistan*. Technical Journal, University of Engineering and Technology (UET) Taxila, Pakistan, 24(2), 11–18.
- Matasović, N., & Vucetic, M.** (1993). *Cyclic characterization of liquefiable sands*. Journal of Geotechnical Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:11\(1805\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:11(1805))
- Menq, F.-Y.** (2003). *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*. Philosophy.
- Nakamura, Y.** (1997). *Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor*. World Congress on Railway Research.
- Nikitas, G., Arany, L., Aingaran, S., Vimalan, J. N., & Bhattacharya, S.** (2017). *Predicting long term performance of offshore wind turbines using cyclic simple shear apparatus*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.09.010>
- Okur, D. V.** (2002). Farklı Dinamik Gerilme Genlikleri Altında İnce Daneli Zeminlerin Gerilme Şekil Değiştirme ve Mukavemet Davranışları. (Doktora Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Okur, D. V., & Ansal, A.** (2007). *Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.01.005>
- Onur, M. İ.** (2007). *Dinamik Etkiler Altında Zemin Deformasyonunun İncelenmesi* [(Yüksek Lisans Tezi) Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Özaydın, K.** (2011). *Zemin Mekaniği*. Birsan Yayınevi.
- Özkan, Y.** (2017). *Zemin Dinamiğine Giriş*. Nobel.
- Park, D., & Hashash, Y. M. A.** (2004). *Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis*. Journal of Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.1080/13632460409350489>
- PEER.** (2000). *PEER Ground Motion Database*.
- Phillips, C., & Hashash, Y. M. A.** (2009). *Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.01.004>
- Pitilakis, K.** (2004). *Site Effects*. In Atilla Ansal (Ed.), *Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation* (pp. 139–197). Kluwer Academic Publishers.
- Puri, N., Jain, A., Mohanty, P., & Bhattacharya, S.** (2018). *Earthquake Response Analysis of Sites in State of Haryana using DEEPSOIL Software*. Procedia Computer Science. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.047>

- Rampello, S., Viggiani, G. M. B., & Amorosi, A.** (1997). *Small-strain stiffness of reconstituted clay compressed along constant triaxial effective stress ratio paths*. Geotechnique. <https://doi.org/10.1680/geot.1997.47.3.475>
- Rathje, E. M., Kottke, A. R., & Trent, W. L.** (2010). *Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(4), 607–619. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000255](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000255)
- Rizzitano, S., Cascone, E., & Biondi, G.** (2014). *Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.09.003>
- Roblee, C., & Chiou, B.** (2004). *A proposed Geindex model for design selection of non-linear properties for site response analysis*. The International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modelling Dynamic Soil Response.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., & Seed, H. B.** (1972). *Shake-91. In SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*. (Issue December). University of California, Berkeley. <https://nisee.berkeley.edu/elibrary/getpkg?id=SHAKE91>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M.** (1970). *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses* [Report No. EERC 70-10]. December, 41.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., & Tokimatsu, K.** (1986). *Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils*. Journal of Geotechnical Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:11\(1016\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:11(1016))
- Selçuk, M. E., Kiliç, H., & Özaydin, K.** (2007). *Kalın Zemin Çökellerinde Eşdeğer Lineer ve Non-Lineer Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması*. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul, October, 16–20.
- Shylamoni, P., Choudhury, D., Ghosh, S., Ghosh, A. K., & Basu, P. C.** (2014). *Seismic ground response analysis of KK-NPP site in the event of NCO earthquake using DEEPSOIL*. Geotechnical Special Publication. <https://doi.org/10.1061/9780784413272.082>
- Stewart, J. P., Chiou, S. J., Bray, J. D., Graves, R. W., Somerville, P. G., & Abrahamson, N. A.** (2002). *Ground motion evaluation procedures for performance-based design*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00097-0)
- Stokoe, K. H., Darendeli, M. B., Andrus, R. D., & Brown, L. T.** (1999). *Dynamic soil properties: Laboratory, field and correlation studies*. Earthquake Geotechnical Engineering. Proceedings of the 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon, June 1999. (3 Vols.).

- Stokoe, K. H., Hwang, S. K., Lee, N. J., & Andrus, R. D.** (1994). *Effects of various parameters on the stiffness and damping of soils at small to medium strains*. Proc., Int. Symp. Prefailure Deformation Characteristics of Geomaterials, 2, 785–816.
- Subaşı, O., Haşal, M. E., Özaslan, B., & İyisan, R.** (2019). *Seismic microzonation of bursa/güzelyalı in turkey: A study on the compatibility of 1d dynamic analysis and microtremor measurements*. Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions- Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2019, 5120–5127.
- Subaşı, O., Haşal, M. E., Özaslan, B., İyisan, R., YAMANAKA, H., & Chimoto, K.** (2017). *Bir Boyutlu Dinamik Analiz ve Mikrotremor Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması*. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul, 655–666.
- Sun, J. I., Goleorkhi, R., & Seed, H. B.** (1988). *Dynamic moduli and damping ratios for a soft clay*. In Journal of Terramechanics (Vol. 9, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(72\)90024-9](https://doi.org/10.1016/0022-4898(72)90024-9)
- TBDY.** (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Resmi Gazete.
- Ulaş, K.** (2019). *Ankara çevresi için Arias şiddetinin incelenmesi*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(6), 768–774. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.07992>
- Vucetic, M., & Dobry, R.** (1991). *Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response*. Journal of Geotechnical Engineering, 117(1), 89–107.
- Yoshida, N.** (2015). *Seismic ground response analysis*. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>
- Yu, S., & Shan, Y.** (2017). *Experimental Comparison and Study on Small-Strain Damping of Remolded Saturated Soft Clay*. Geotechnical and Geological Engineering. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0244-6>
- Zhang, J., Andrus, R. D., & Juang, C. H.** (2005). *Normalized shear modulus and material damping ratio relationships*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:4\(453\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:4(453))

EKLER

EK A: 15 Deprem İvme Kaydı İle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

EK B: Alt Tabakalara Ayrılarak Gerçekleştirilen Eşdeğer Doğrusal Analiz Sonuçları

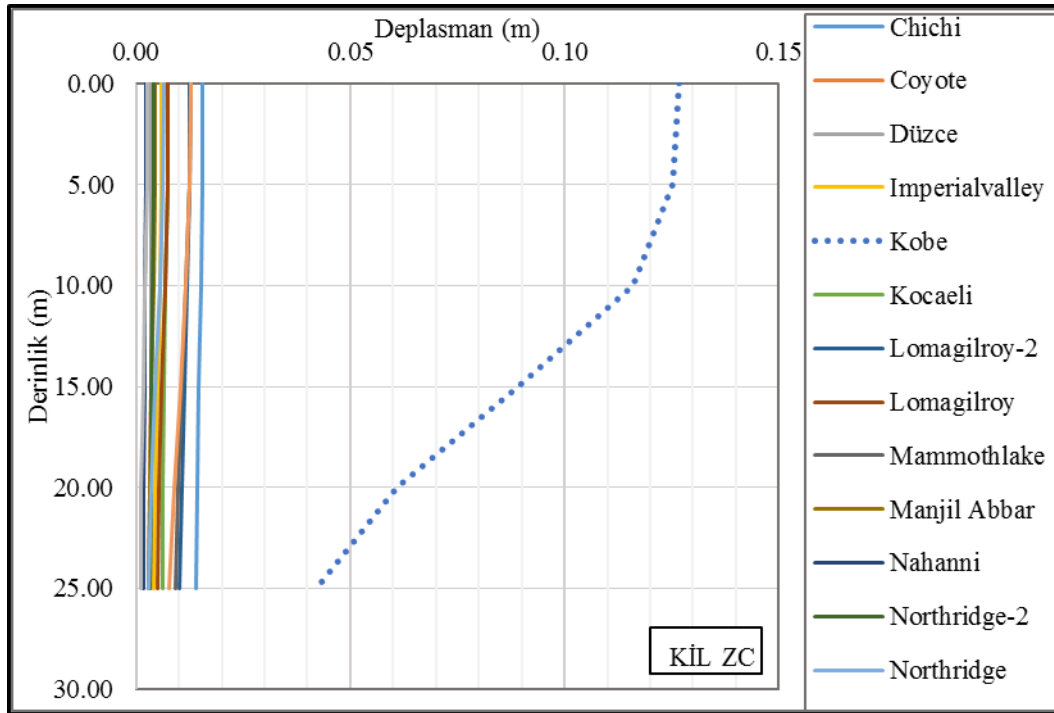
EK C: 16 Zemin Modeli İçin Eşdeğer Doğrusal Analiz Sonuçları

EK D: 17 Zemin Modeli İçin Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

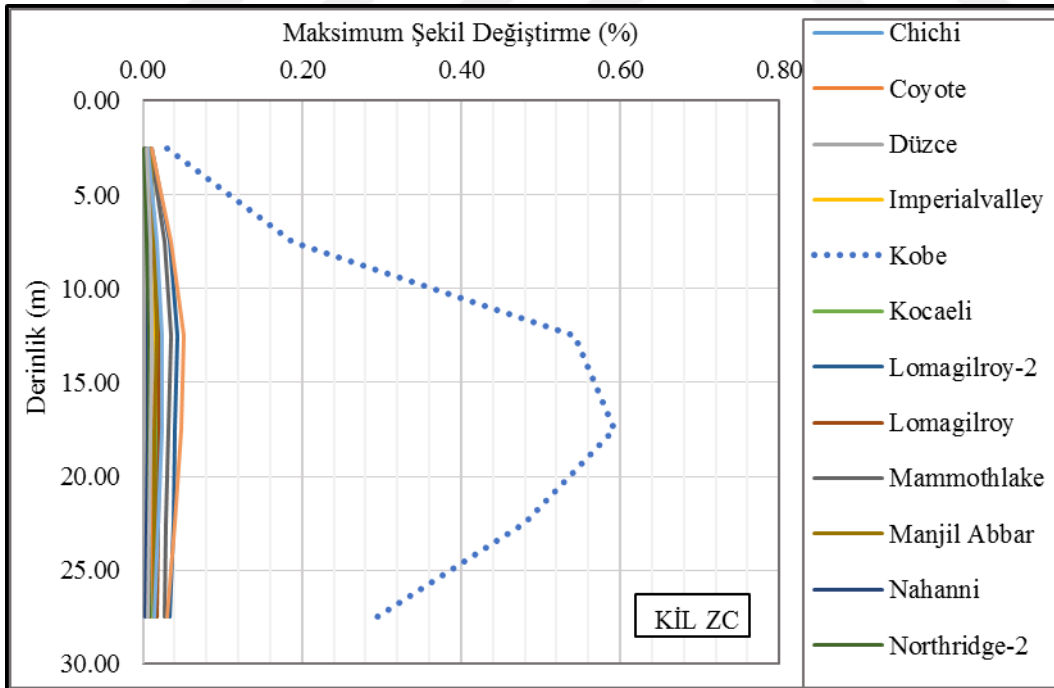
EK E: Analiz Sonuçları İle TBDY Tasarım Spektrumlarının Karşılaştırılması



EK A

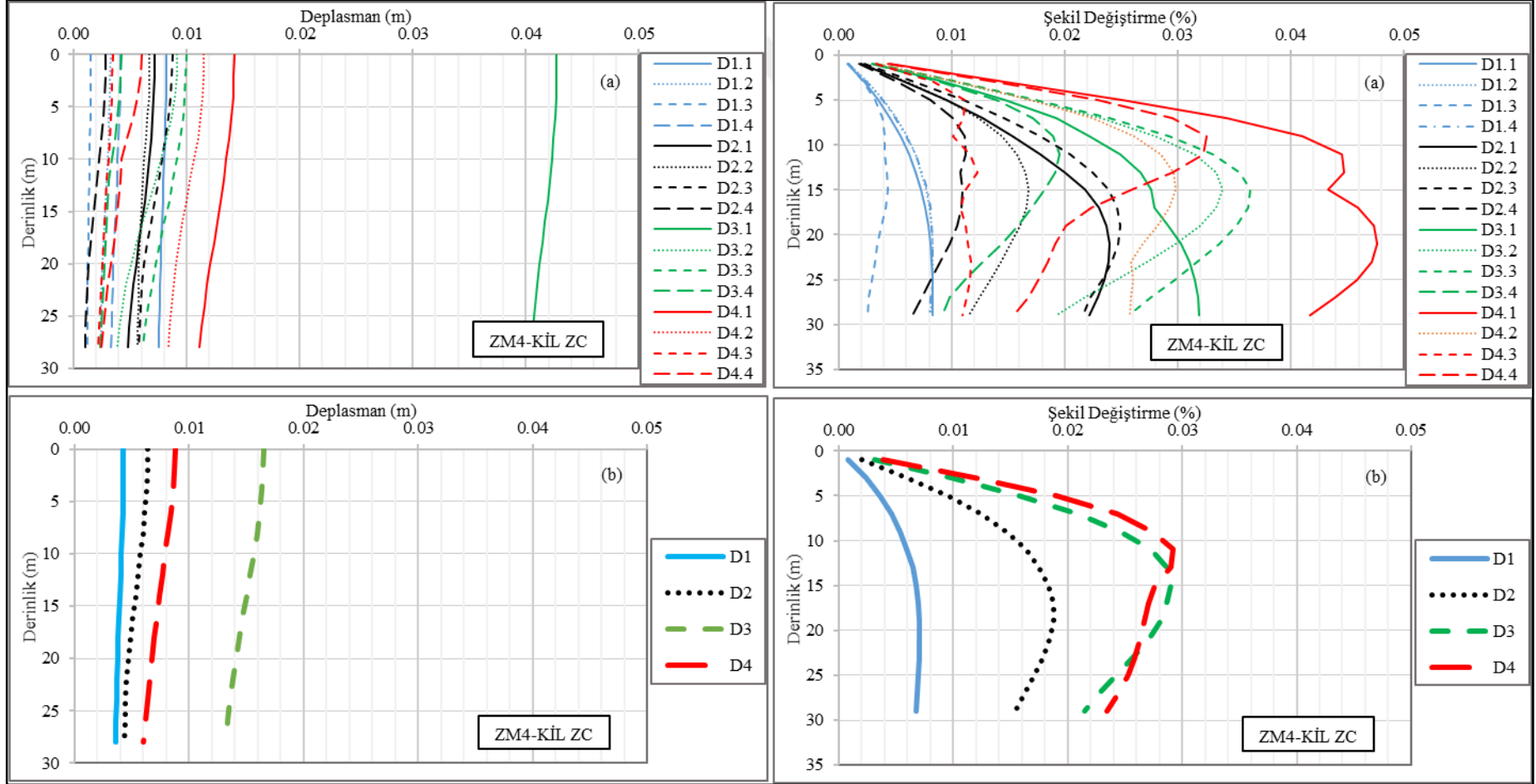


Şekil A.1 : 15 deprem ivme kaydı ile yapılan analizlere göre deplasman-derinlik grafiği.

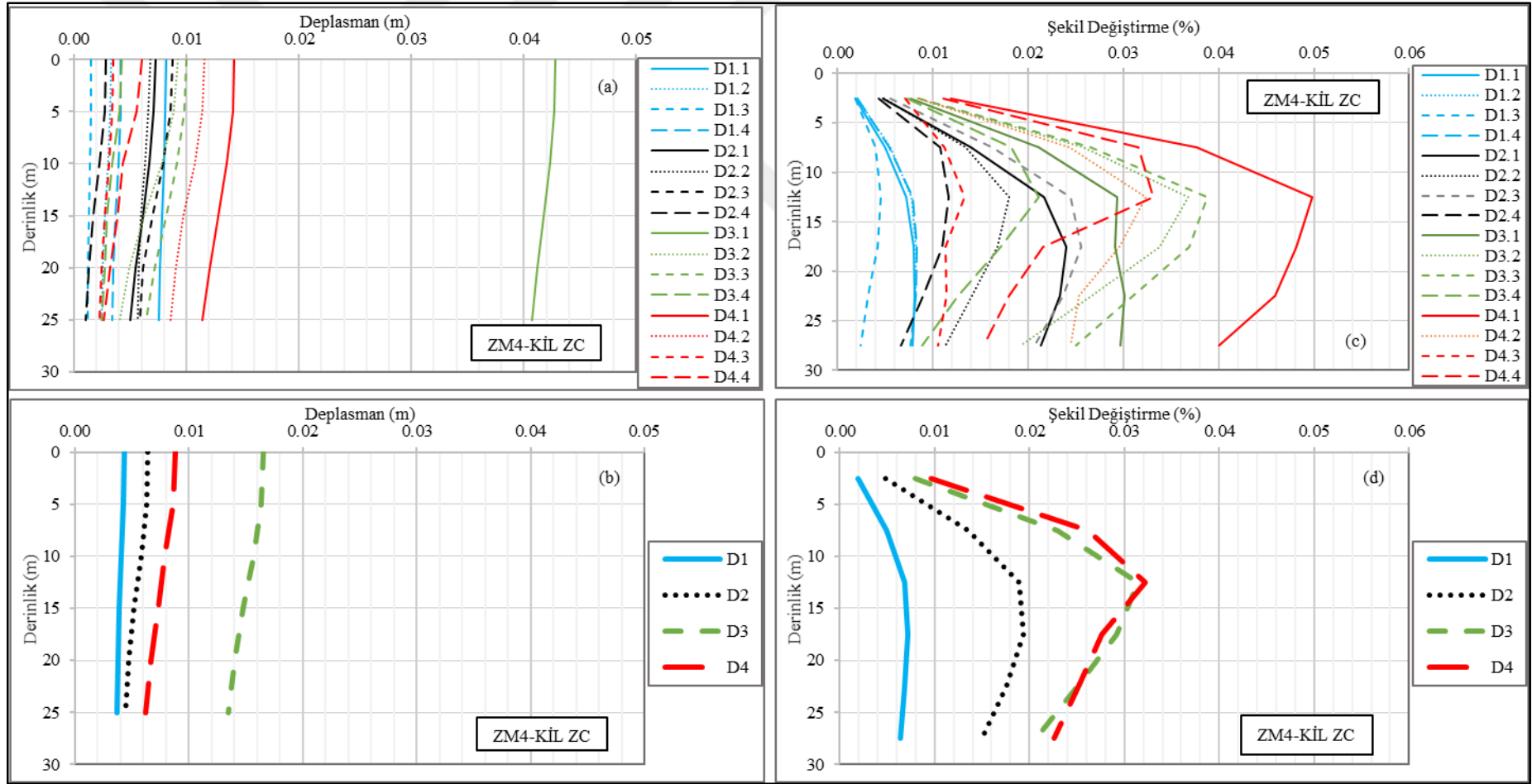


Şekil A.2 : 15 deprem ivme kaydı ile yapılan analizlere göre şekil değiştirme-derinlik grafiği.

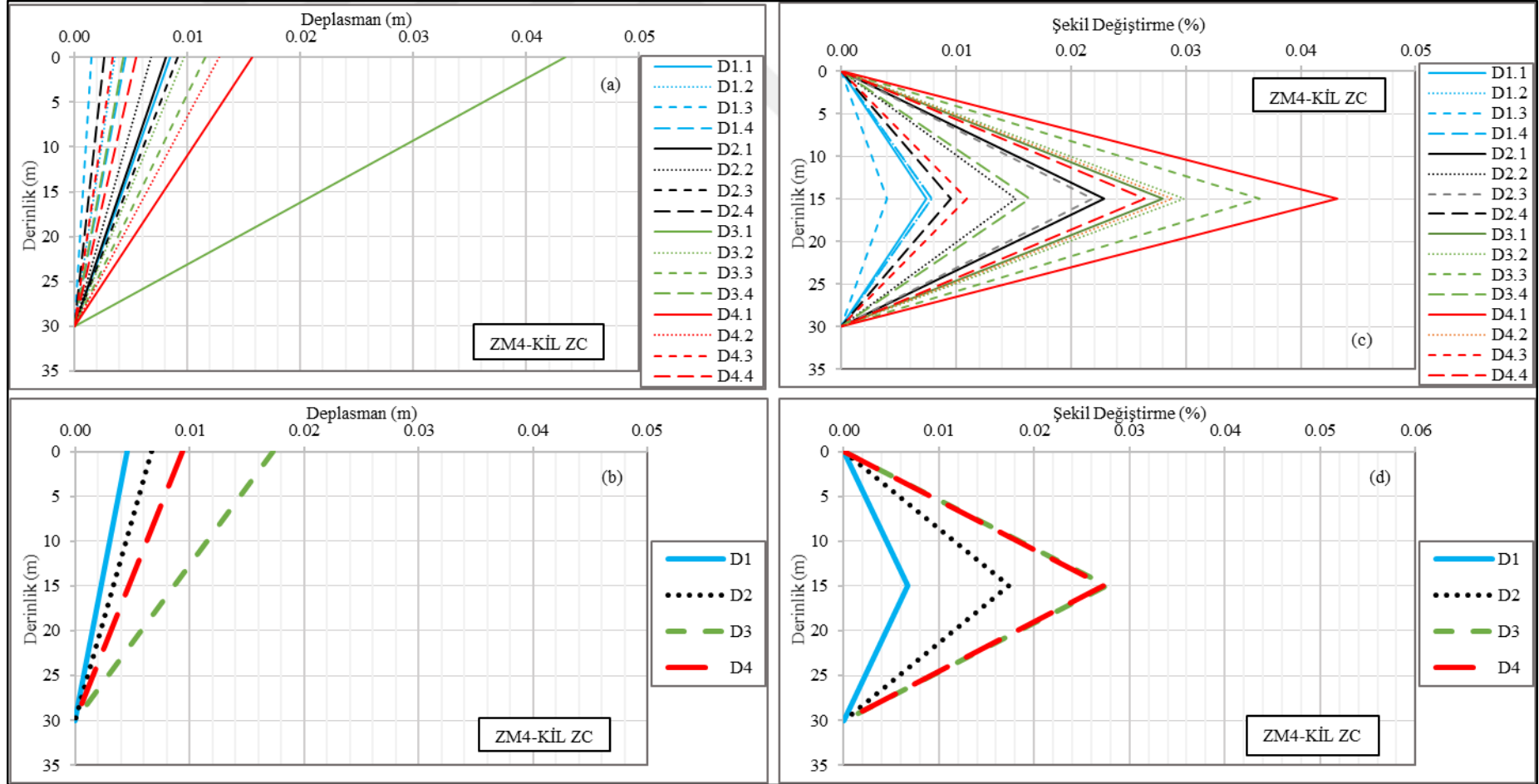
EK B



Şekil B.1 : ZM4 ile 2 m kalınlığında alt tabakalar kullanarak yapılan eşdeğer doğrusal analize ait sonuçlar.

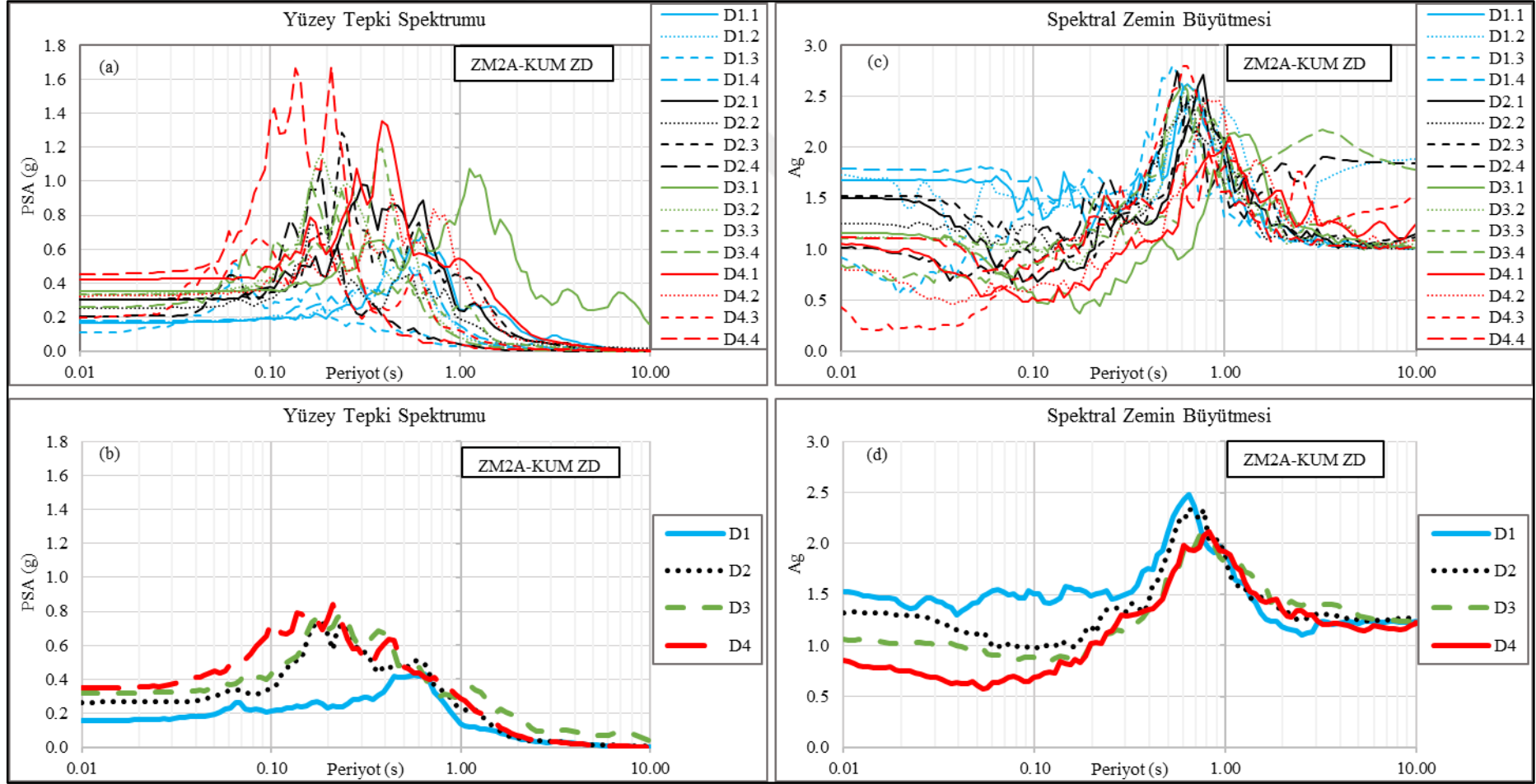


Şekil B.2 : ZM4 ile 5 m kalınlığında alt tabakalar kullanarak eşdeğer doğrusal analize ait sonuçlar.

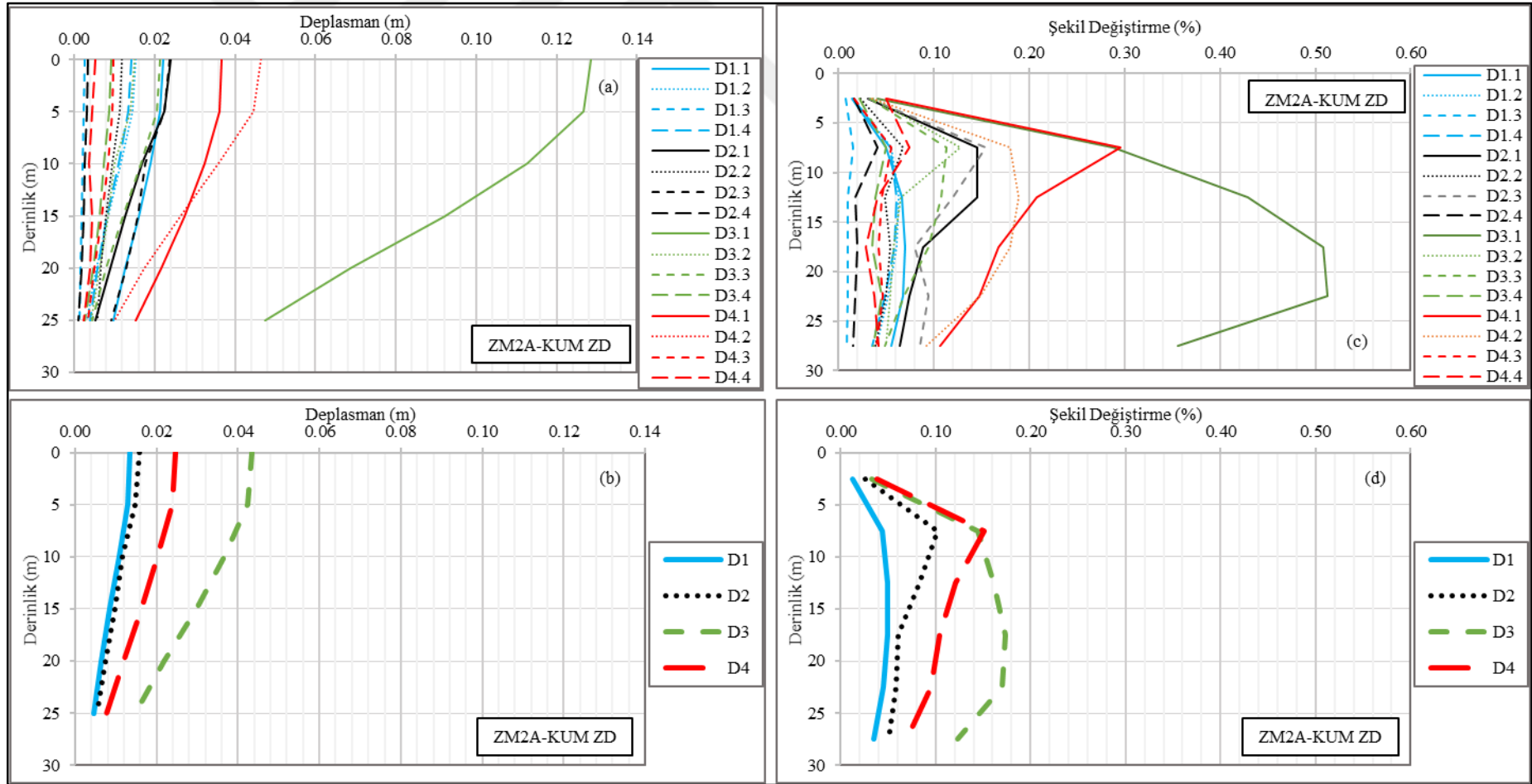


Şekil B.3 : ZM4 ile tek tabaka halinde yapılan eşdeğer doğrusal analize ait sonuçlar.

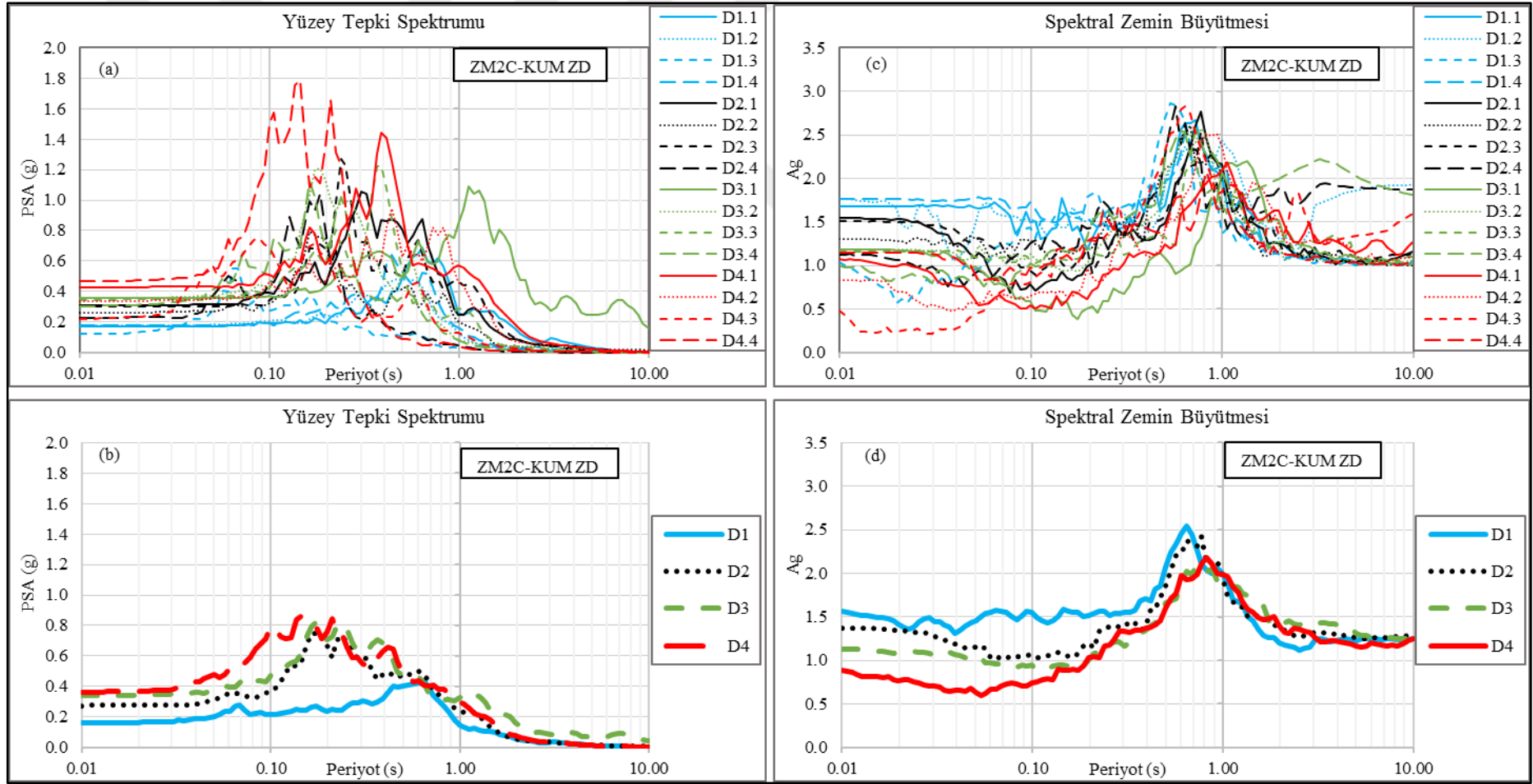
EK C



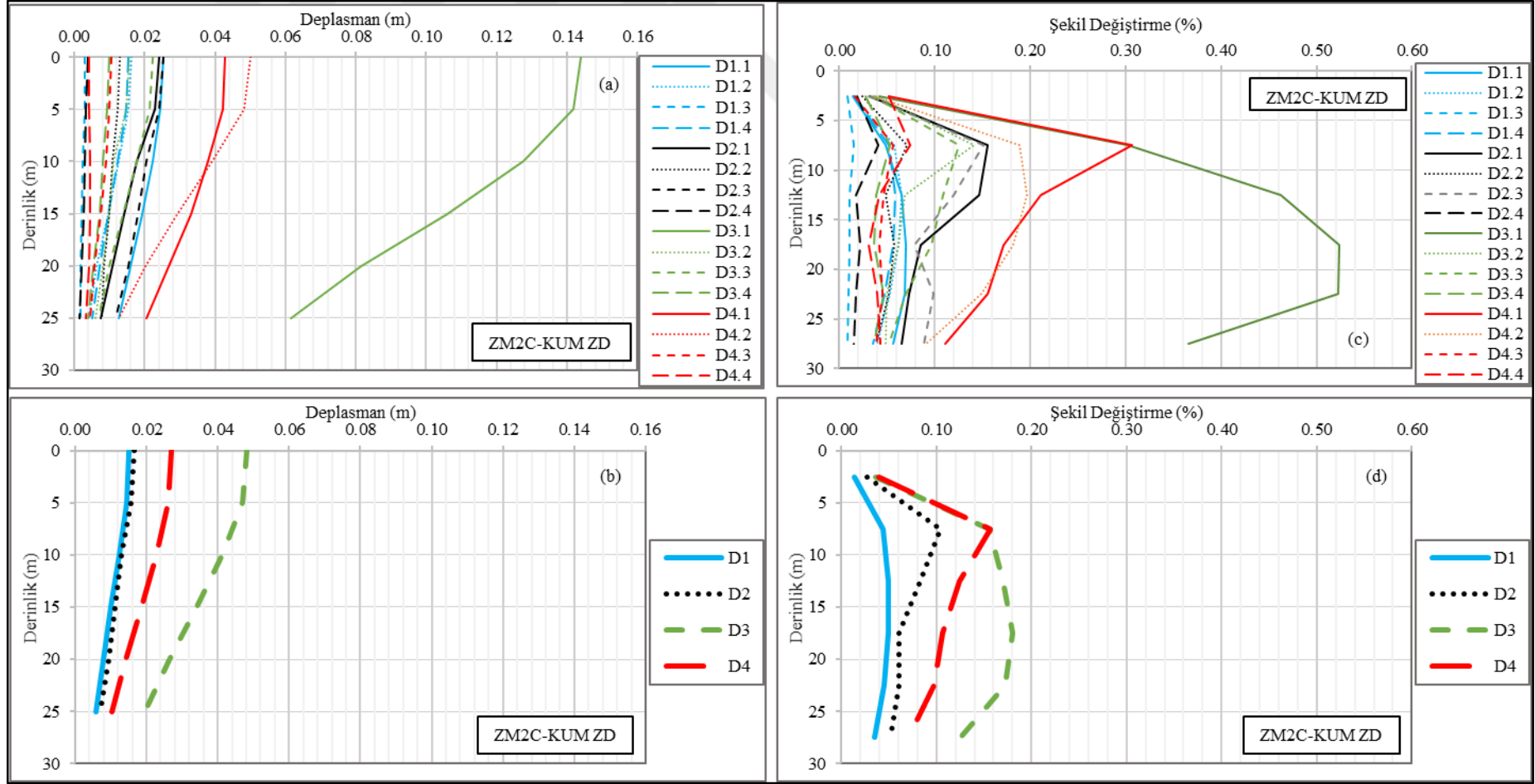
Şekil C.1 : ZM2A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



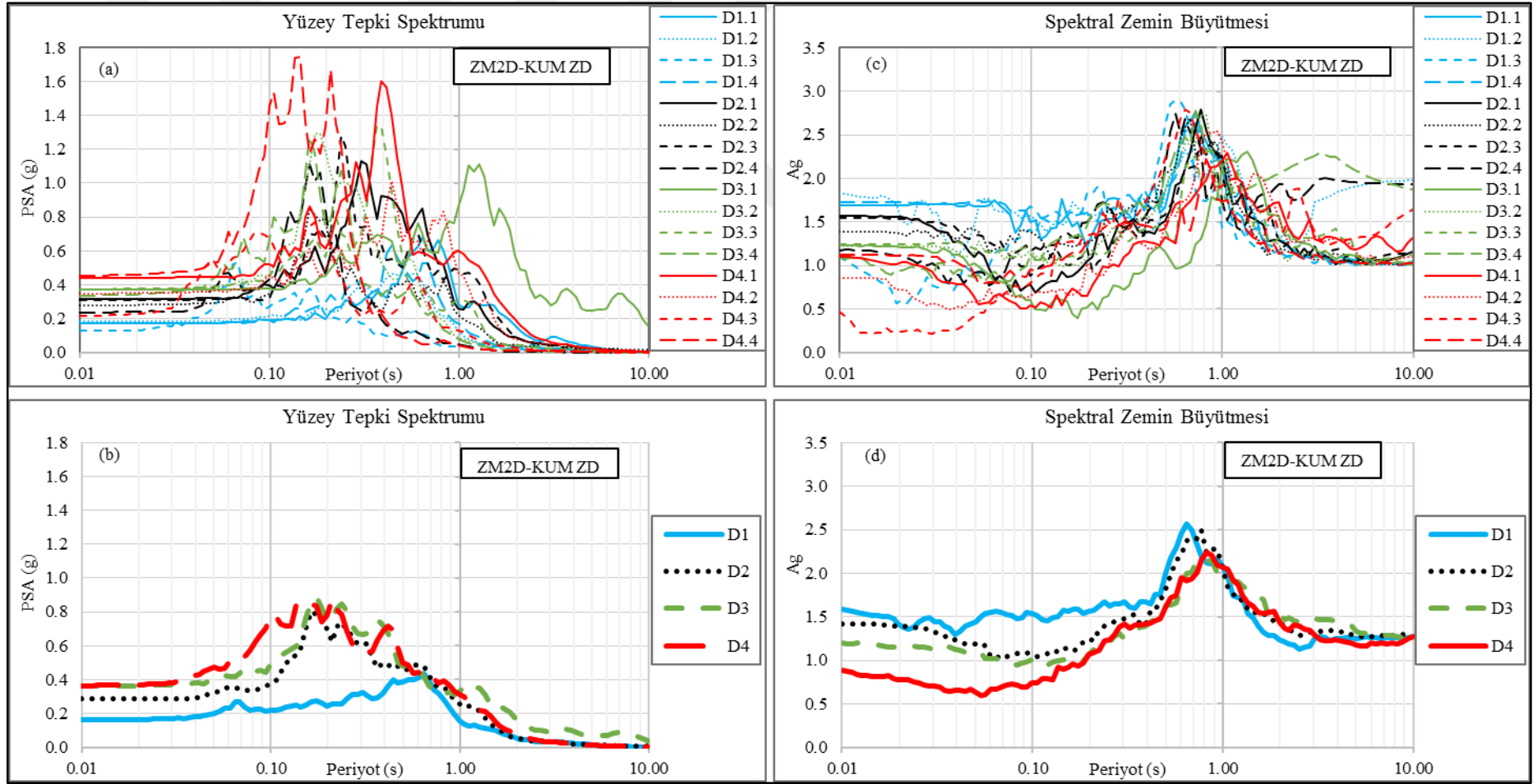
Şekil C.1 (devam) : ZM2A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



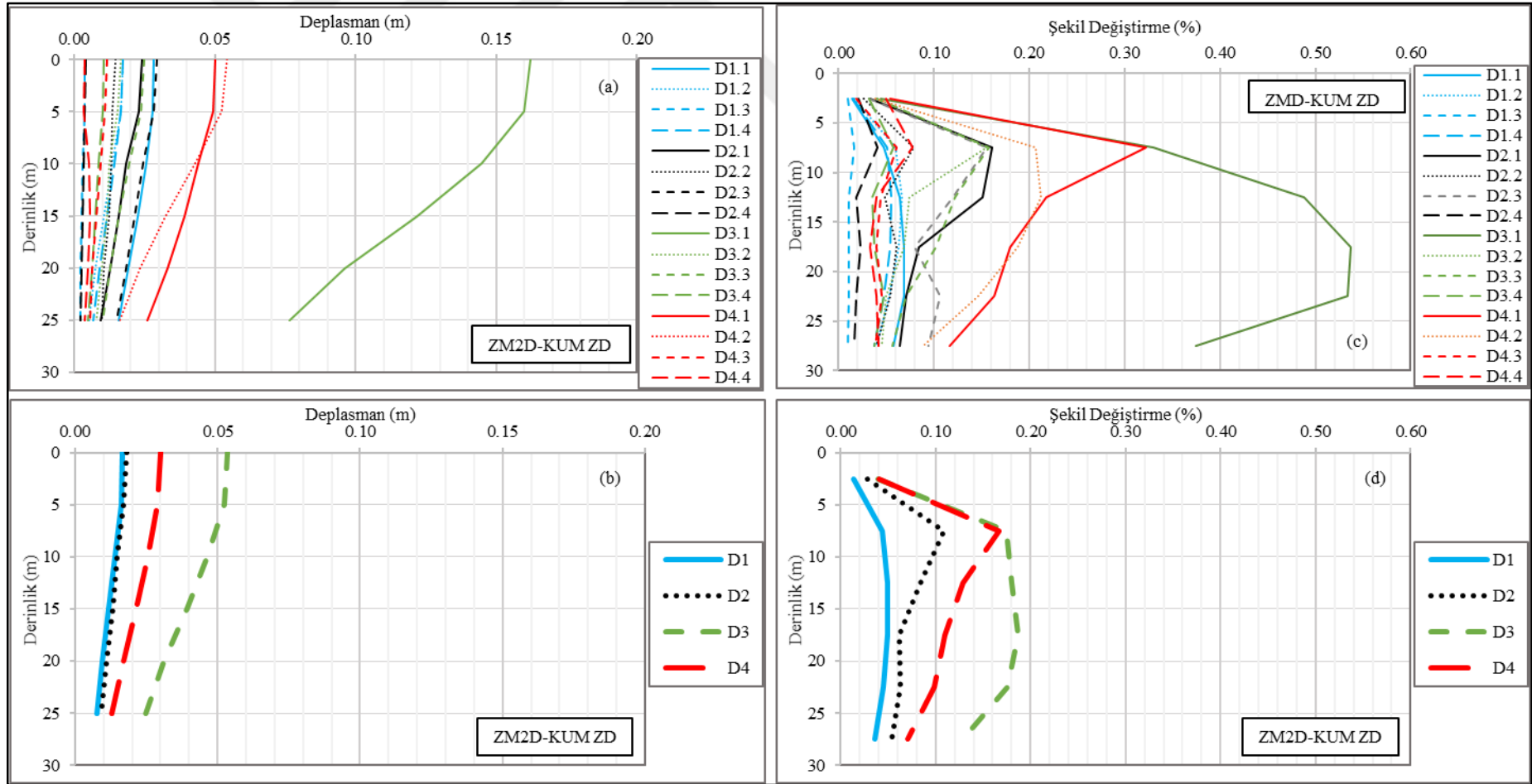
Şekil C.2 : ZM2C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



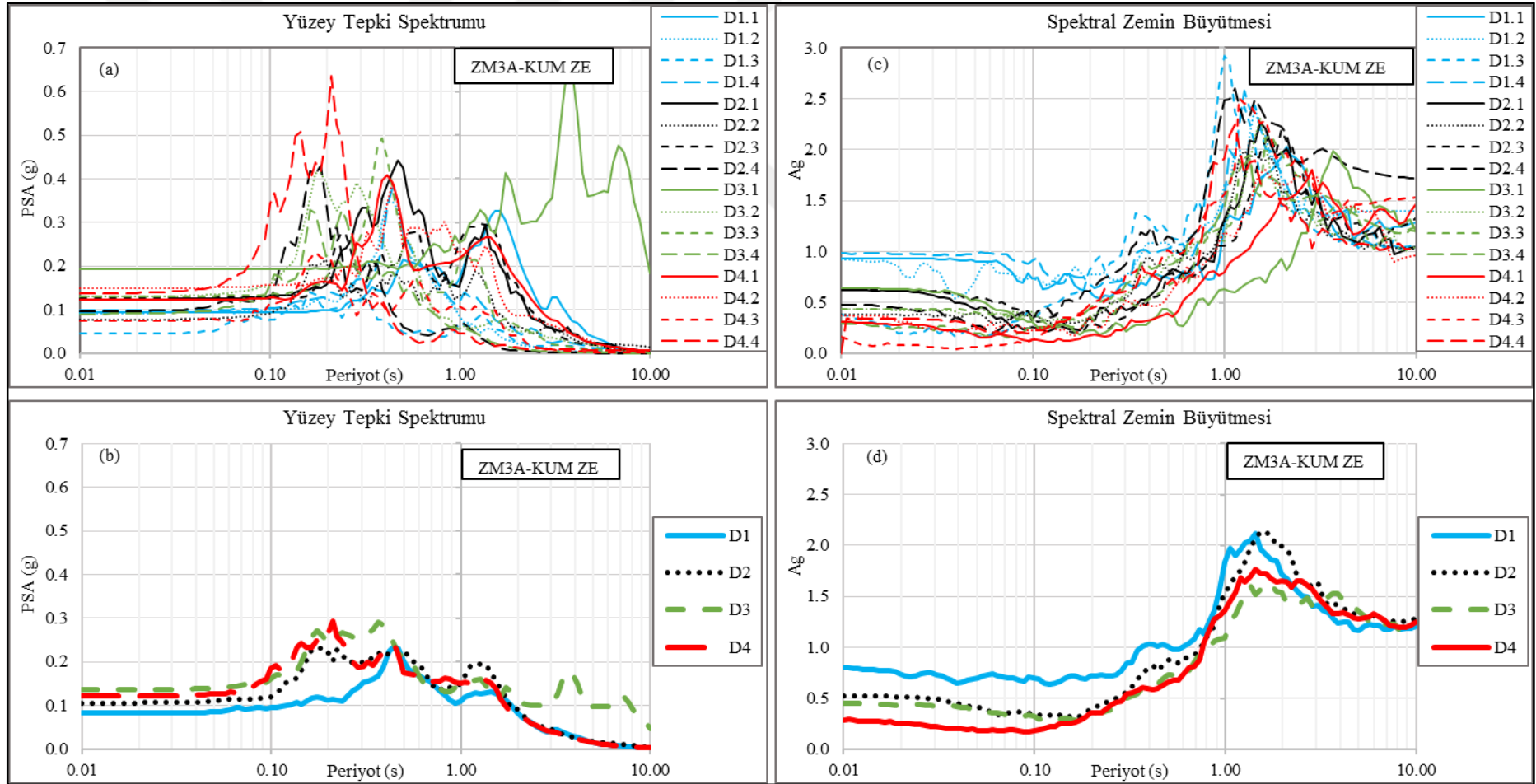
Şekil C.2 (devam) : ZM2C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



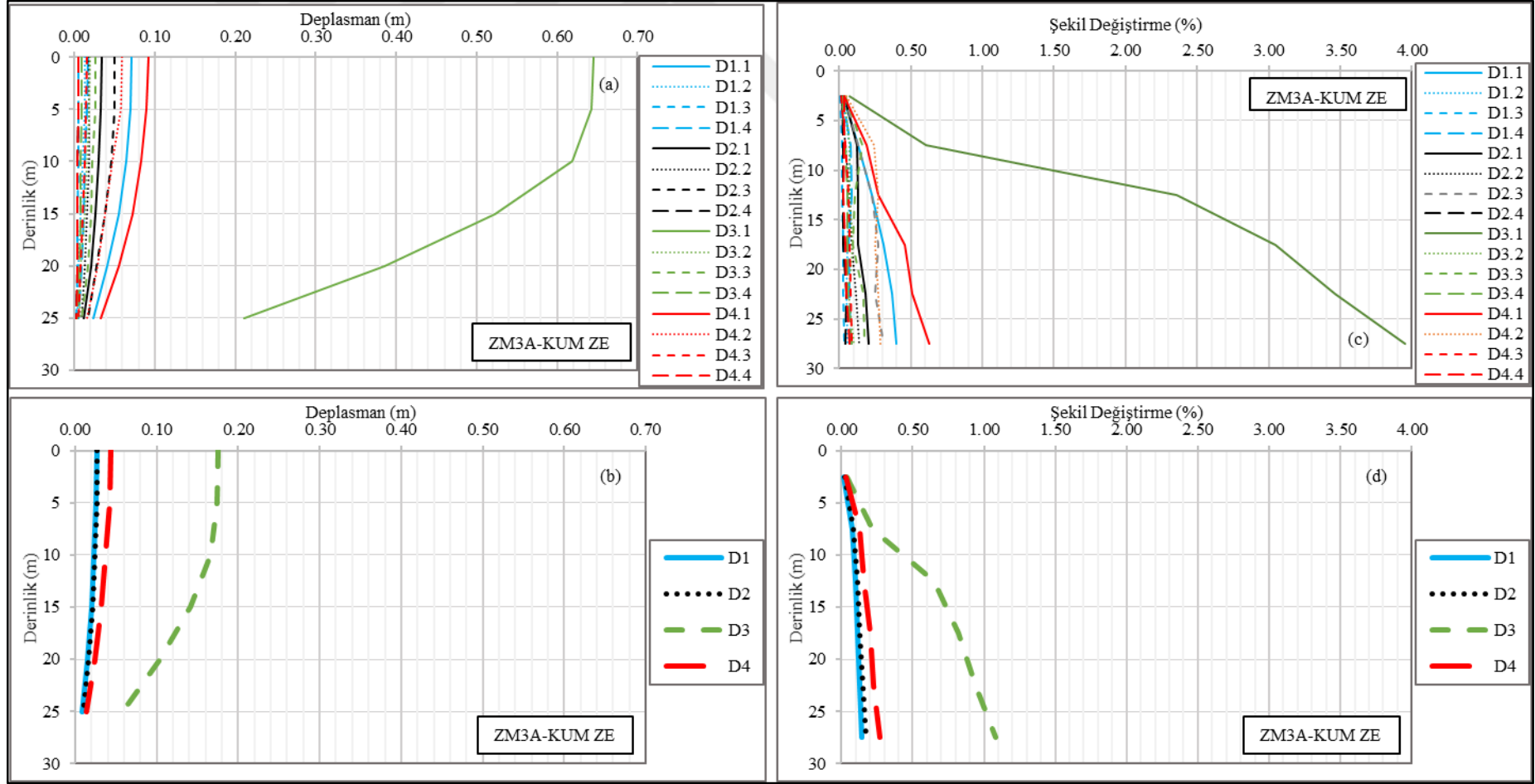
Şekil C.3 : ZM2D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



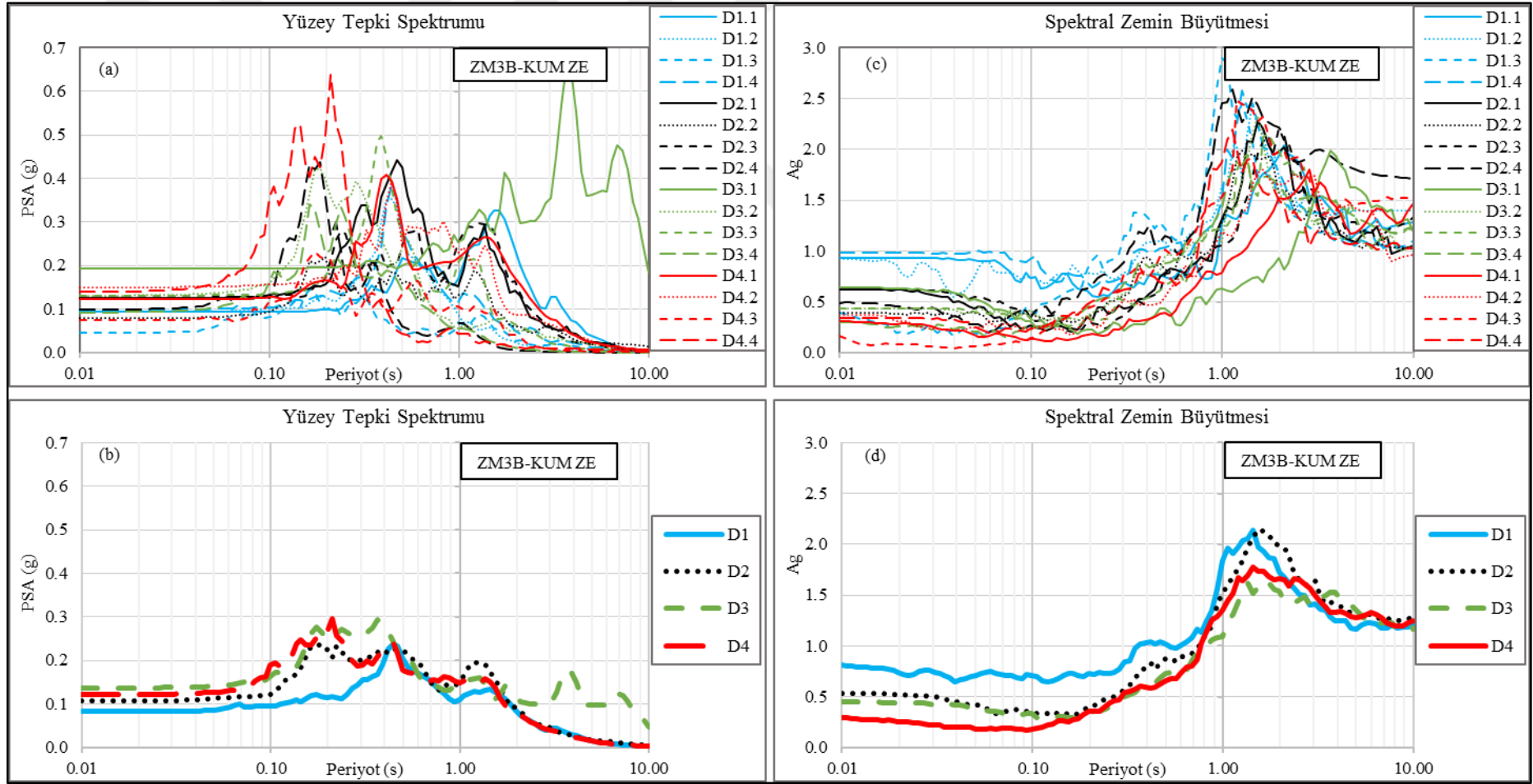
Şekil C.3 (devam) : ZM2D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



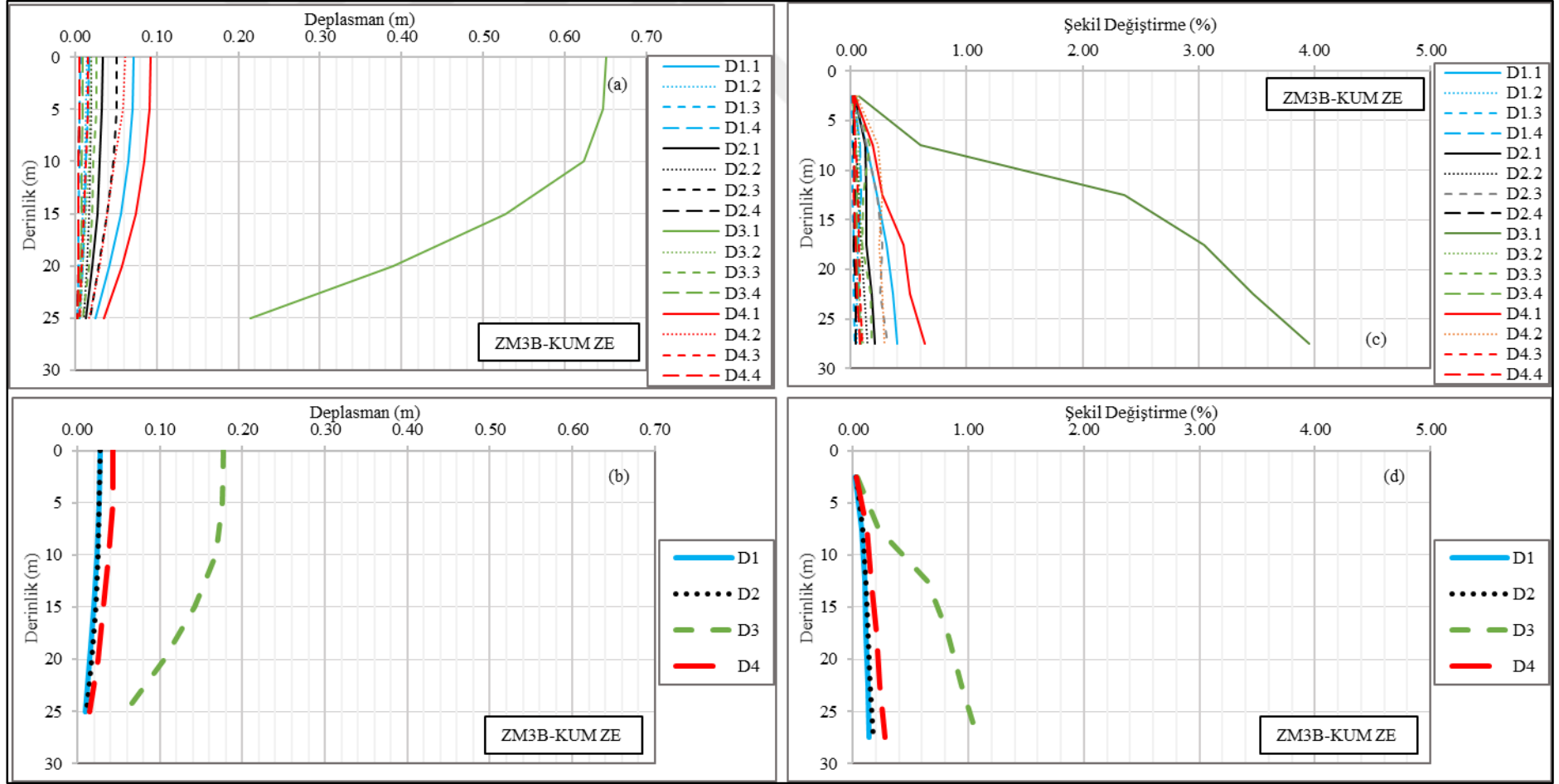
Şekil C.4 : ZM3A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



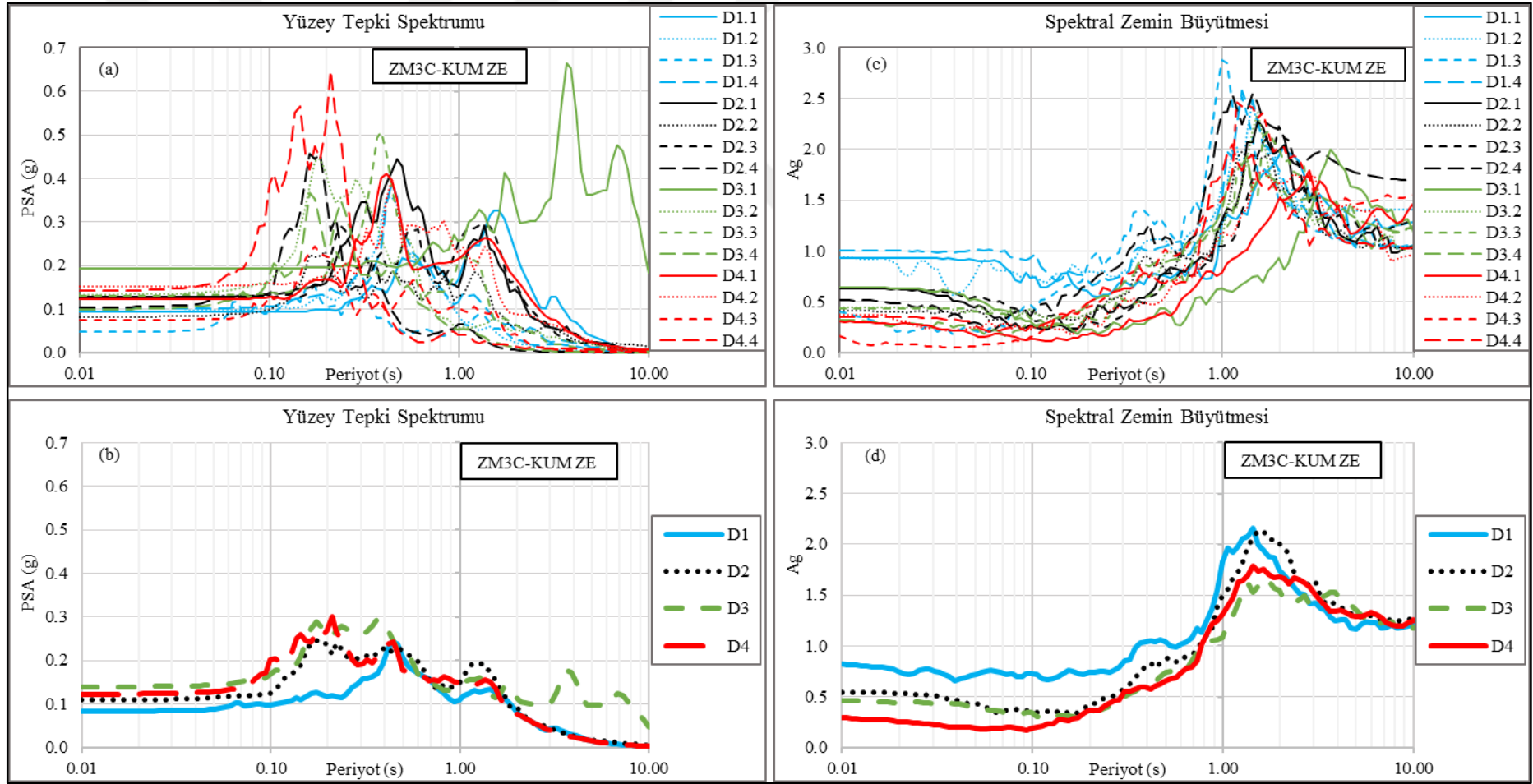
Şekil C.4 (devam) : ZM3A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



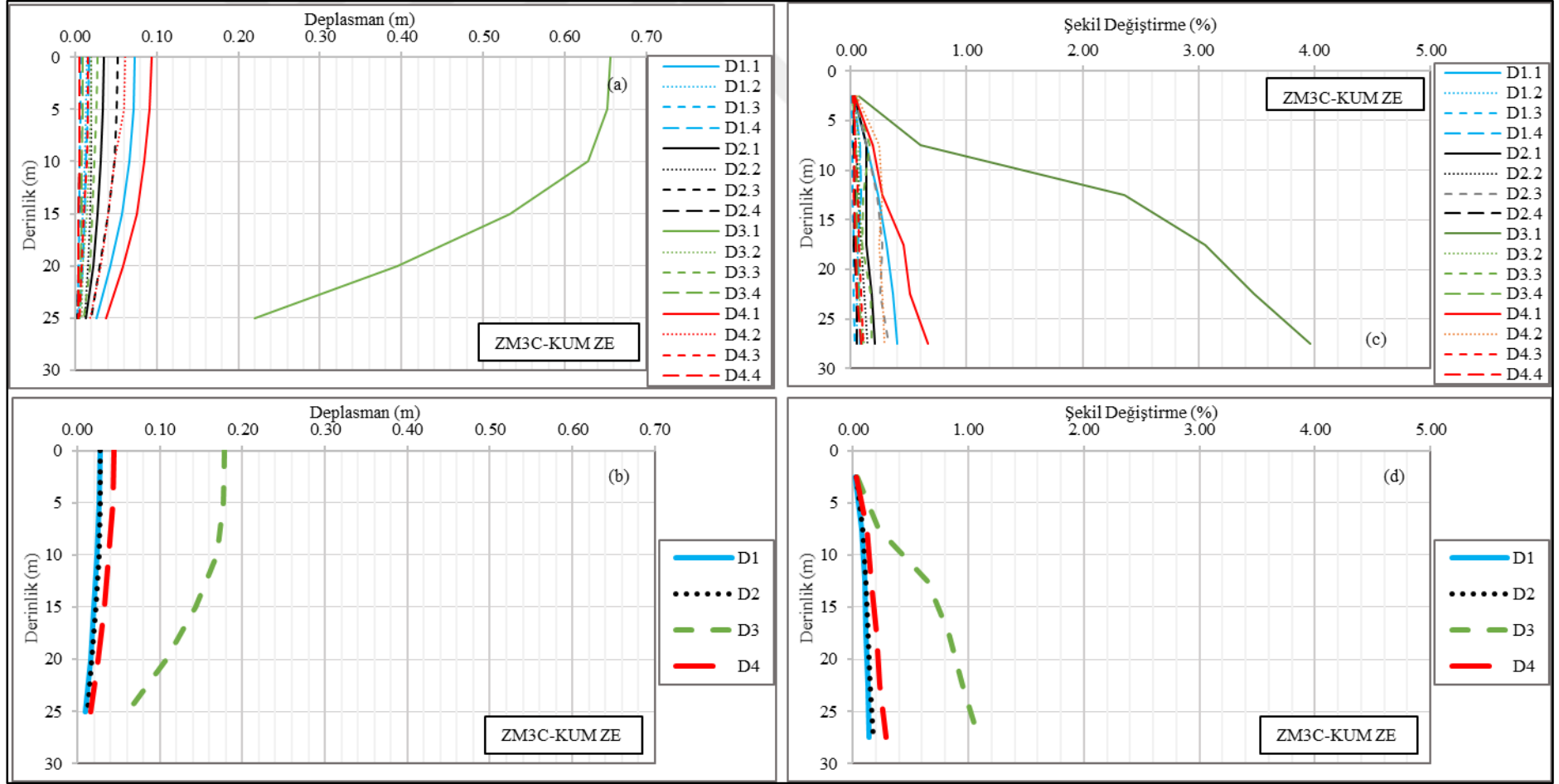
Şekil C.5 : ZM3B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



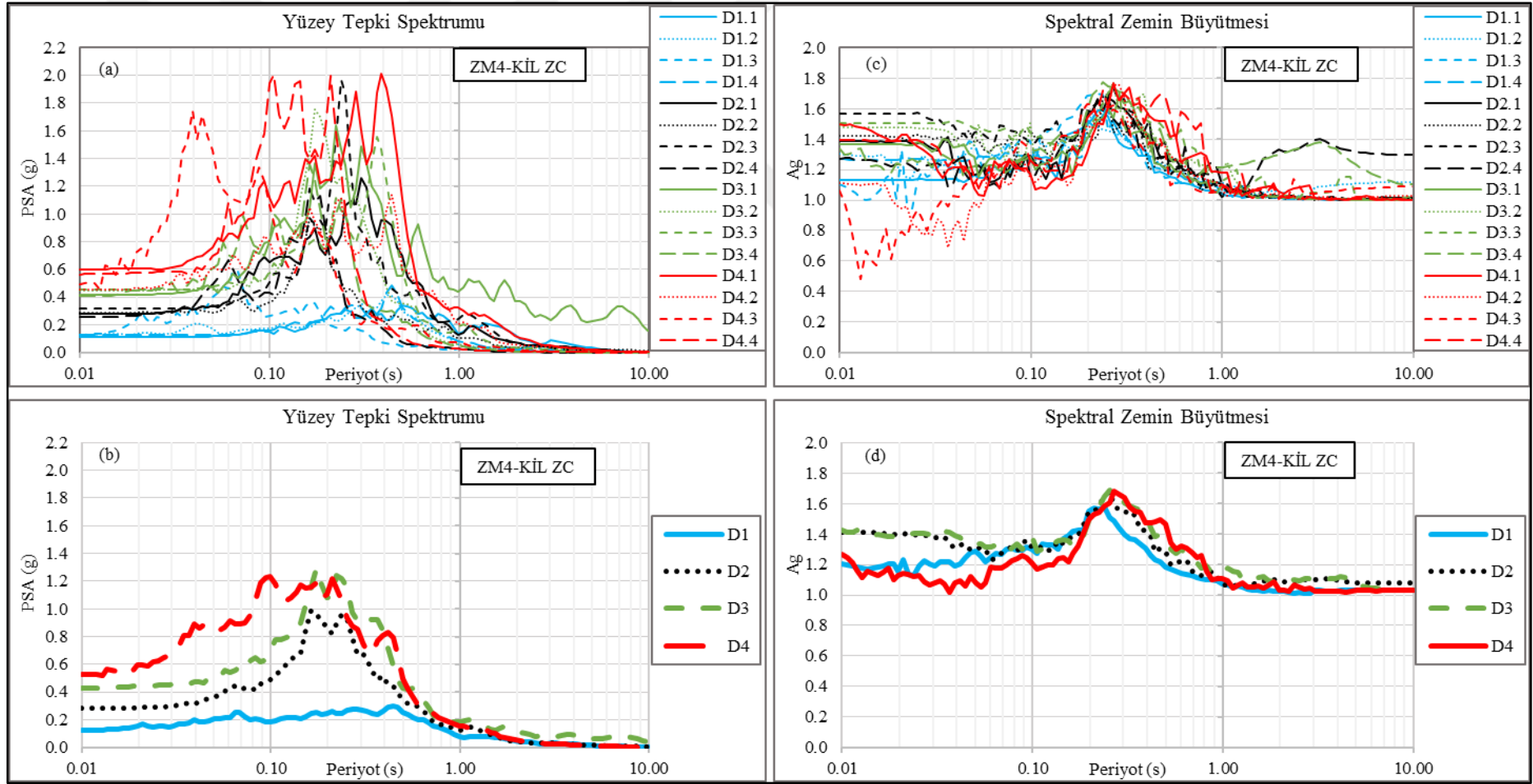
Şekil C.5 (devam) : ZM3B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



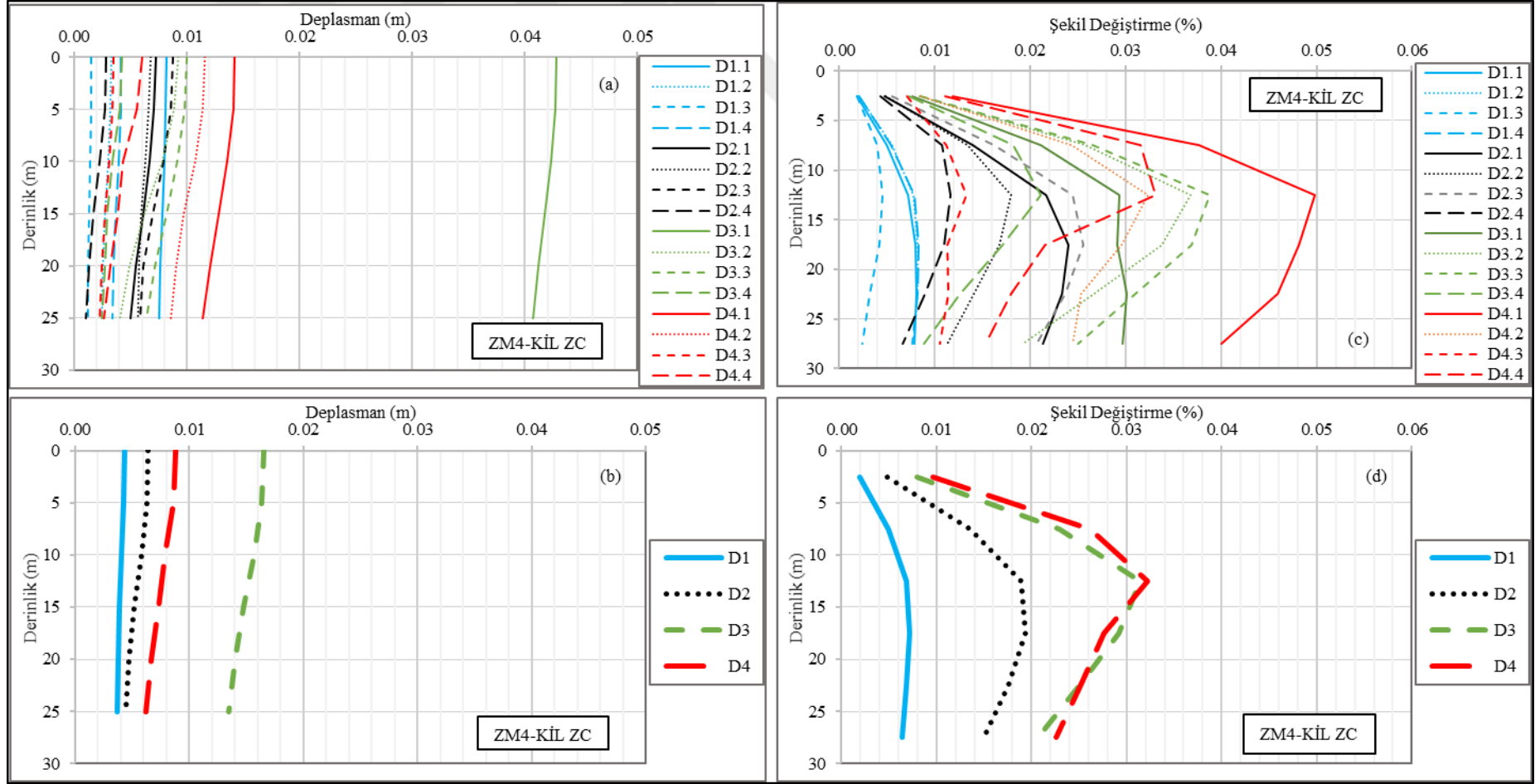
Şekil C.6 : ZM3C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



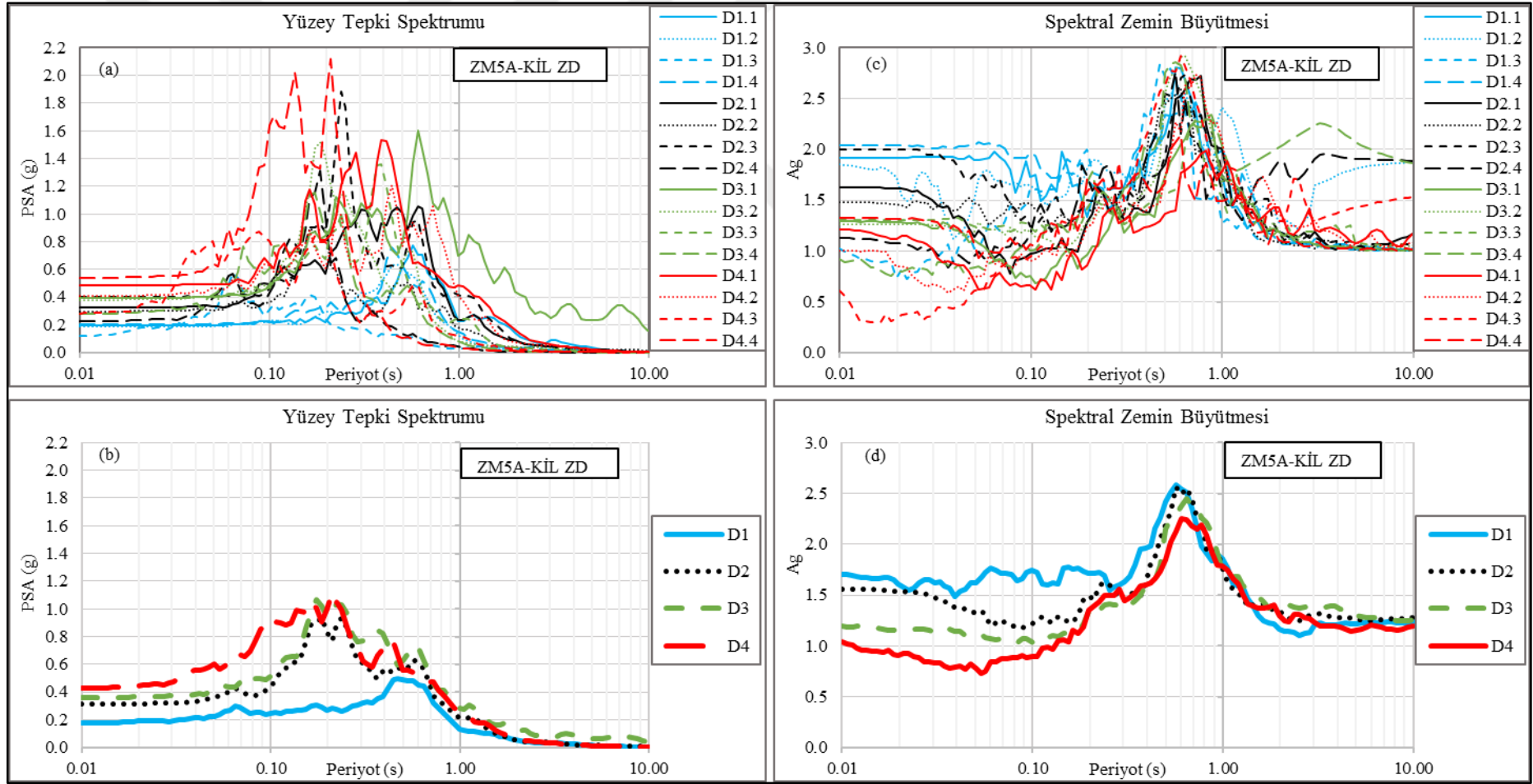
Şekil C.6 (devam) : ZM3C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



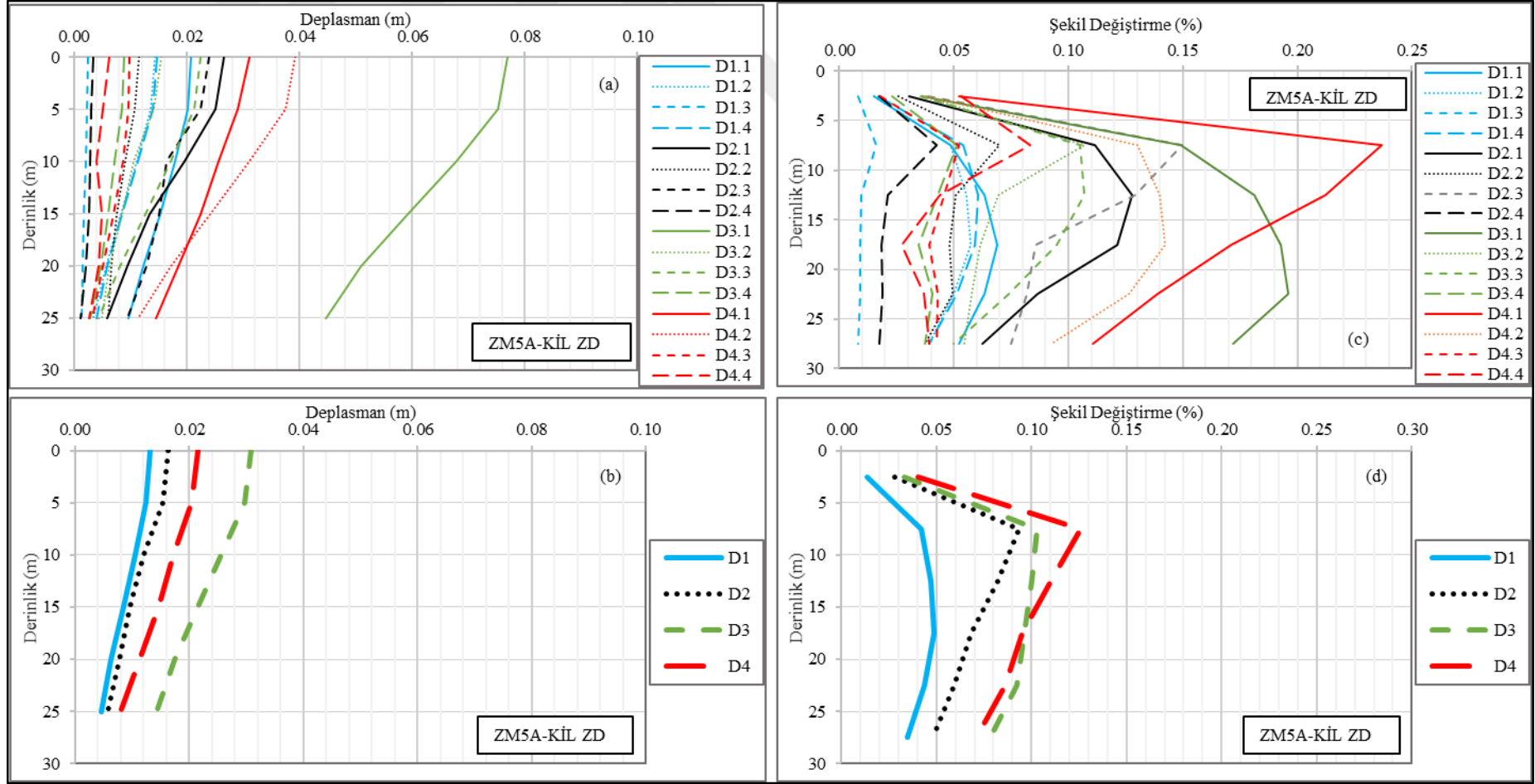
Şekil C.7 : ZM4 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



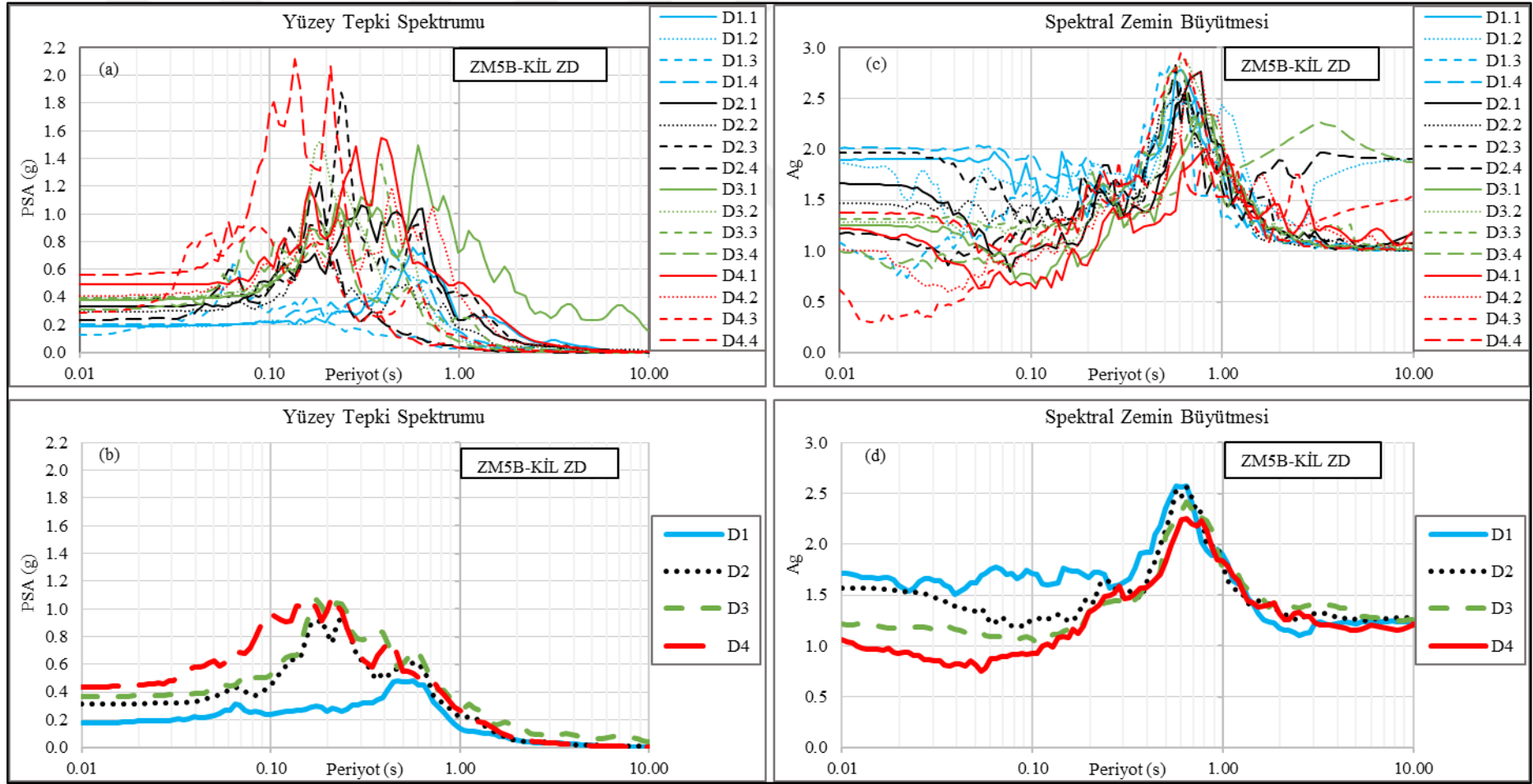
Şekil C.7 (devam) : ZM4 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



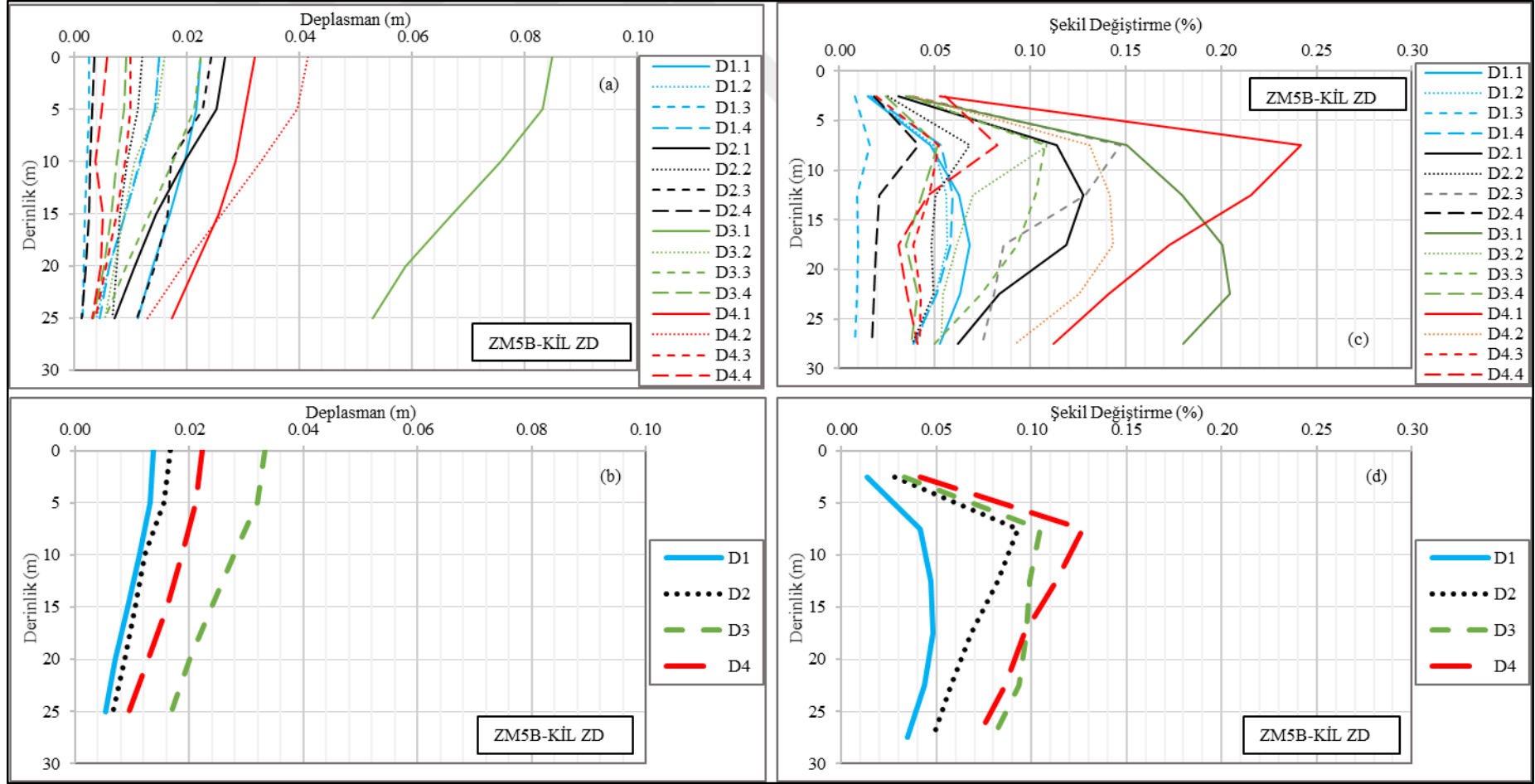
Şekil C.8 : ZM5A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



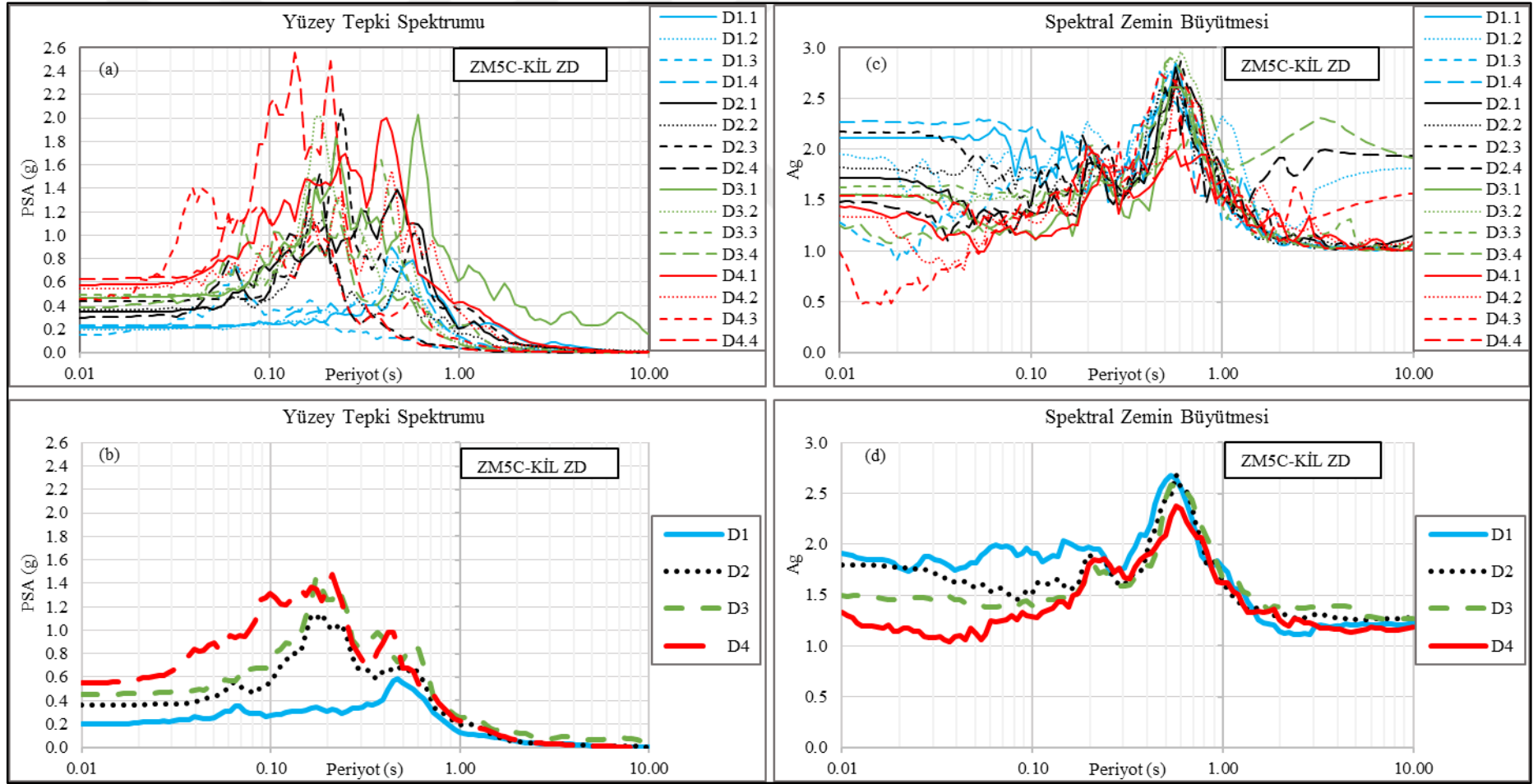
Şekil C.8 (devam) : ZM5A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



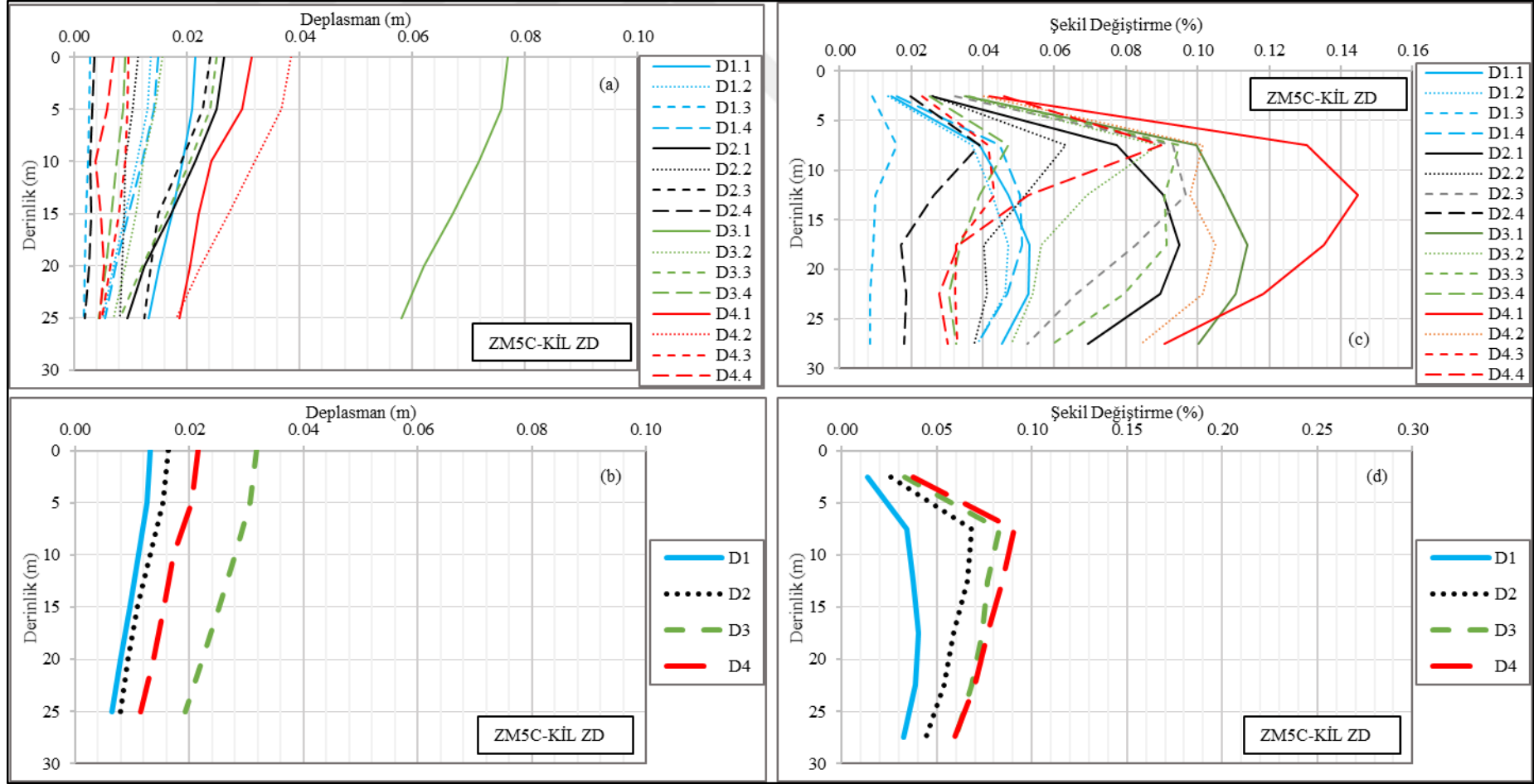
Şekil C.9 : ZM5B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



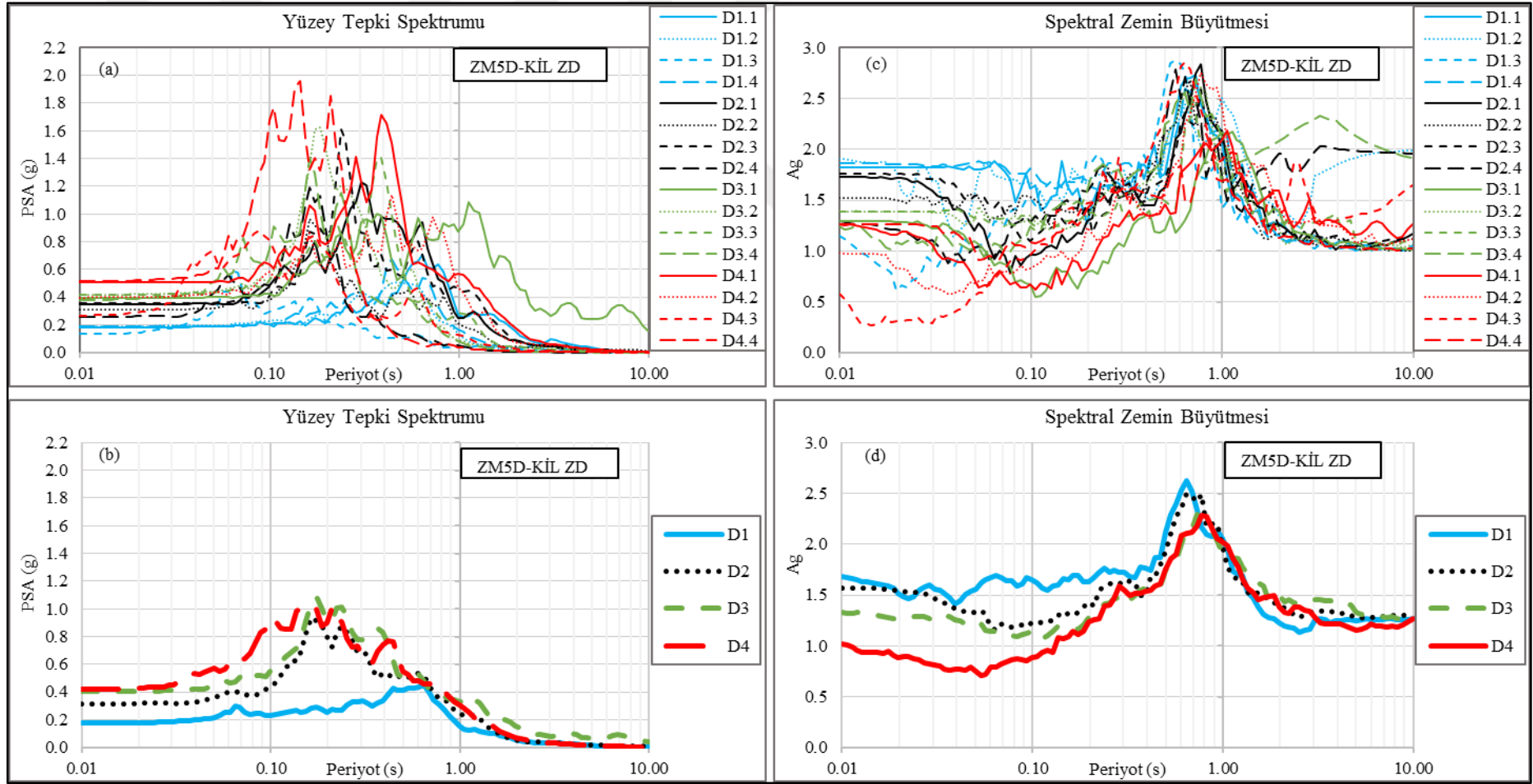
Şekil C.9 (devam) : ZM5B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



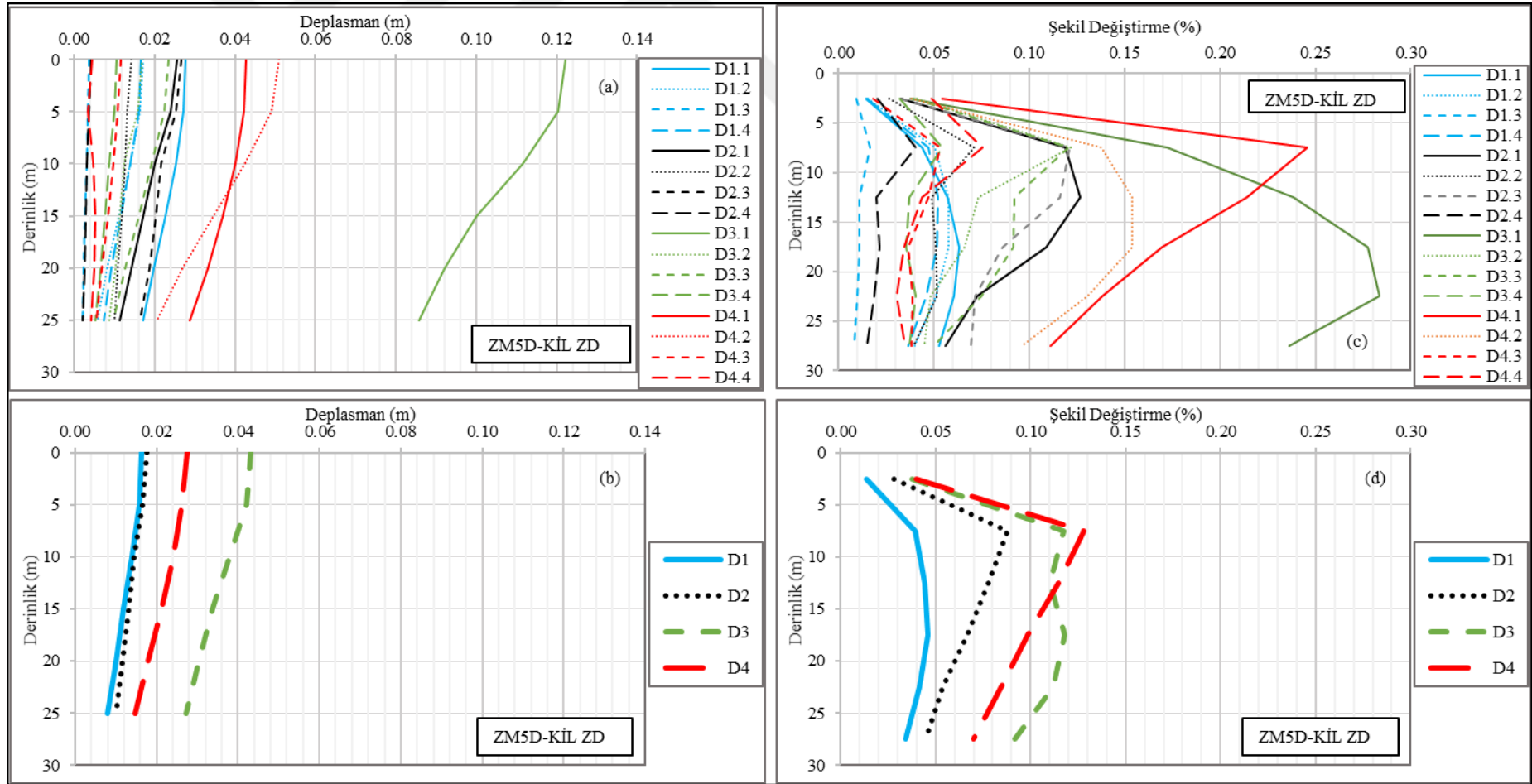
Şekil C.10 : ZM5C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



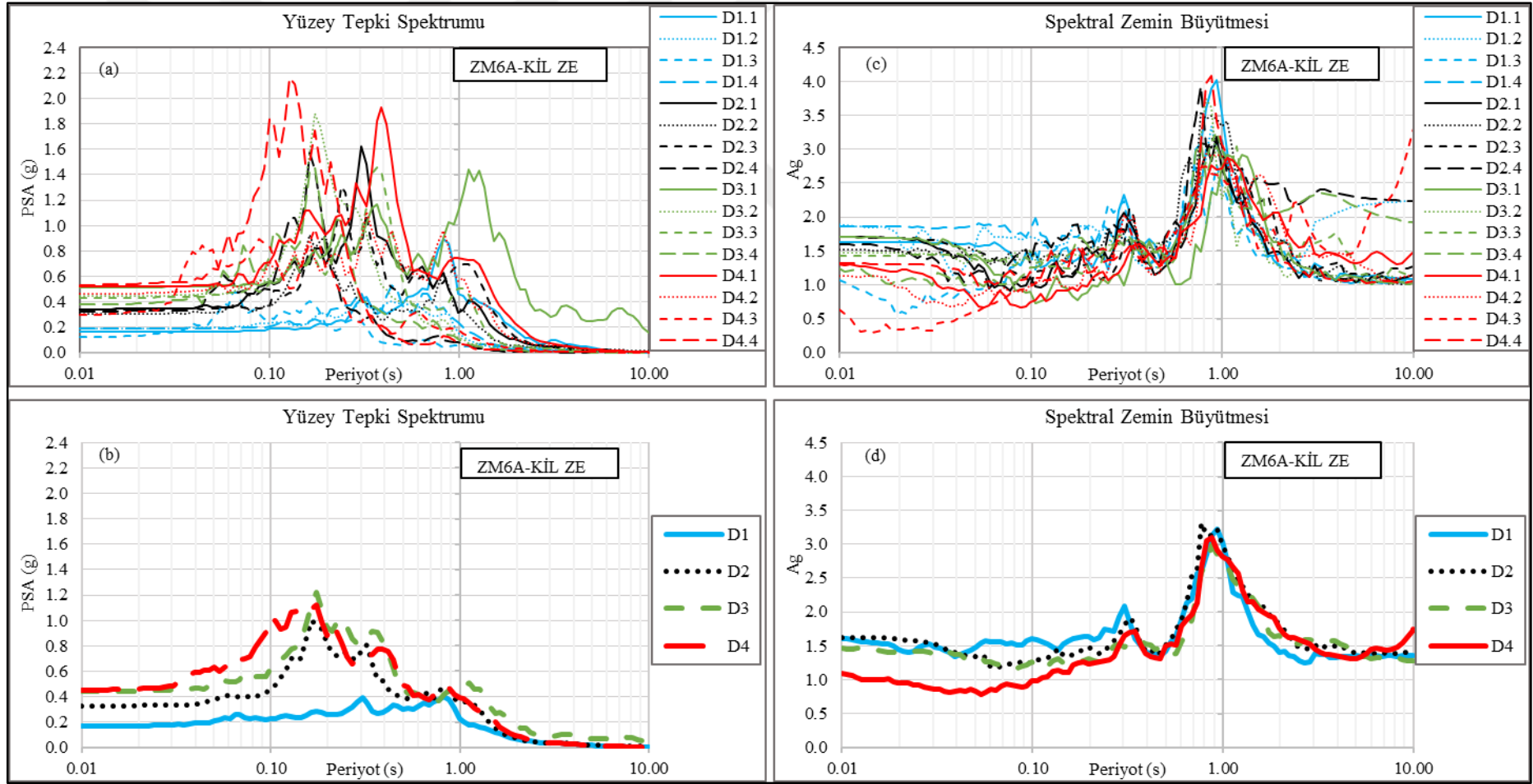
Şekil C.10 (devam) : ZM5C ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



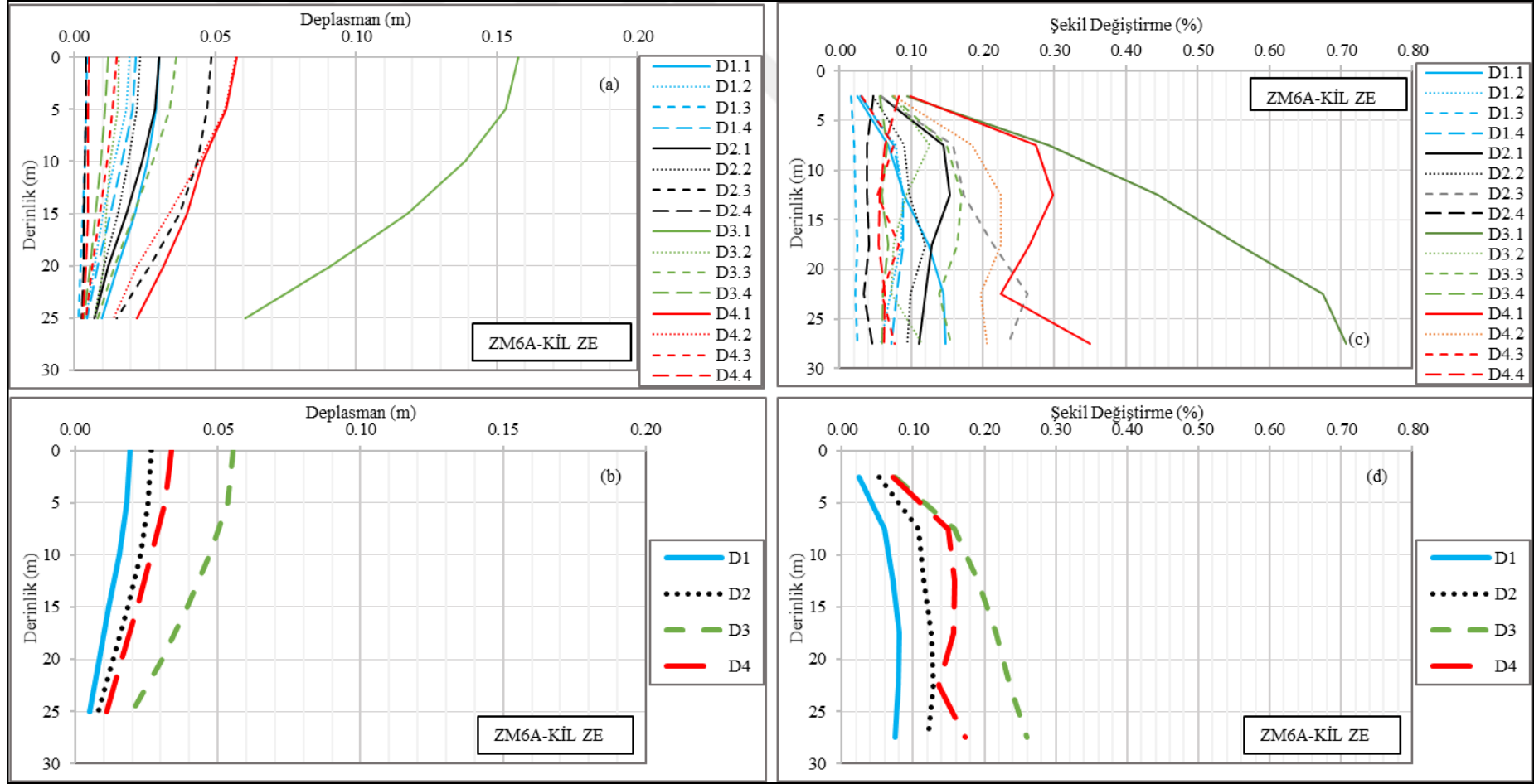
Şekil C.11 : ZM5D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



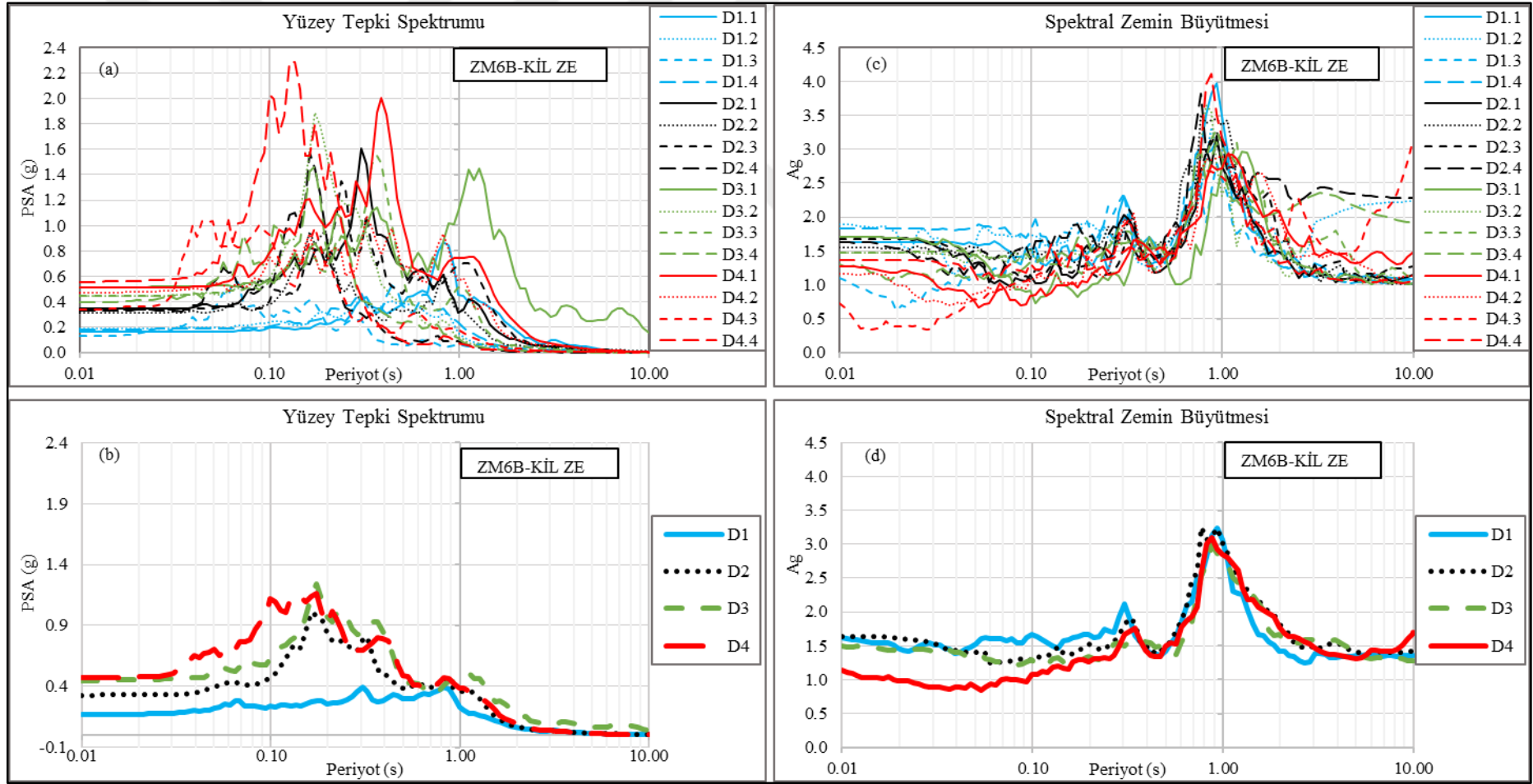
Şekil C.11 (devam) : ZM5D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



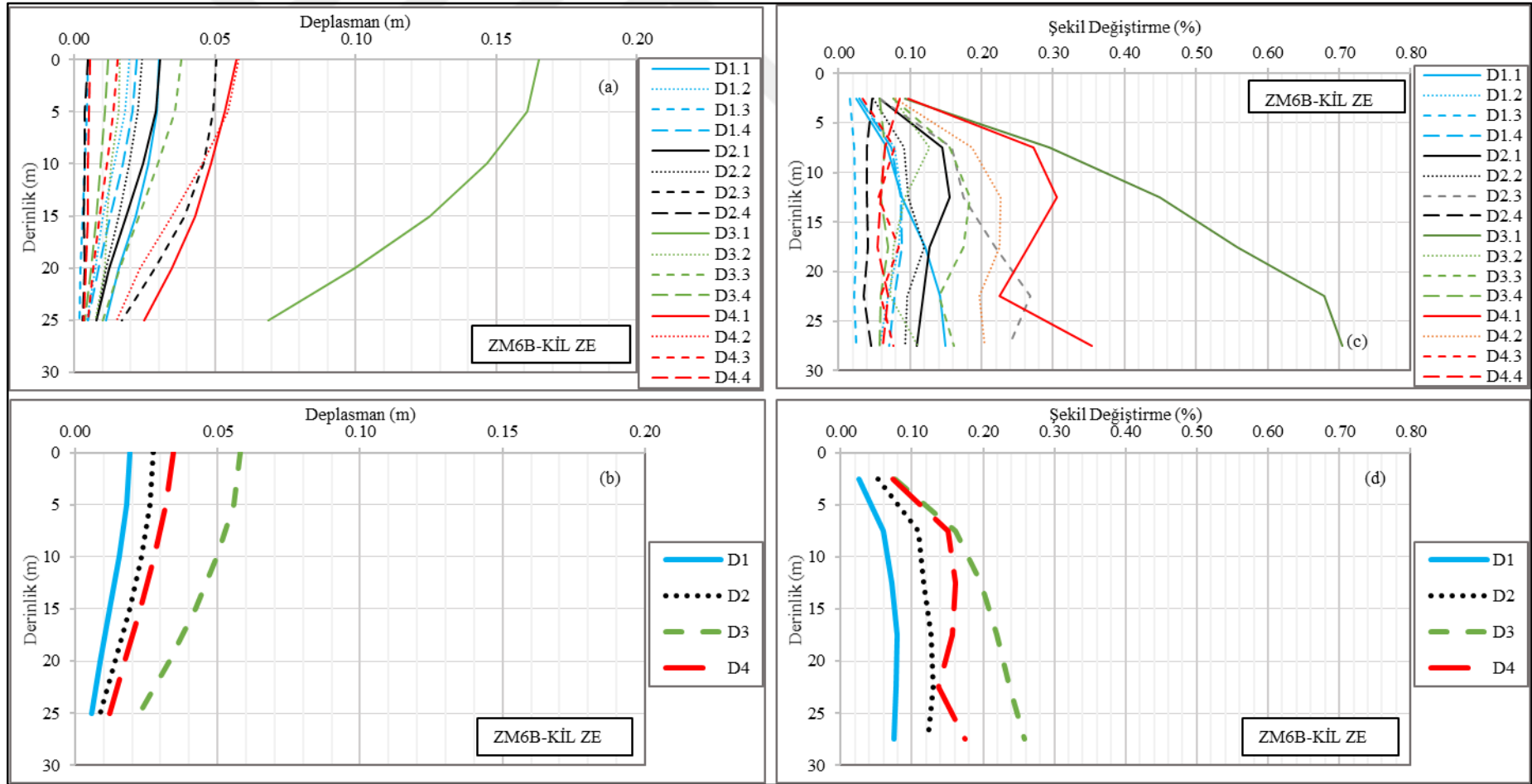
Şekil C.12 : ZM6A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



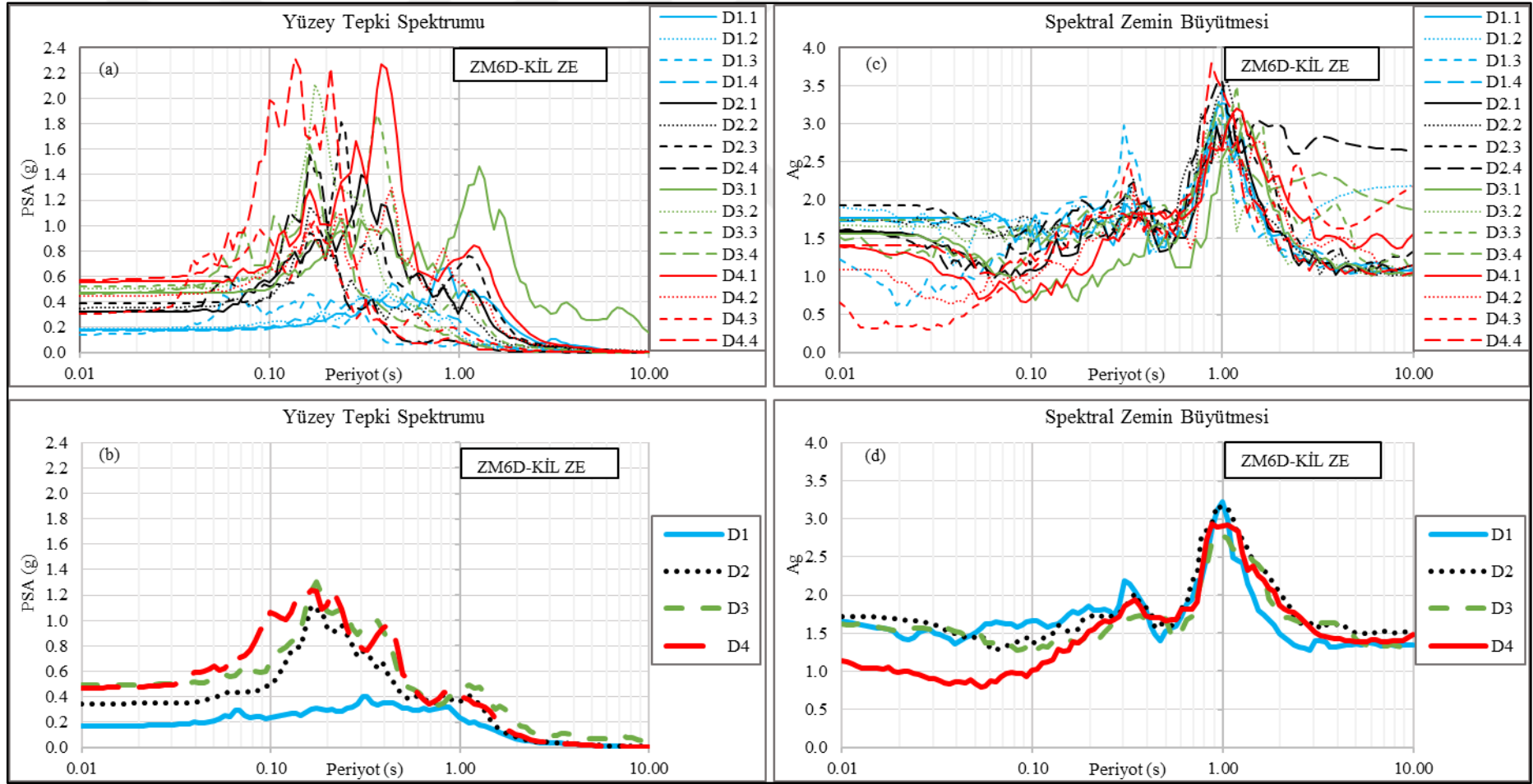
Şekil C.12 (devam) : ZM6A ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



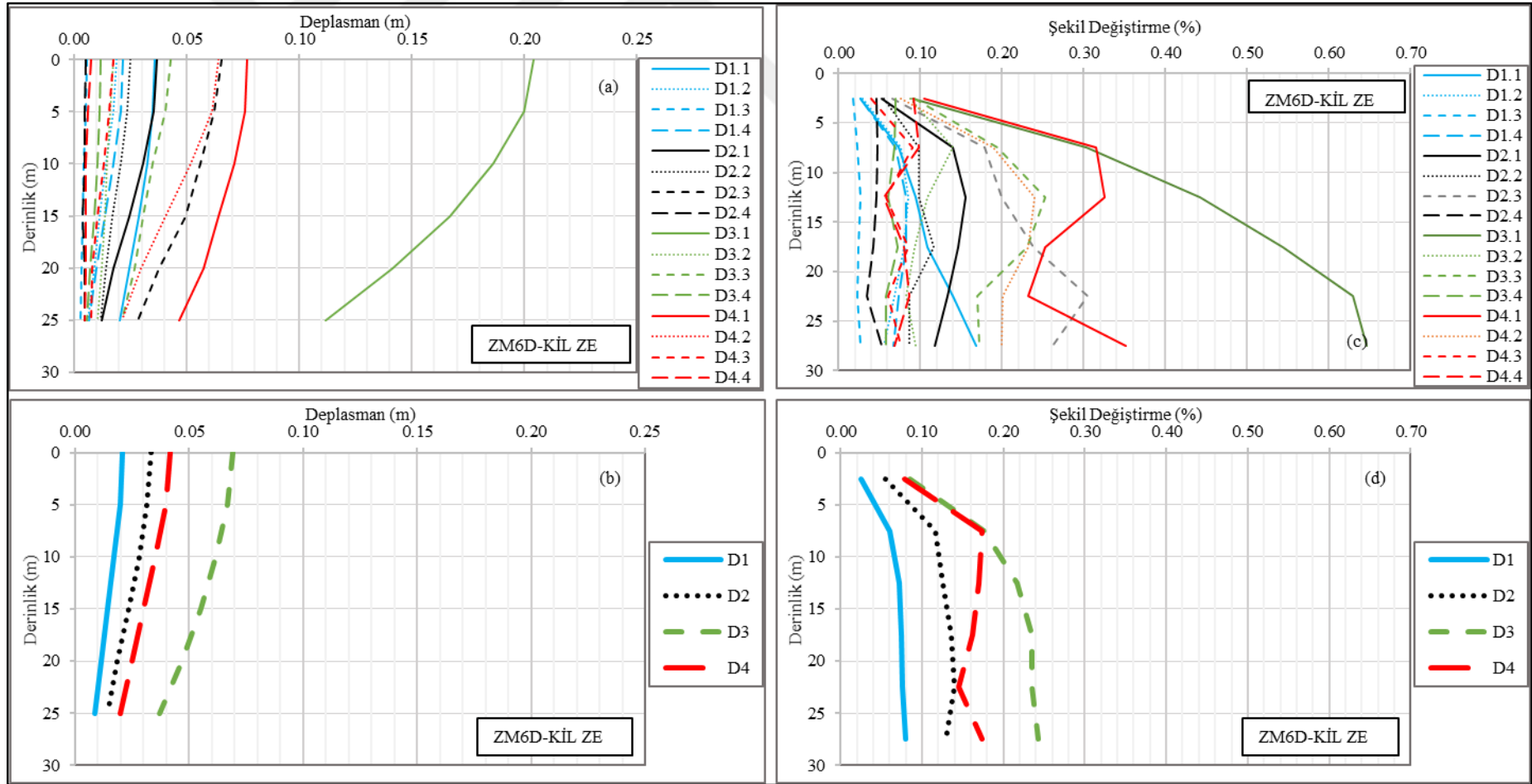
Şekil C.13 : ZM6B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



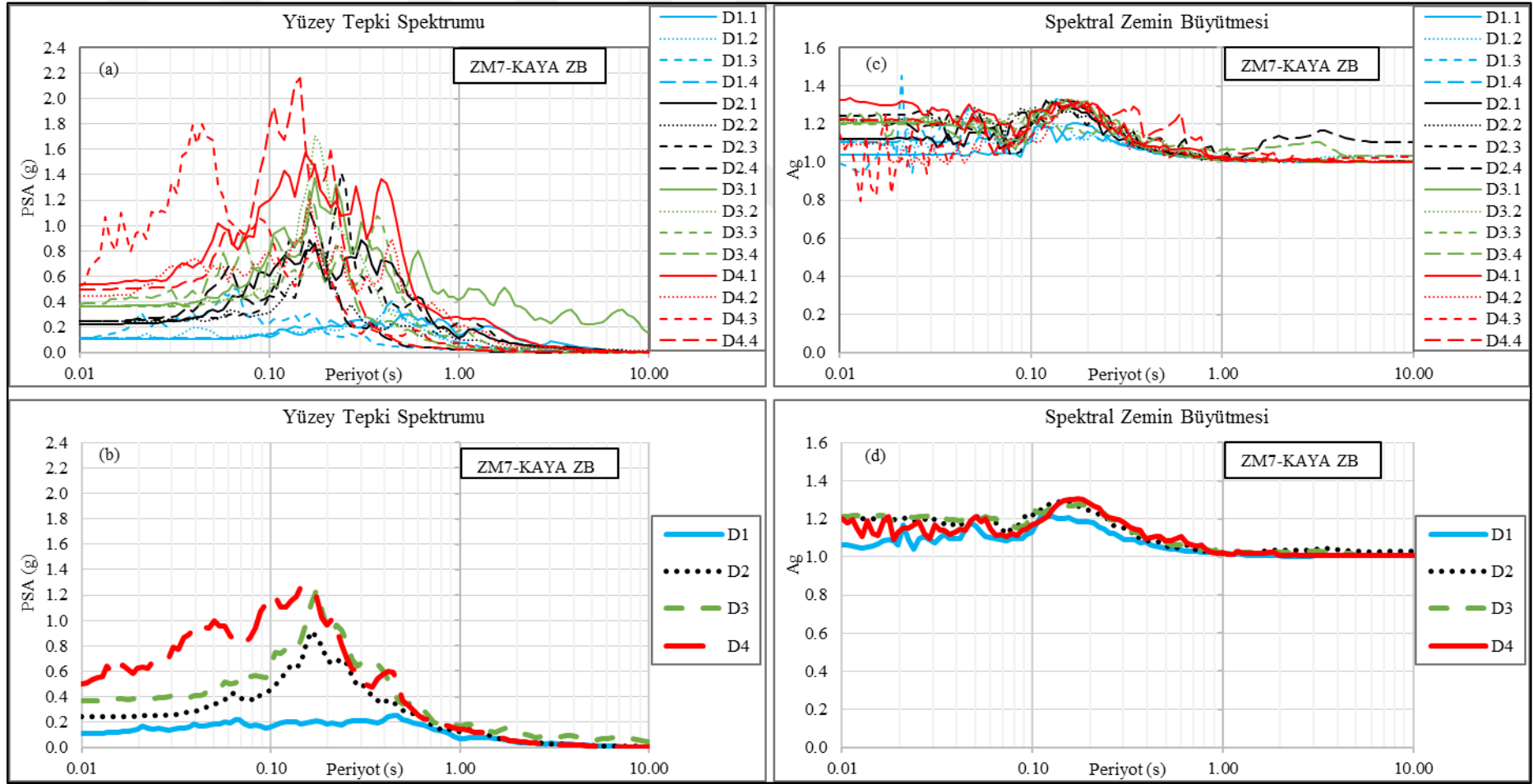
Şekil C.13 (devam) : ZM6B ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



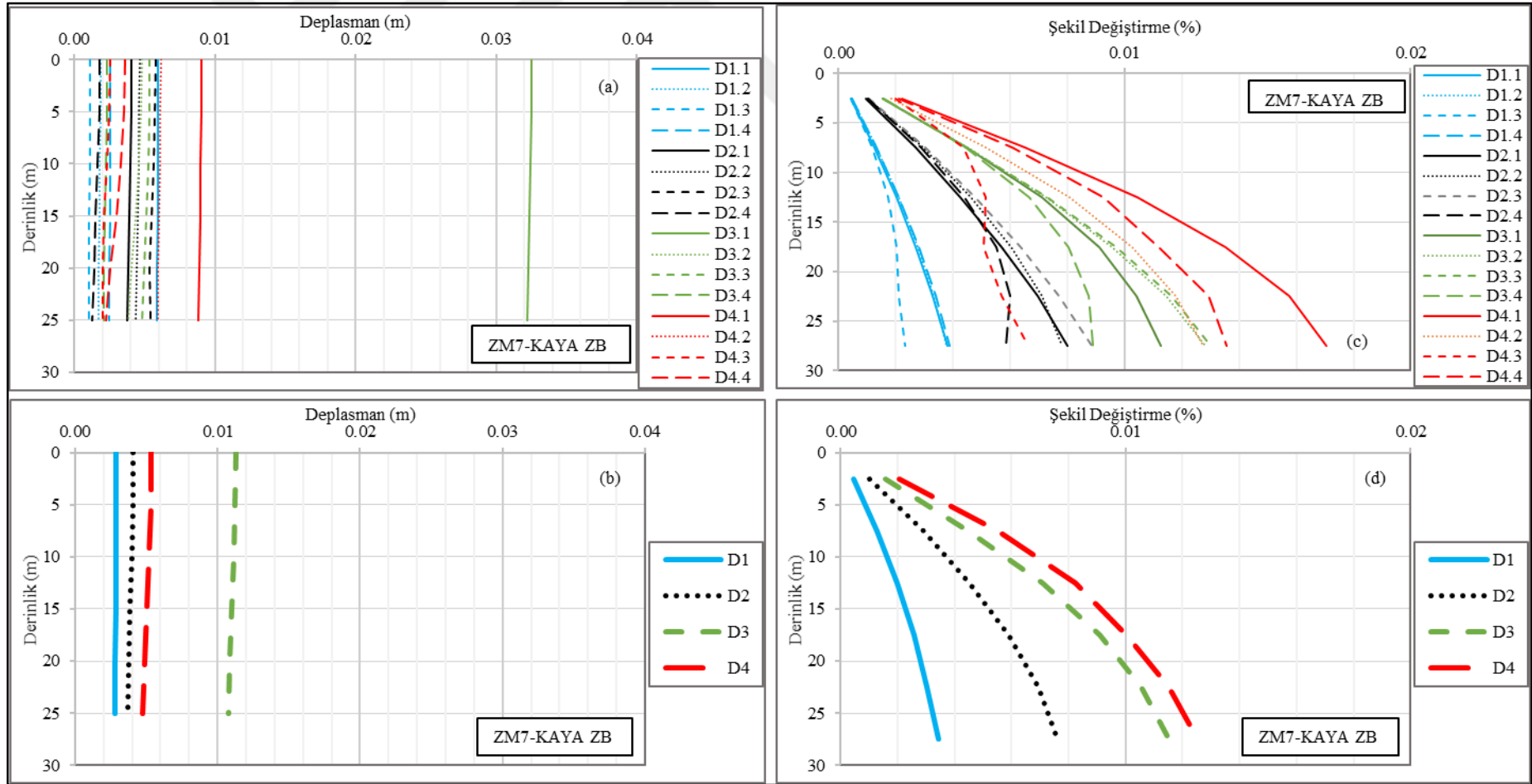
Şekil C.14 : ZM6D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



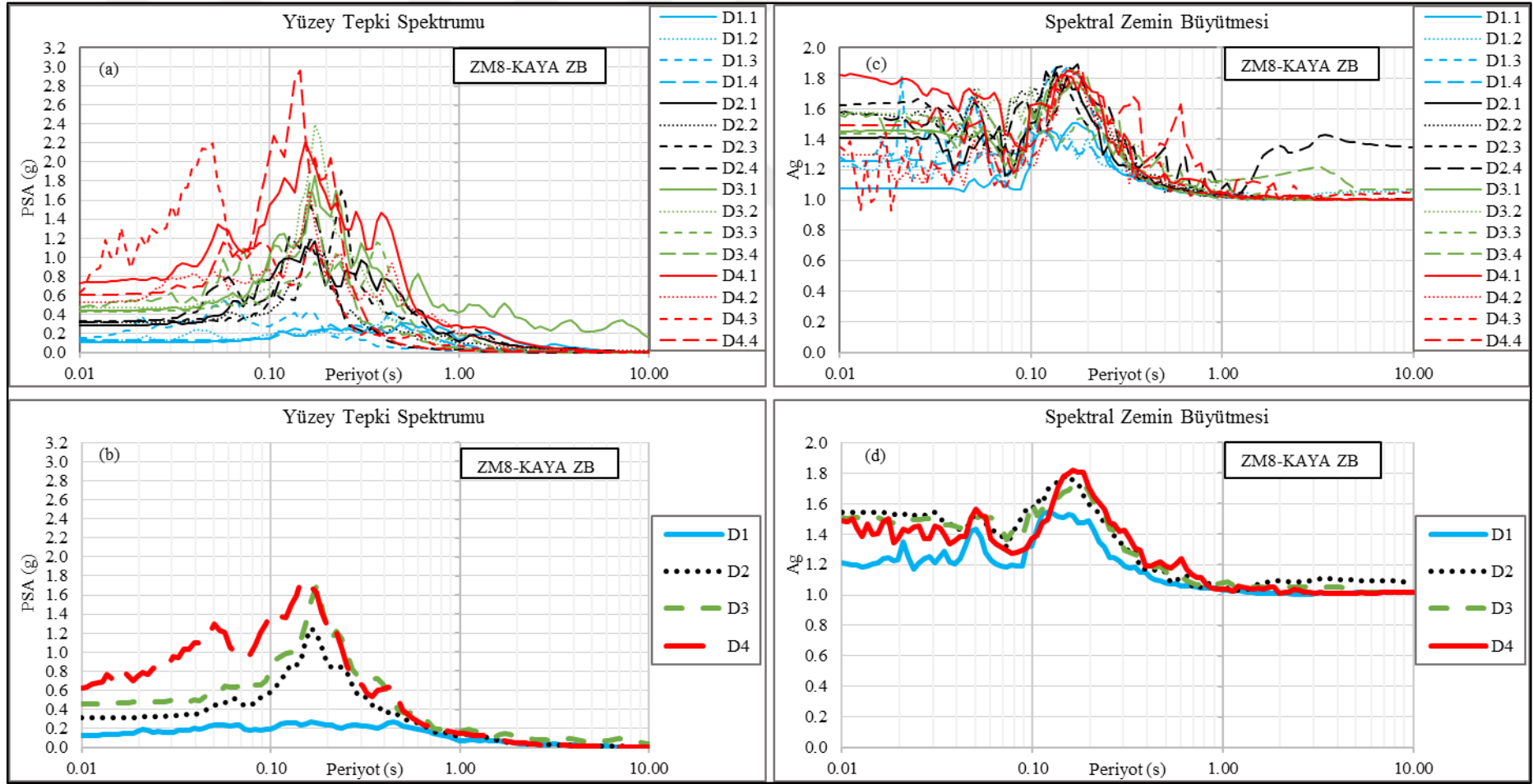
Şekil C.14 (devam) : ZM6D ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.



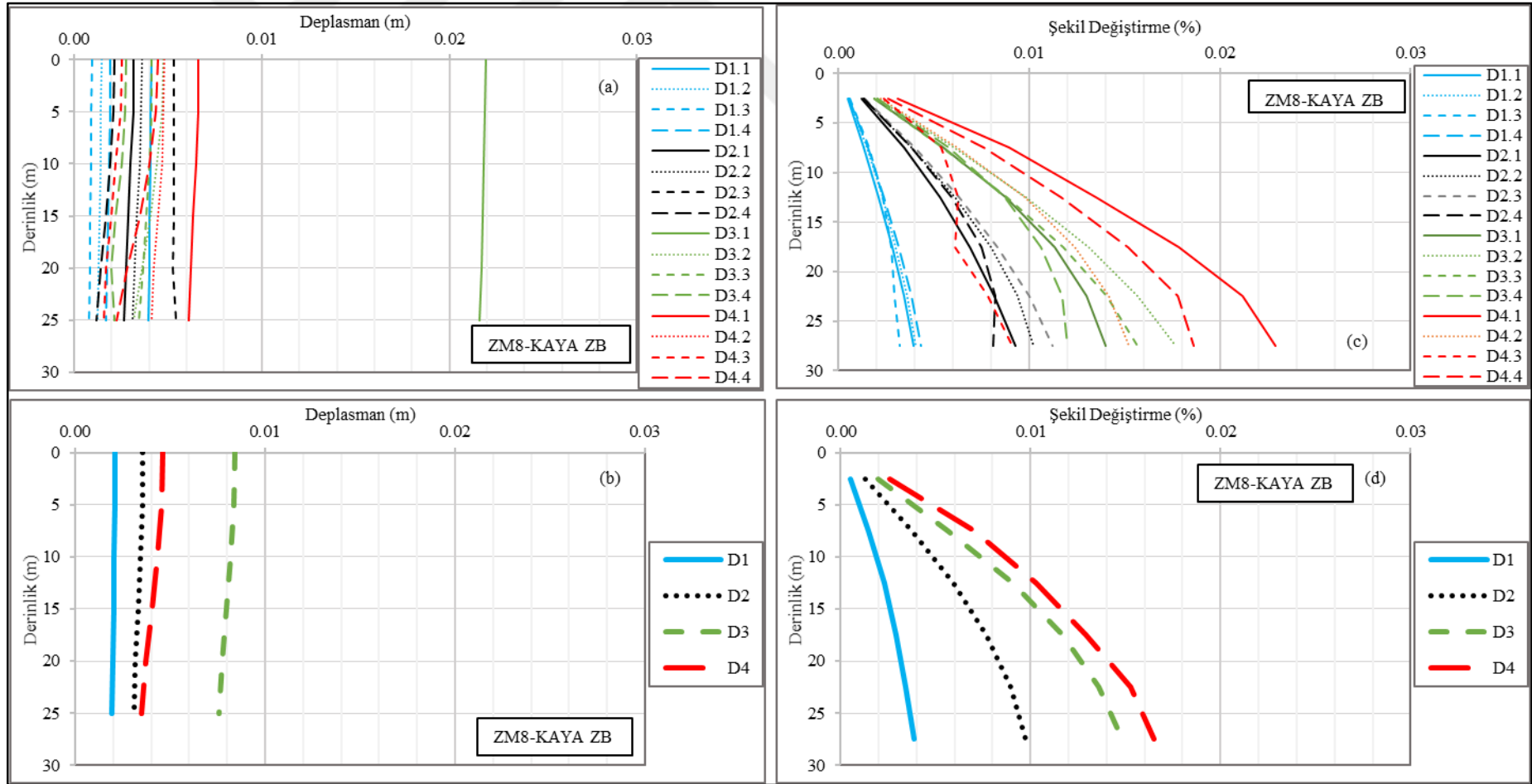
Şekil C.15 : ZM7 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.



Şekil C.15 (devam) : ZM7 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.

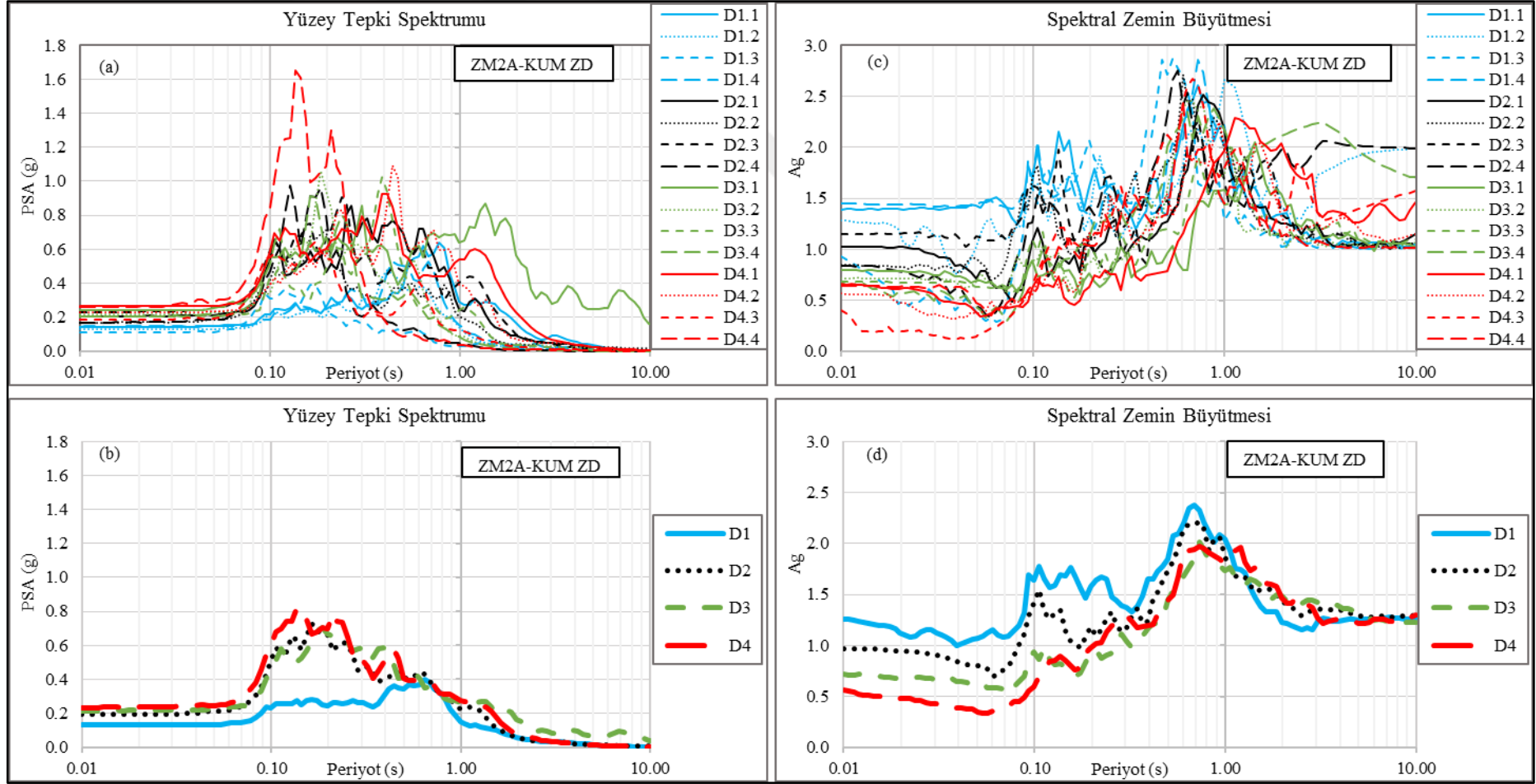


Şekil C.16 : ZM8 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz sonuçları grafikleri.

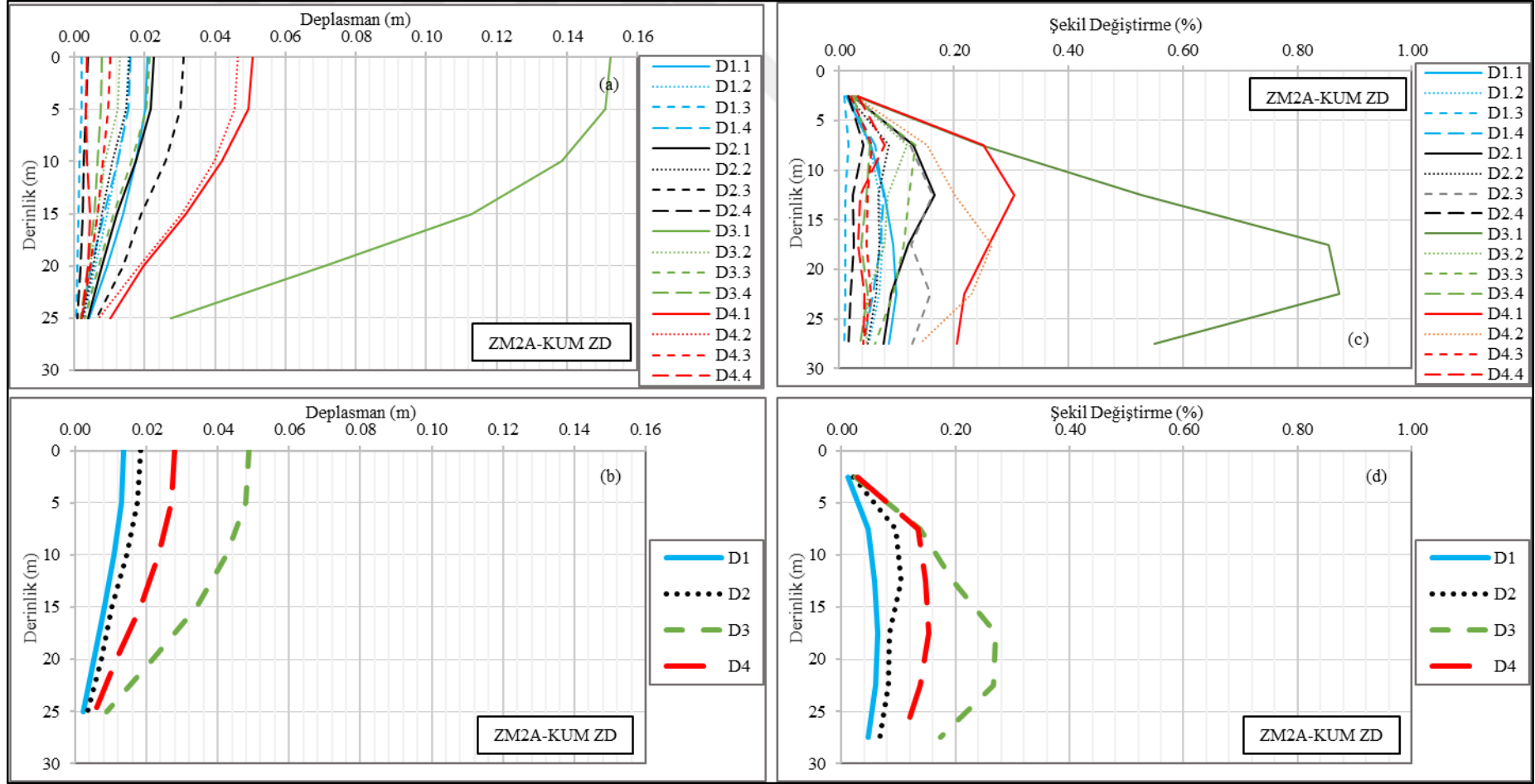


Şekil C.16 (devam) : ZM8 ile gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analiz analiz sonuçları grafikleri.

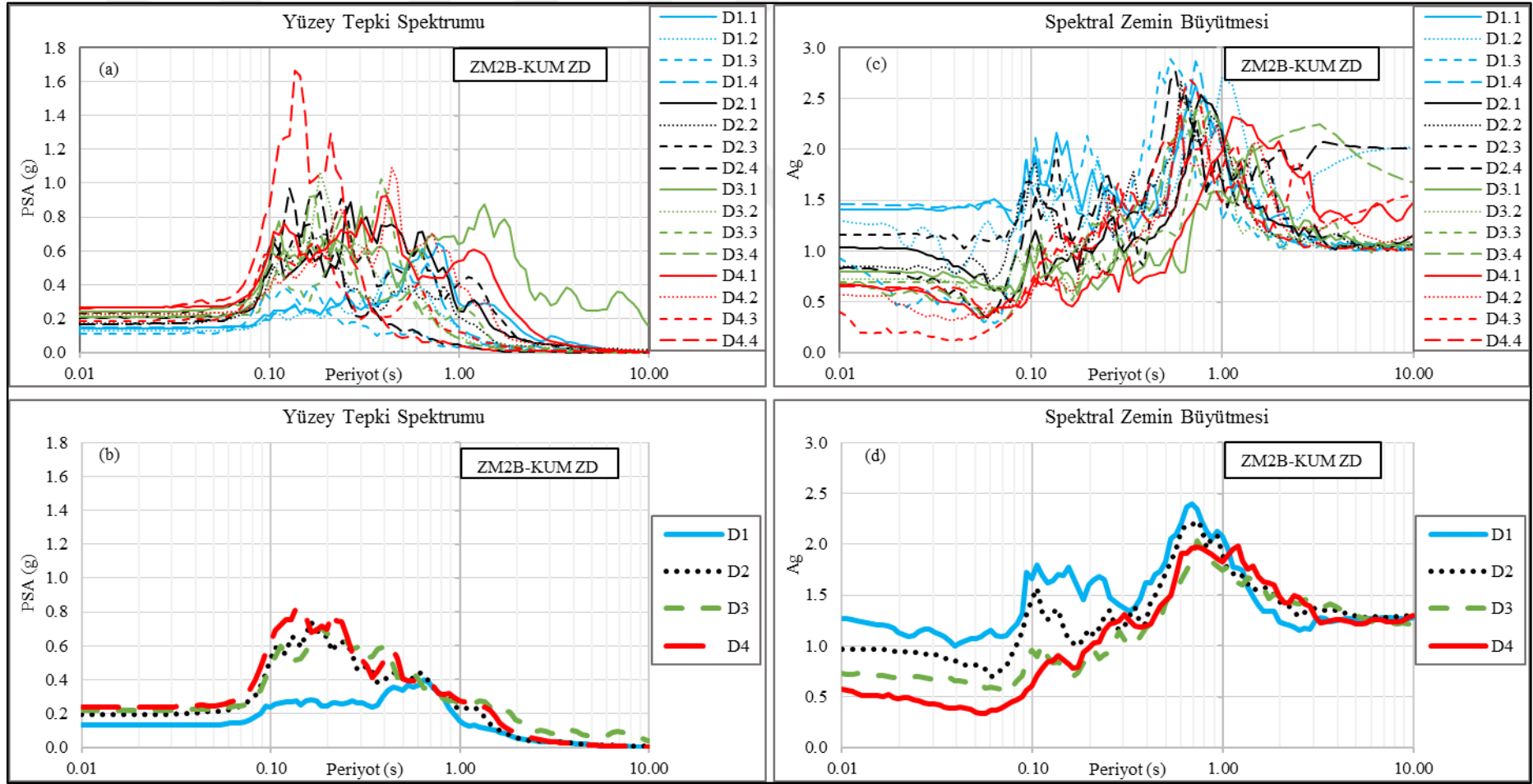
EK D



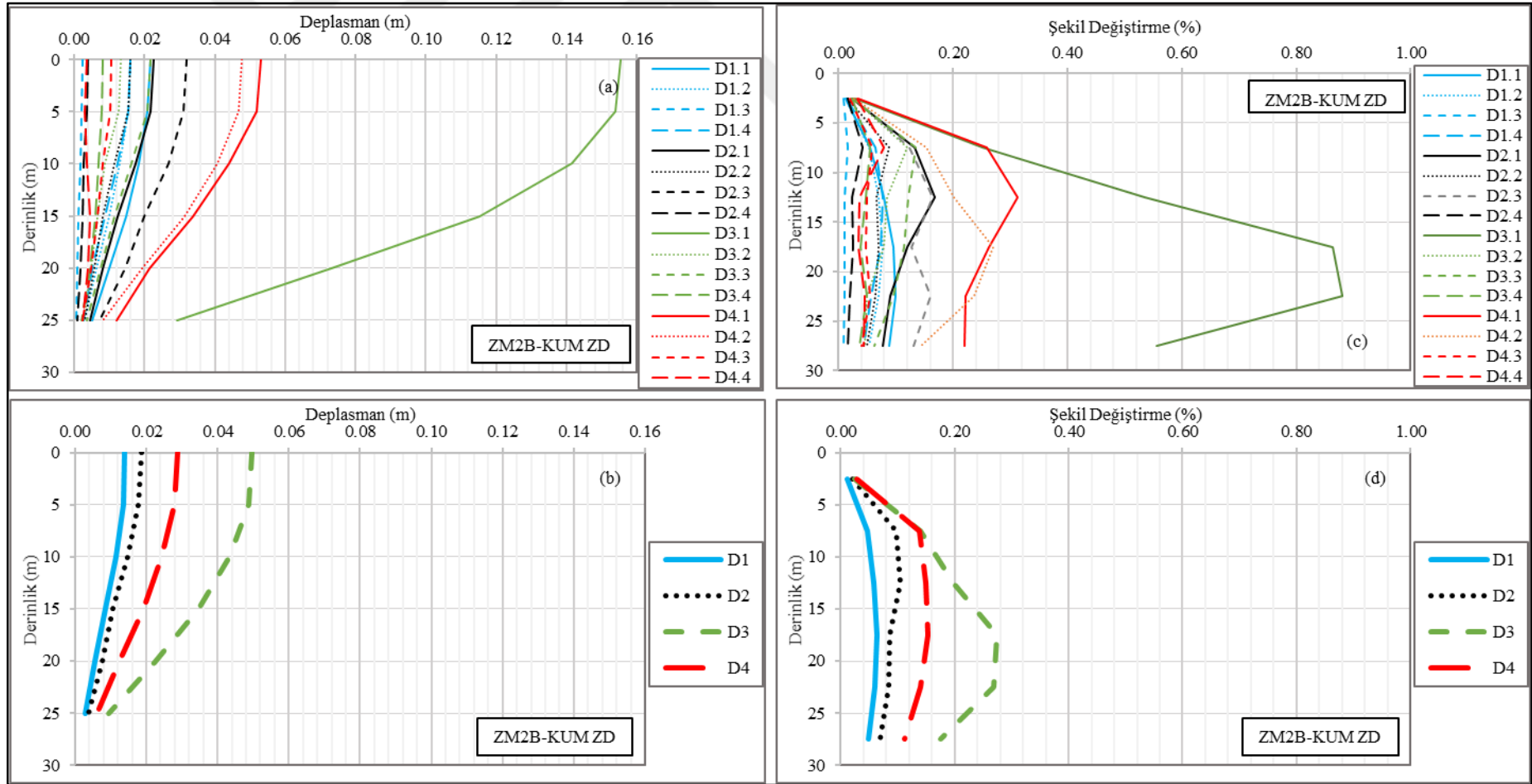
Şekil D.1 : ZM2A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



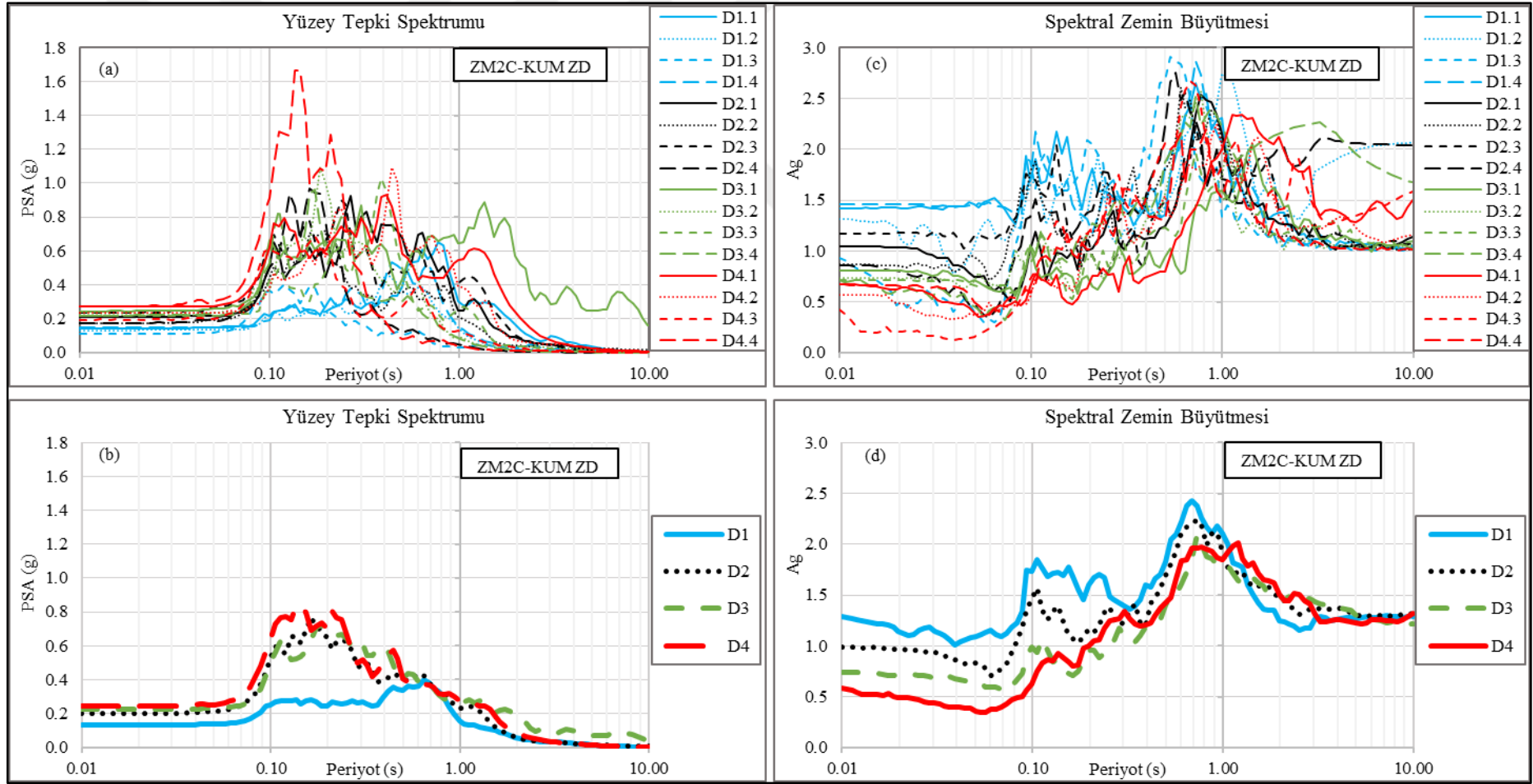
Şekil D.1 (devam) : ZM2A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



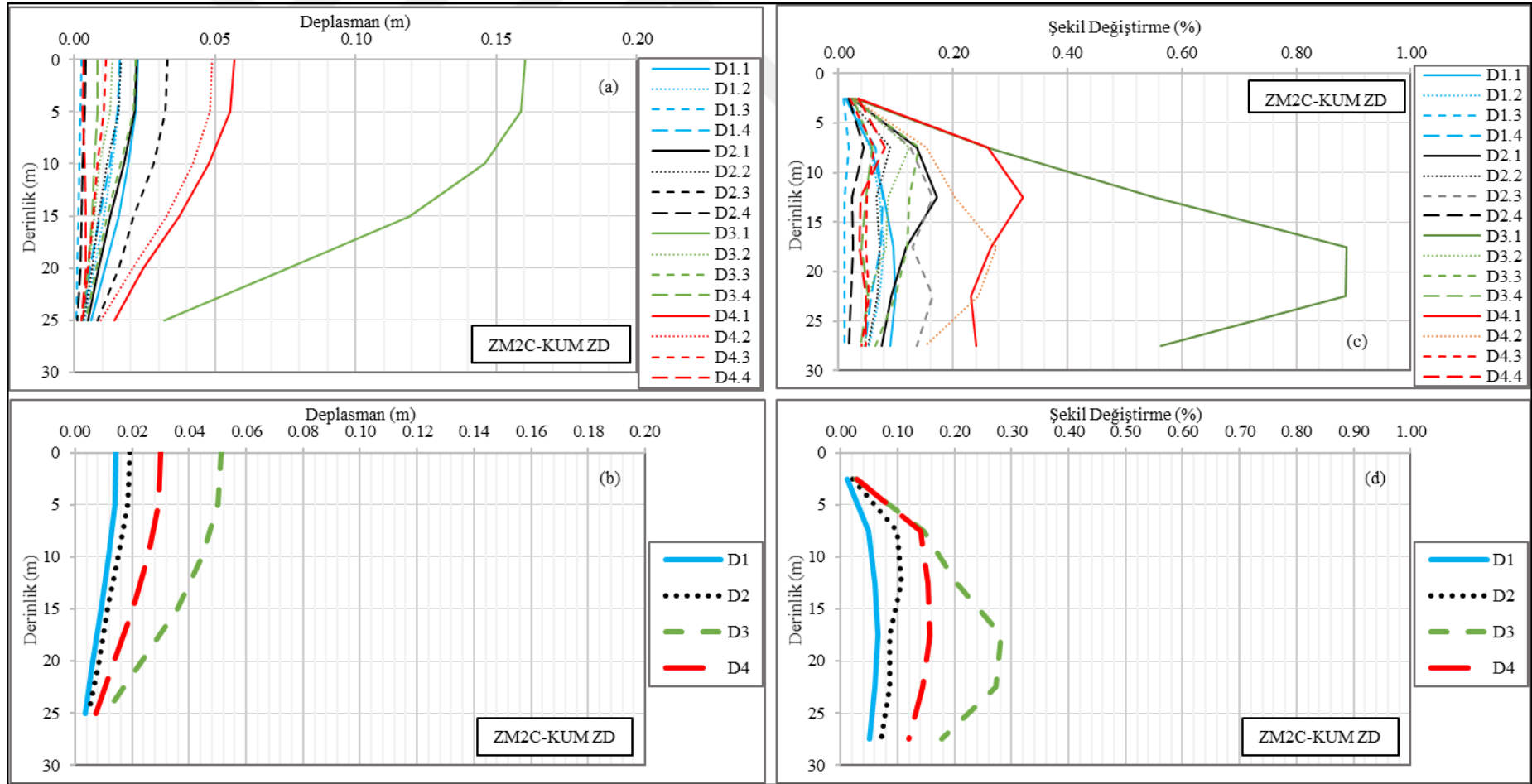
Şekil D.2 : ZM2B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



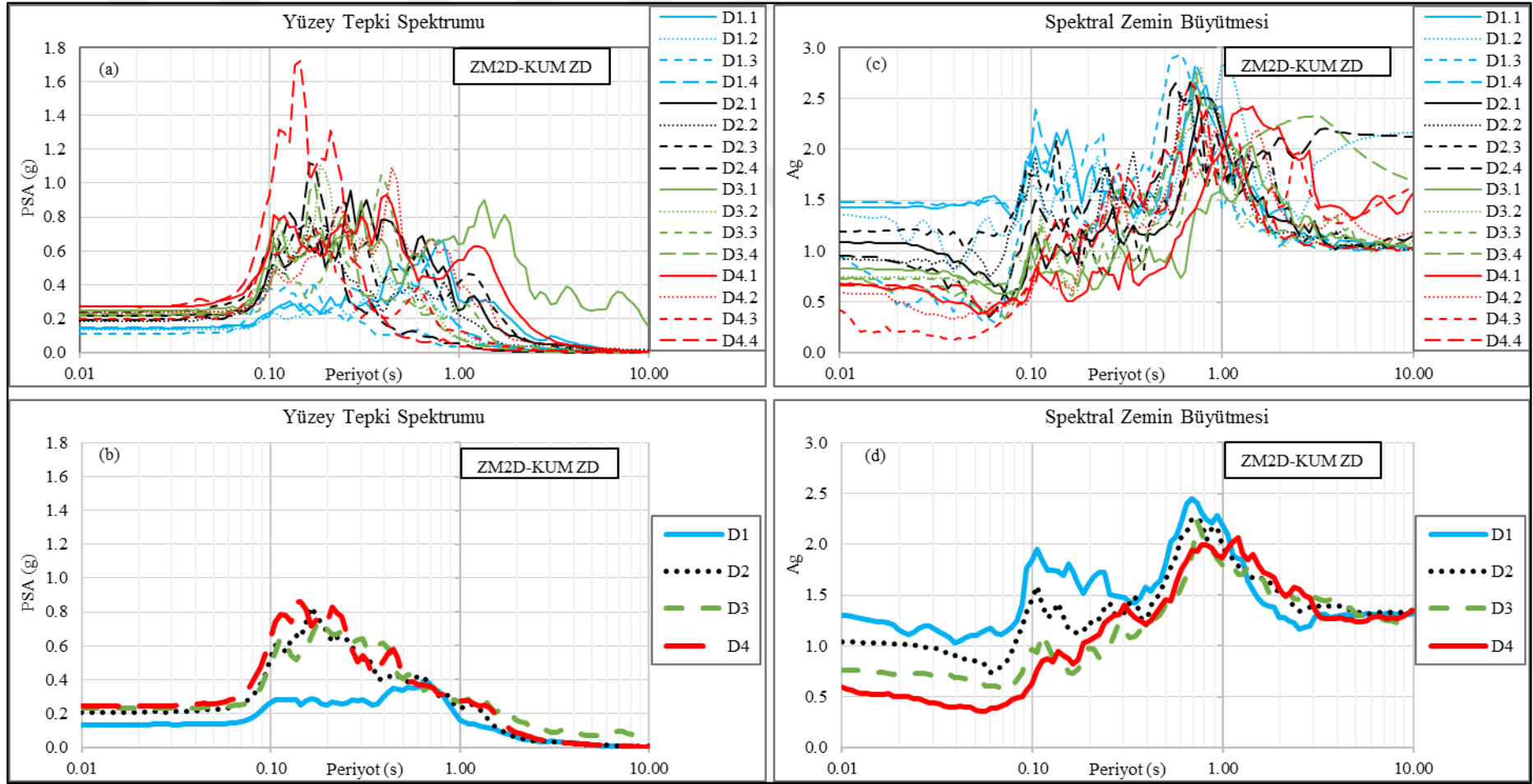
Şekil D.2 (devam) : ZM2B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



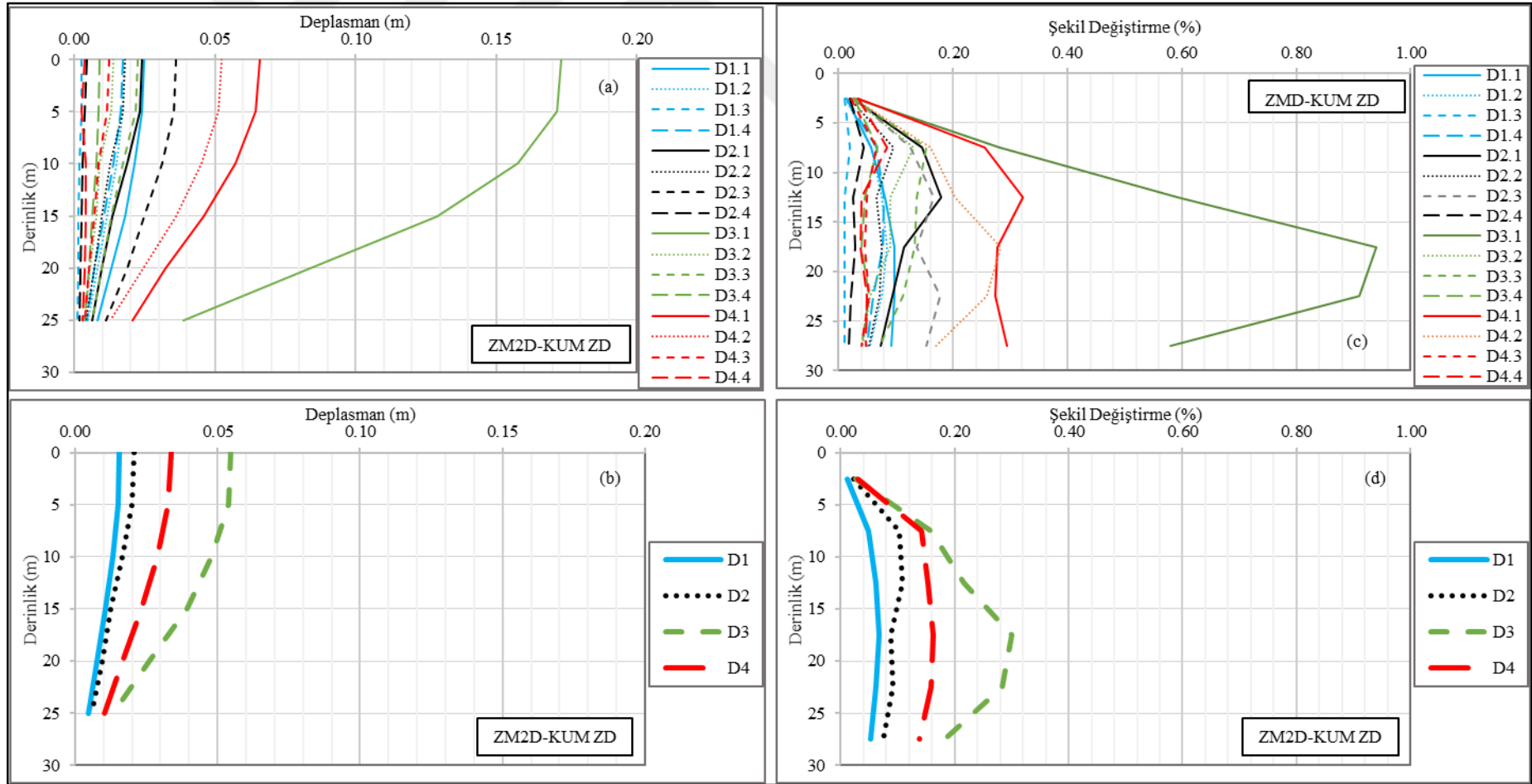
Şekil D.3 : ZM2C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



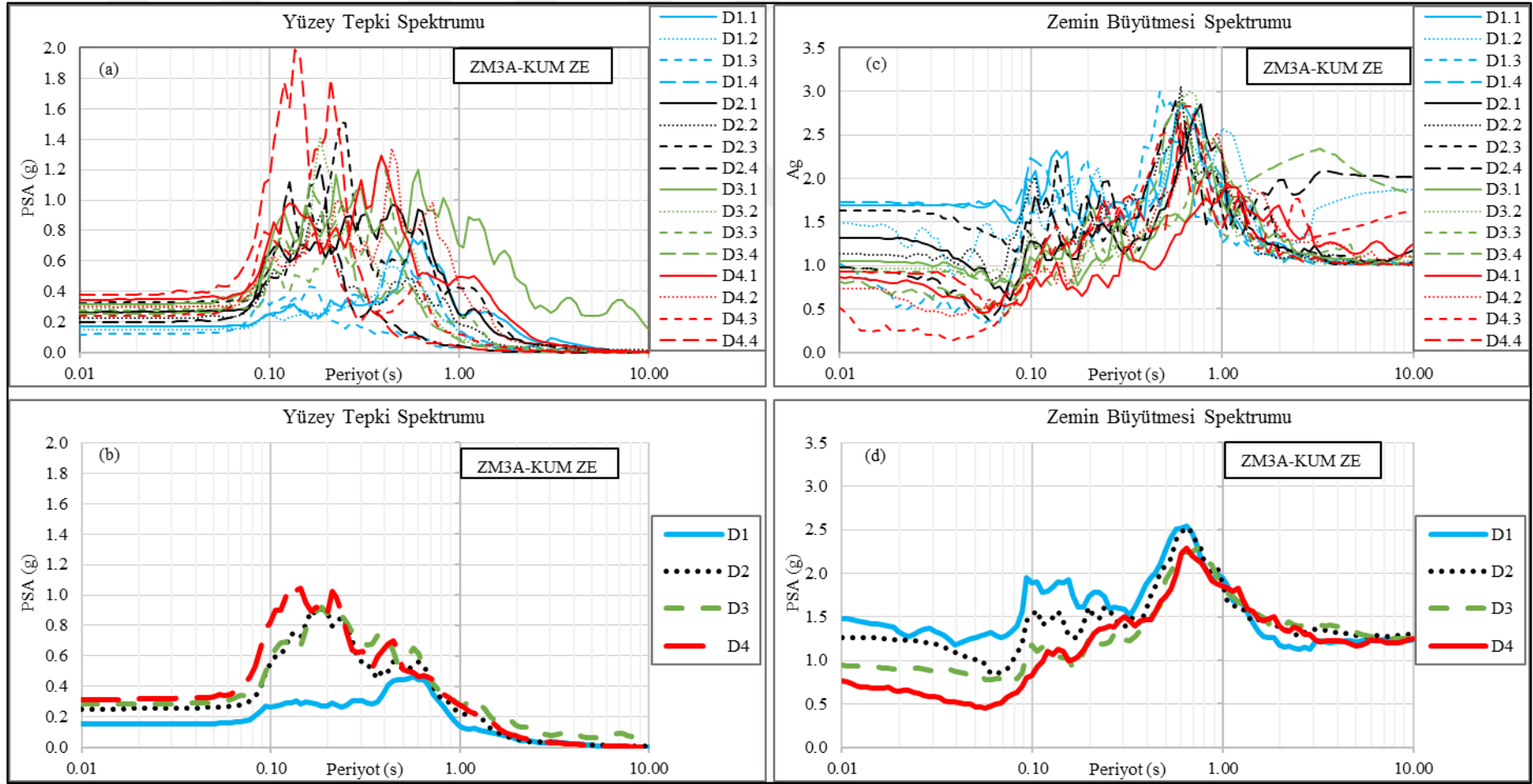
Şekil D.3 (devam) : ZM2C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



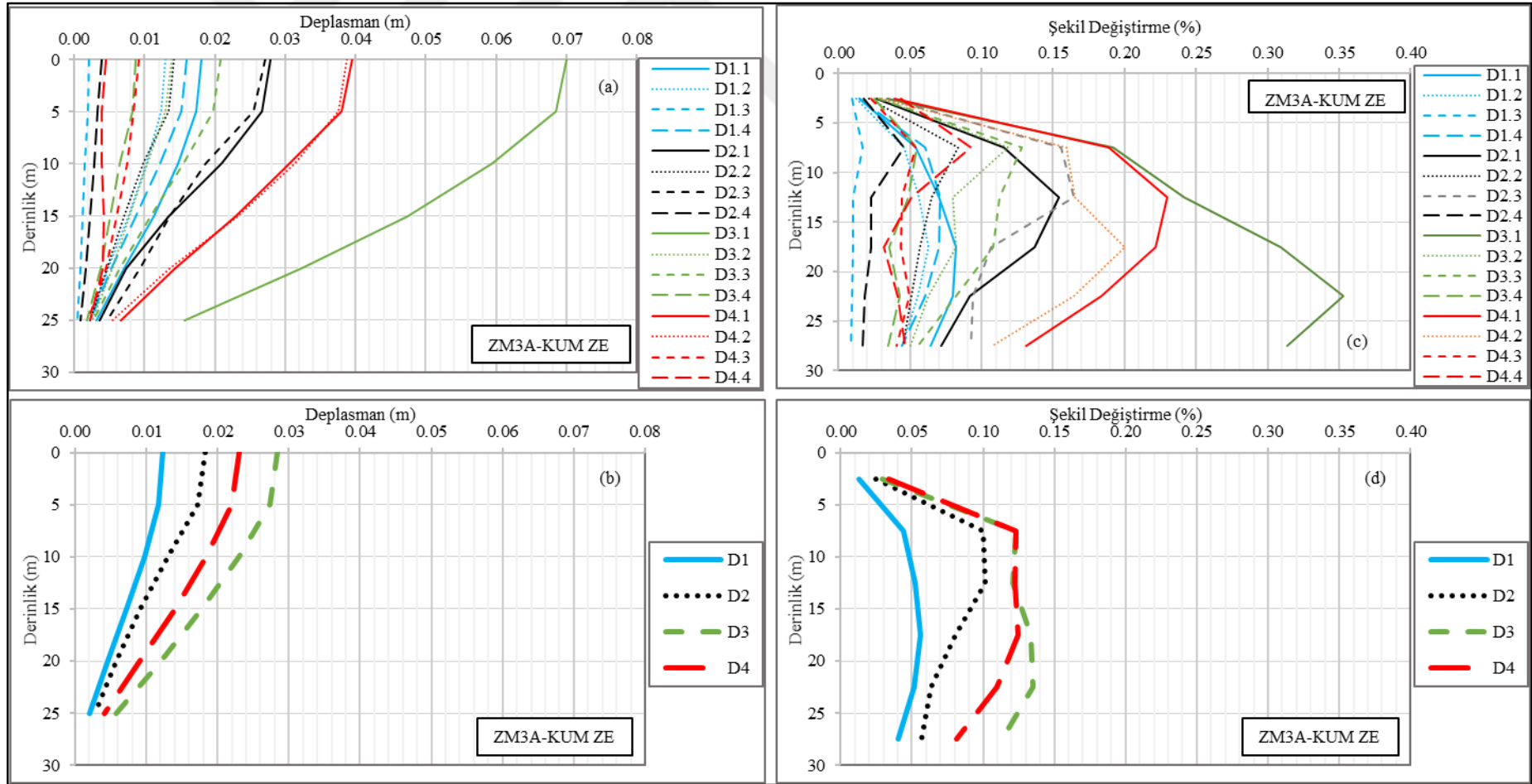
Şekil D.4 : ZM2D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



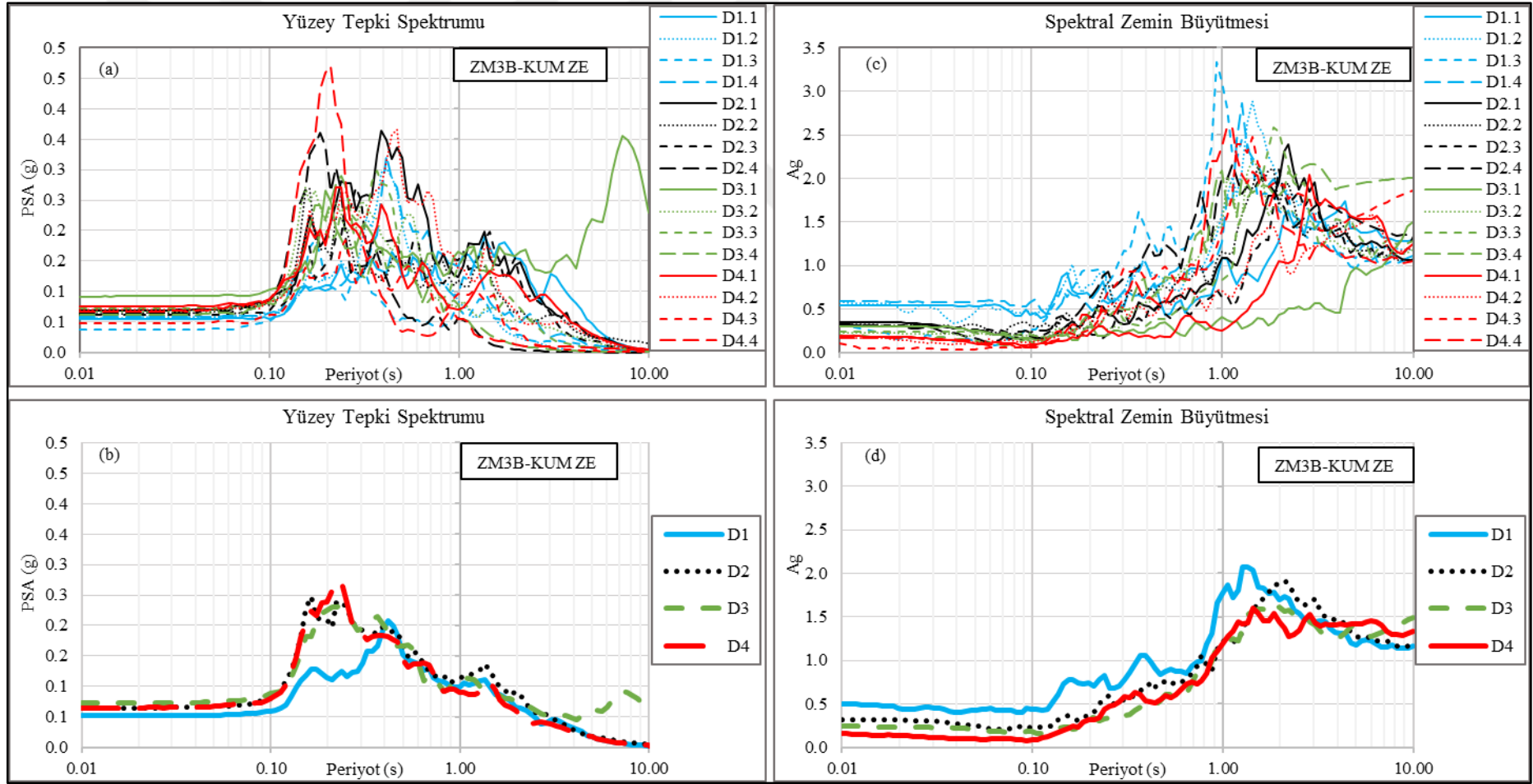
Şekil D.4 (devam) : ZM2D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



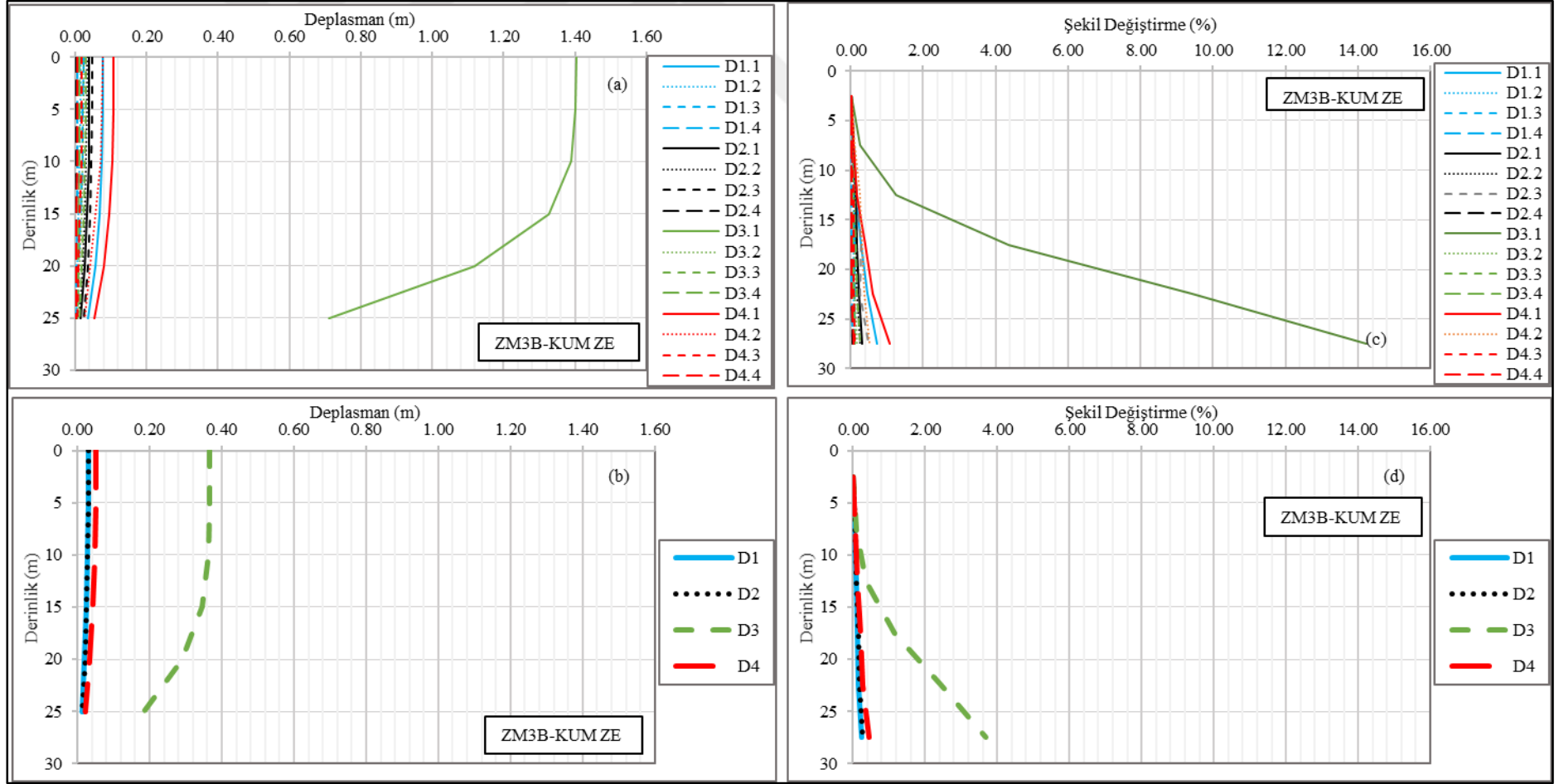
Şekil D.5 : ZM3A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



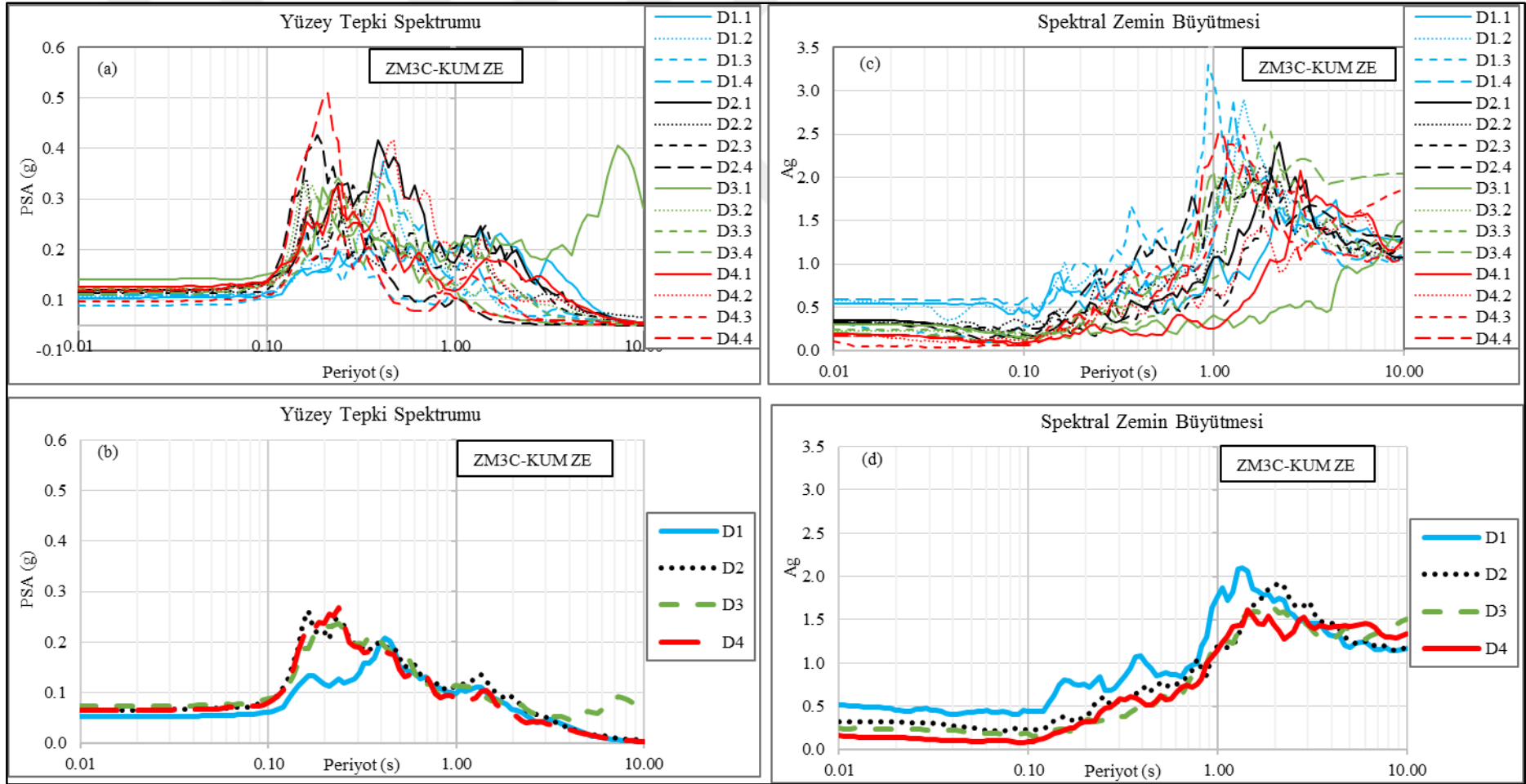
Şekil D.5 (devam) : ZM3A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



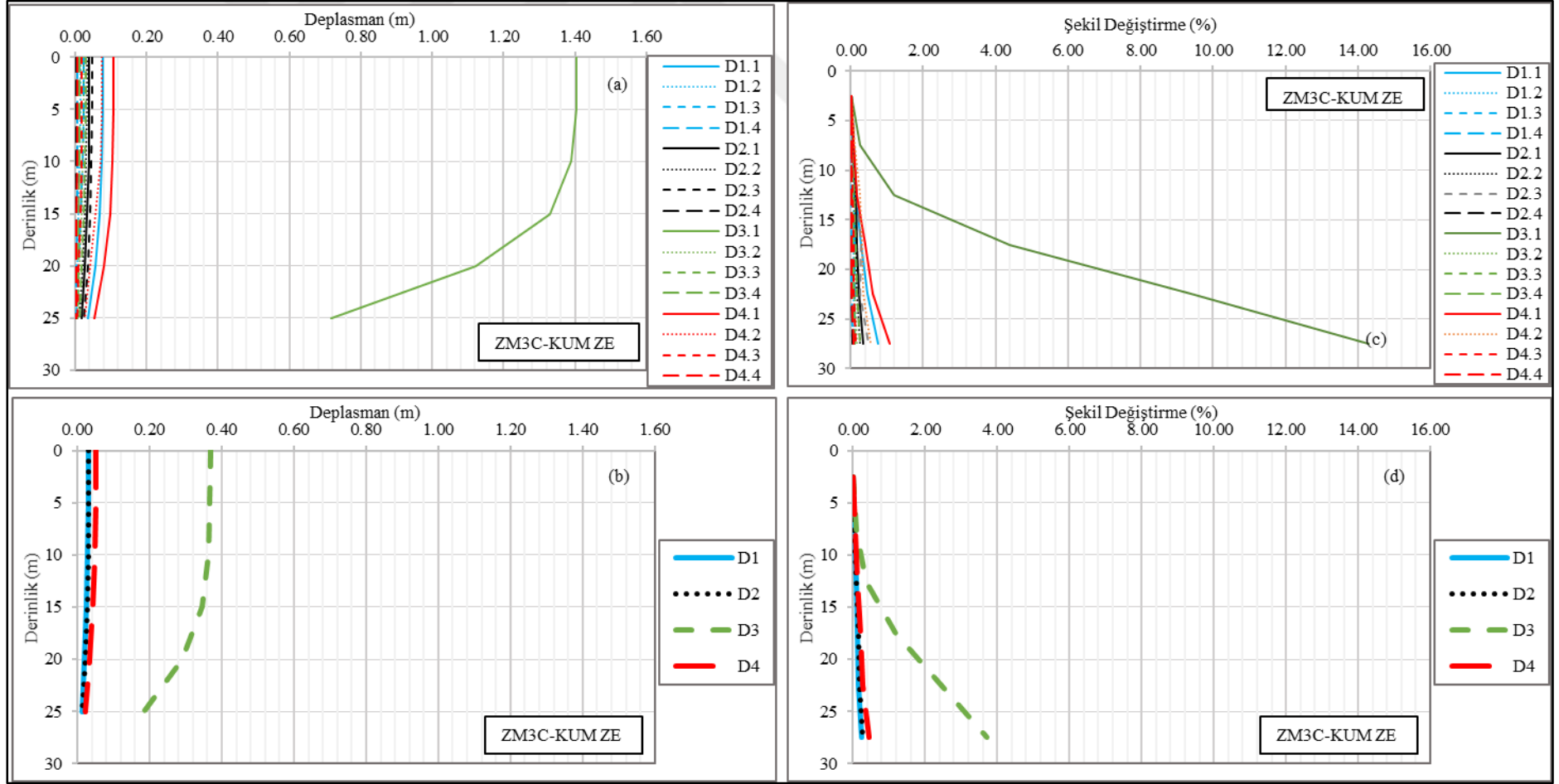
Şekil D.6 : ZM3B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



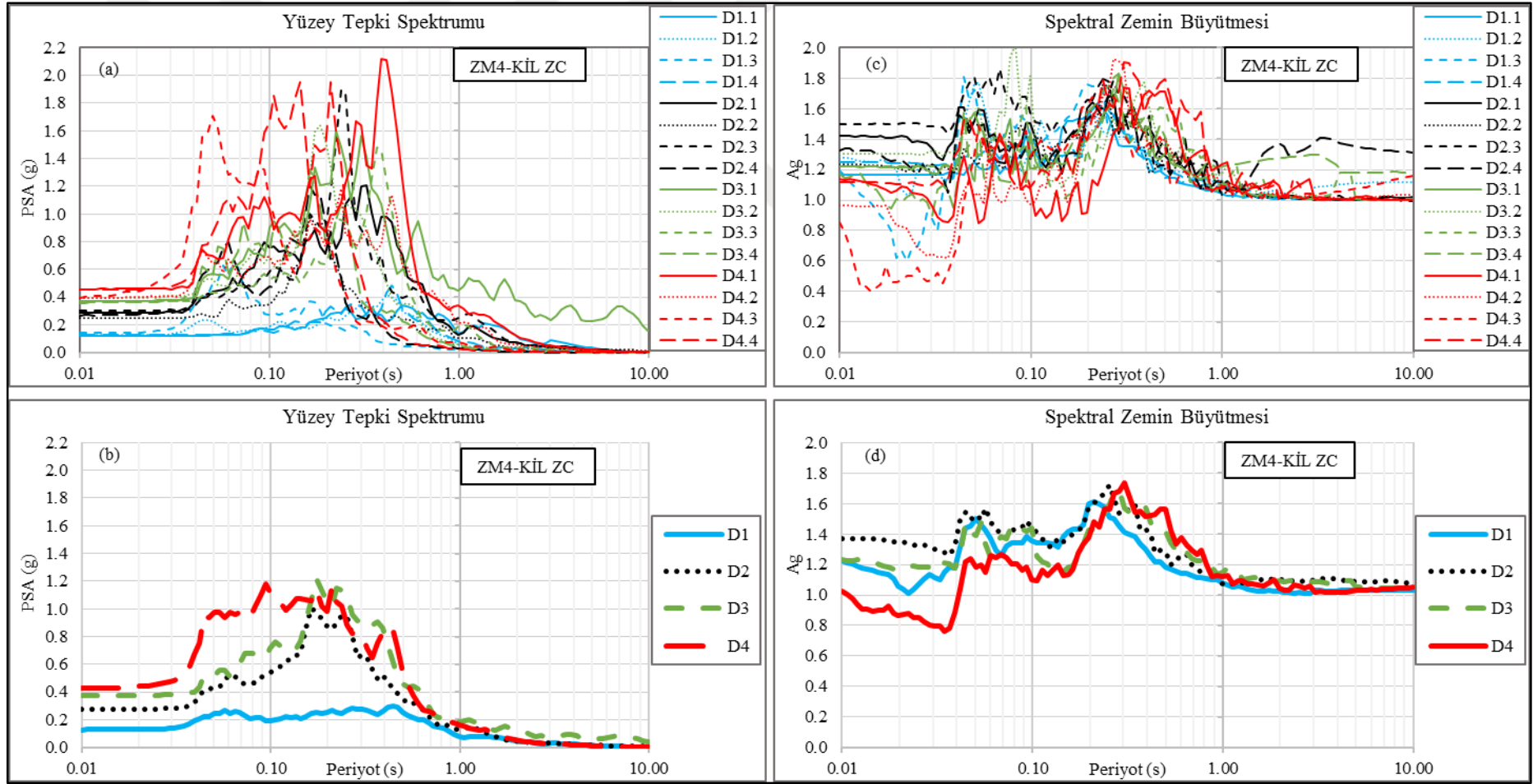
Şekil D.6 (devam) : ZM3B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



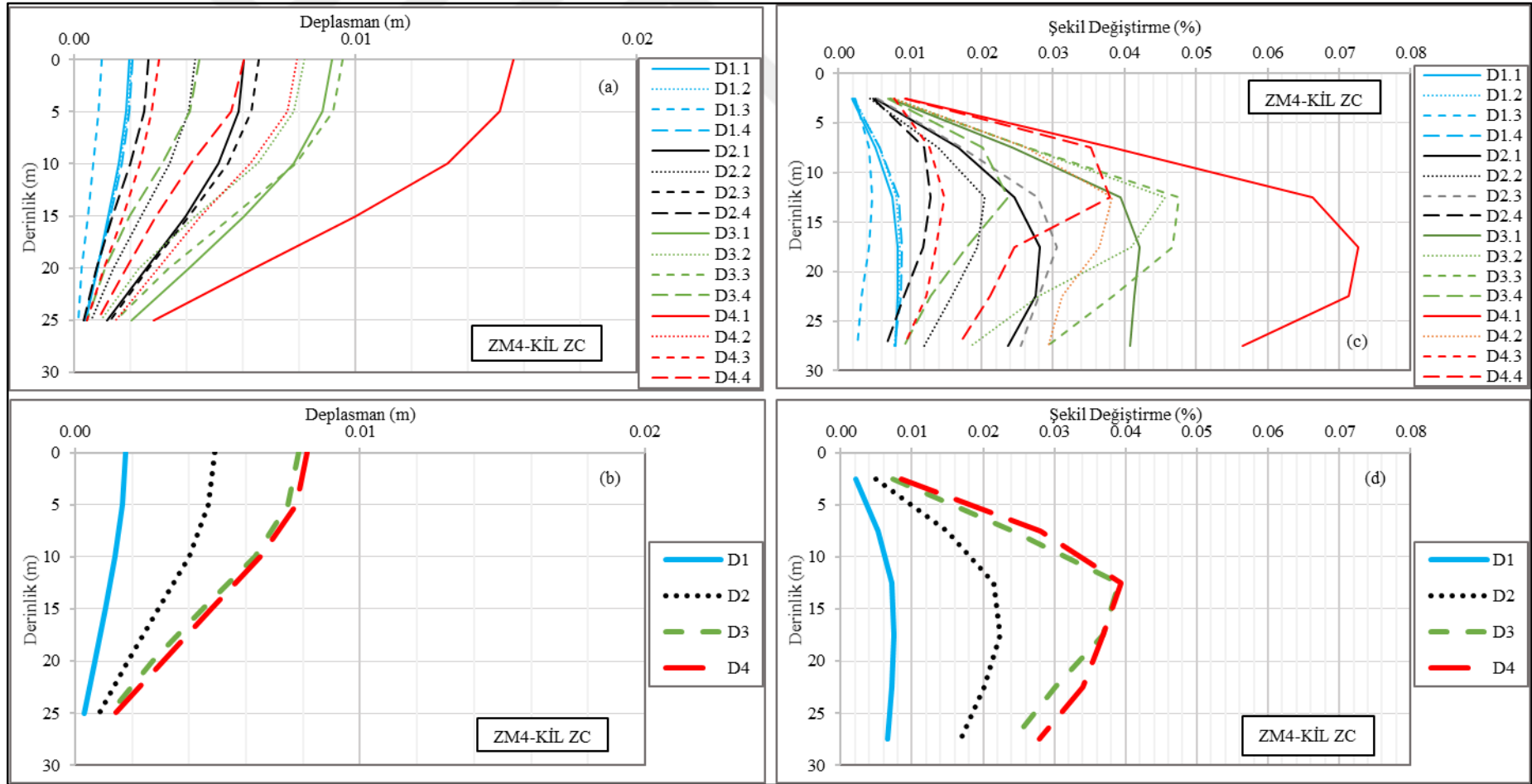
Şekil D.7 : ZM3C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



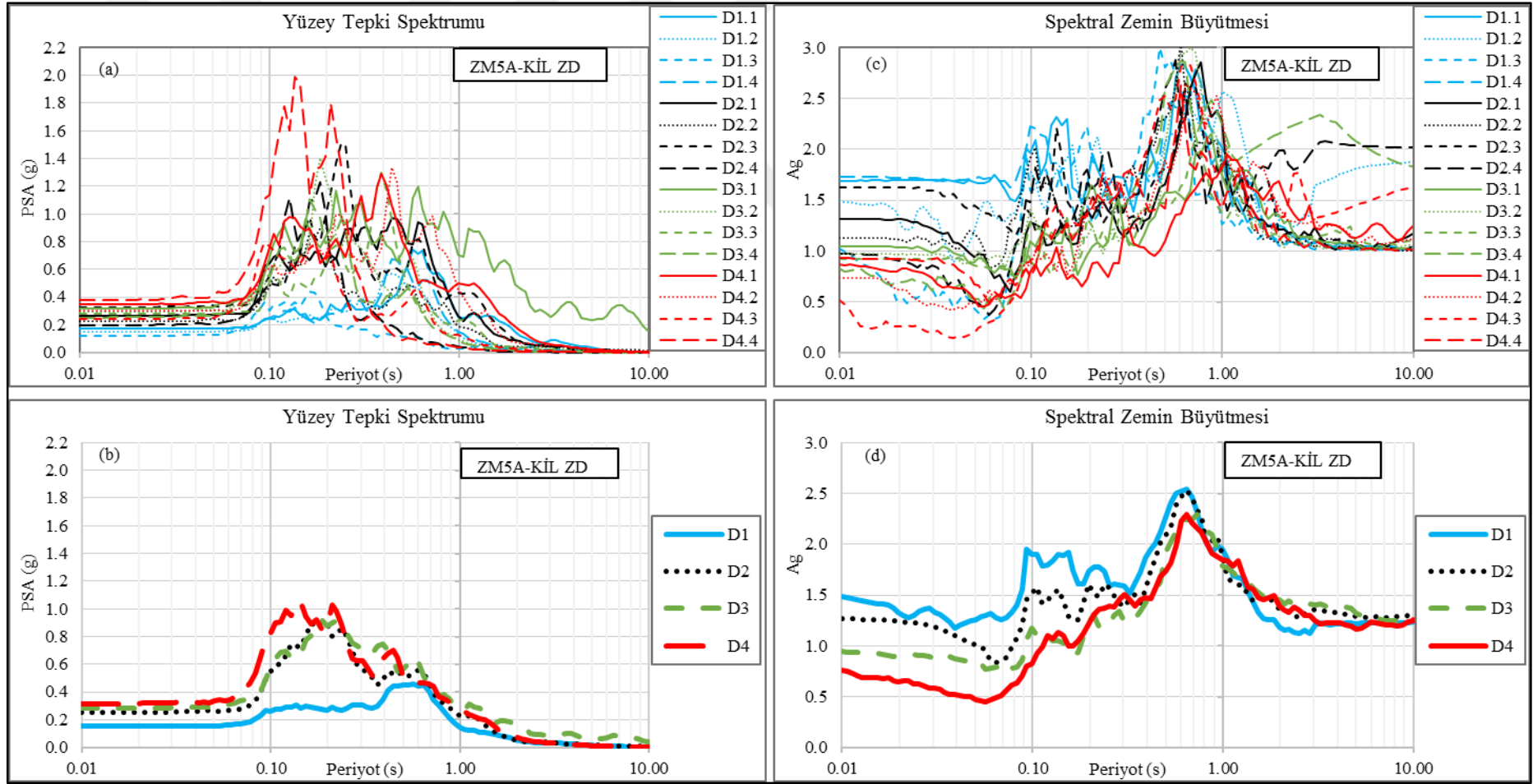
Şekil D.7 (devam) : ZM3C gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



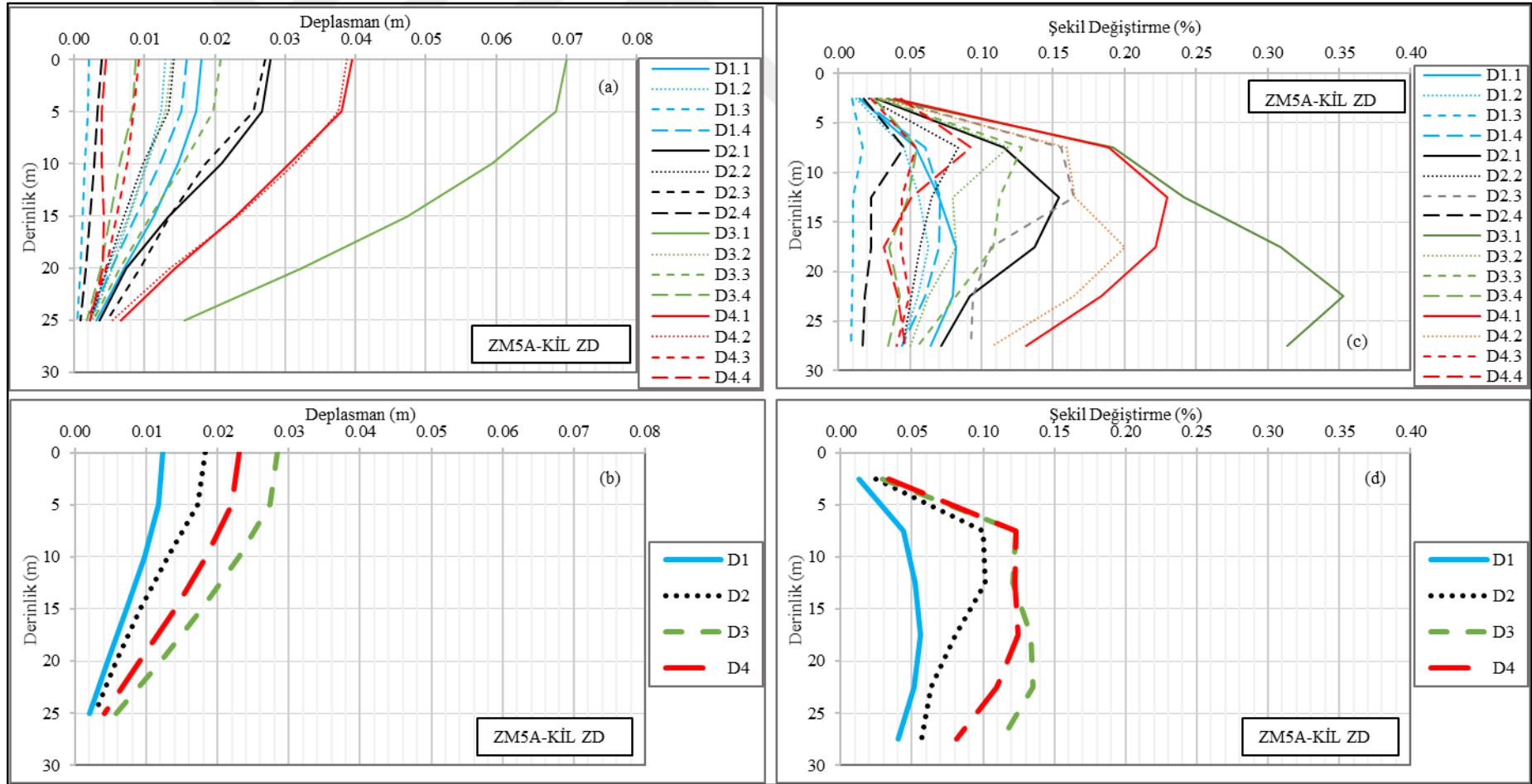
Şekil D.8 : ZM4 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



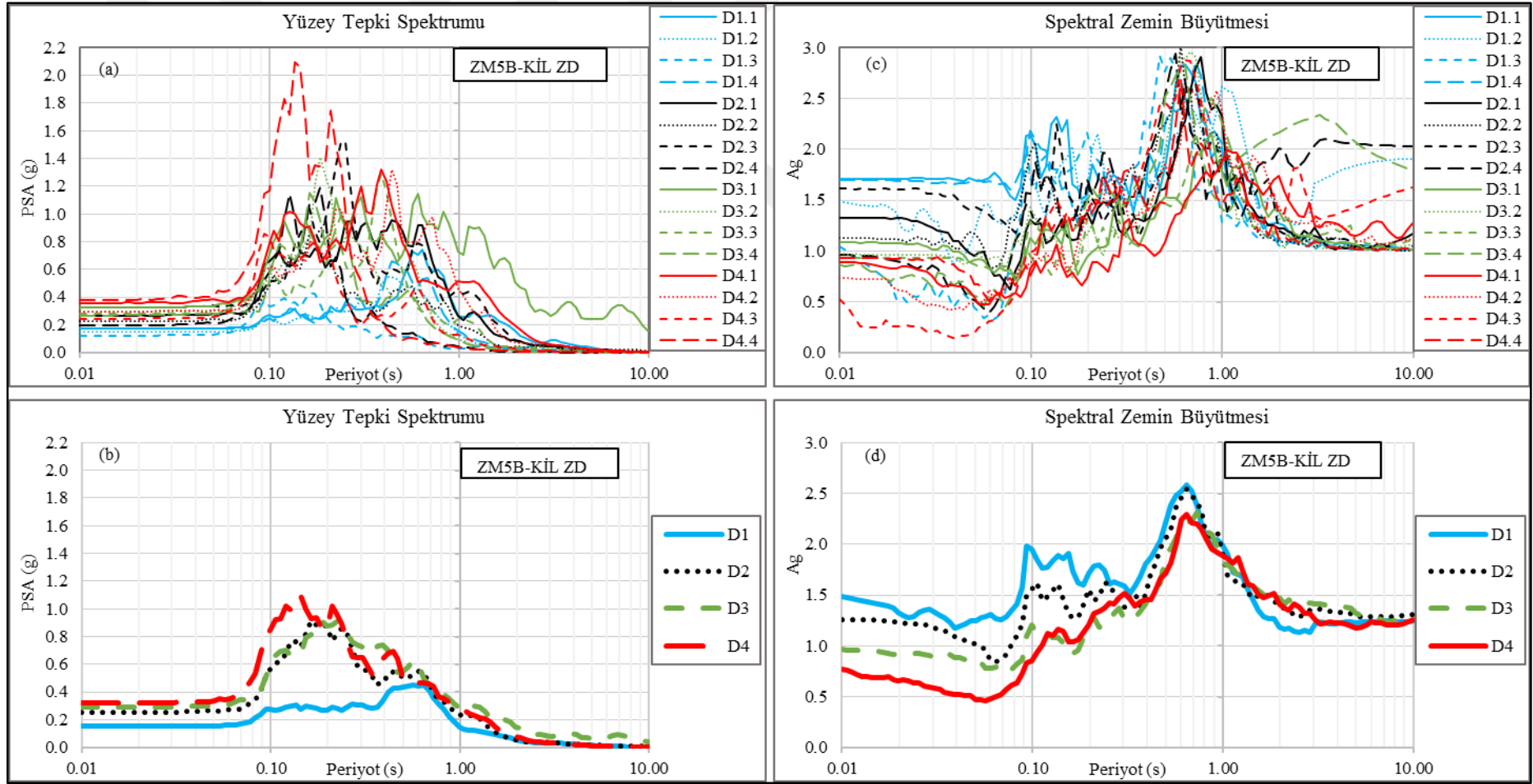
Şekil D.8 (devam) : ZM4 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



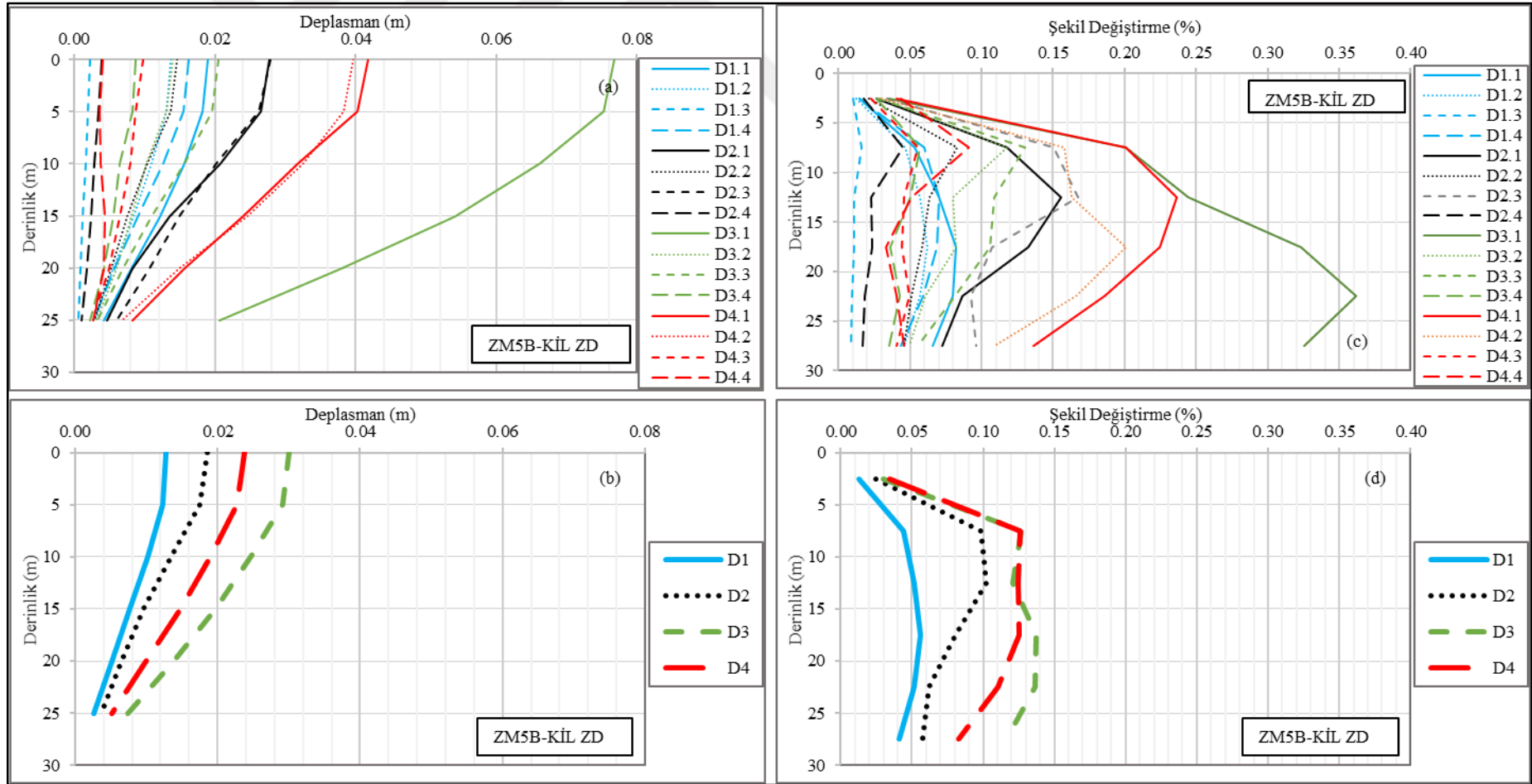
Şekil D.9 : ZM5A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



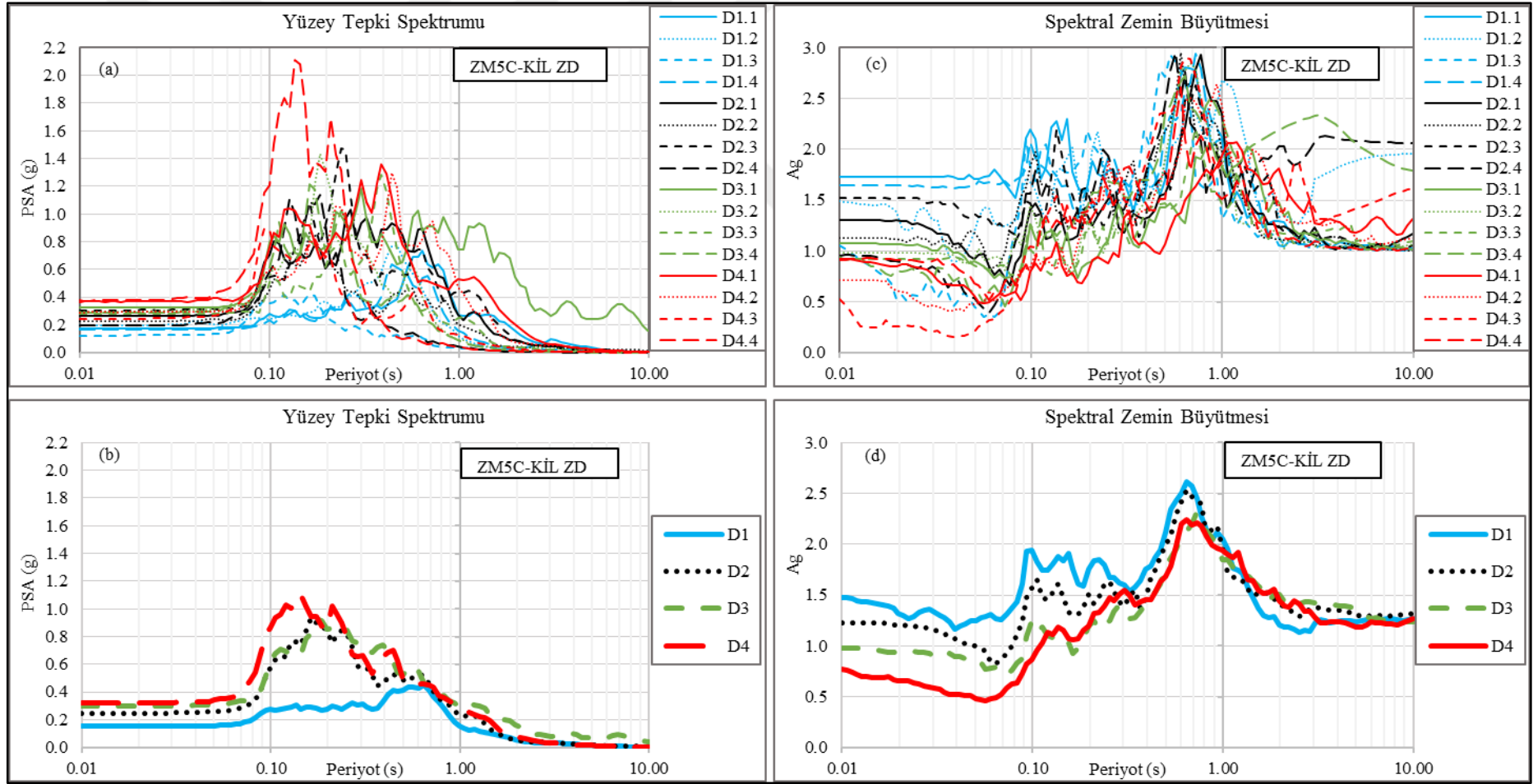
Şekil D.9 (devam) : ZM5A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



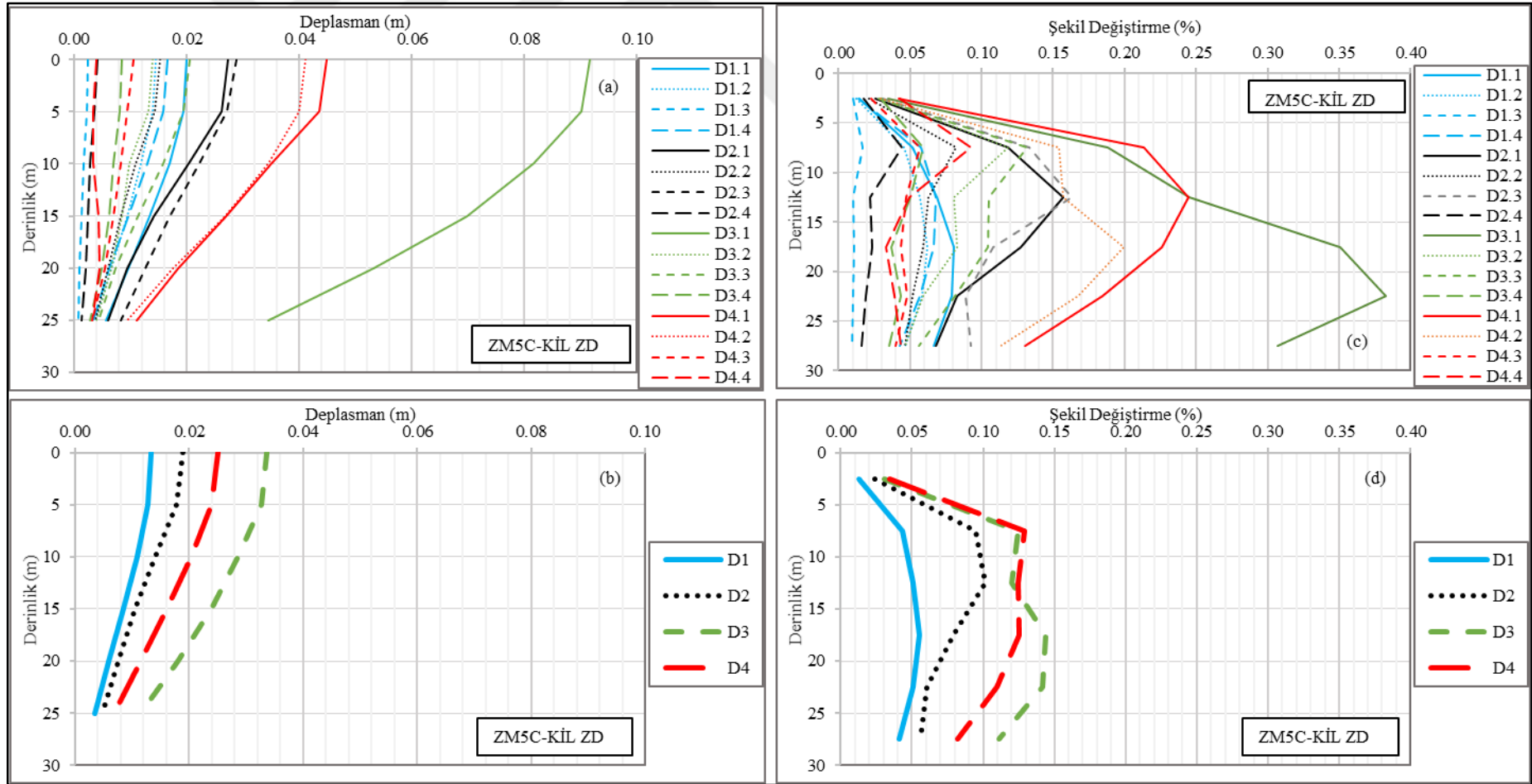
Şekil D.10 : ZM5B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



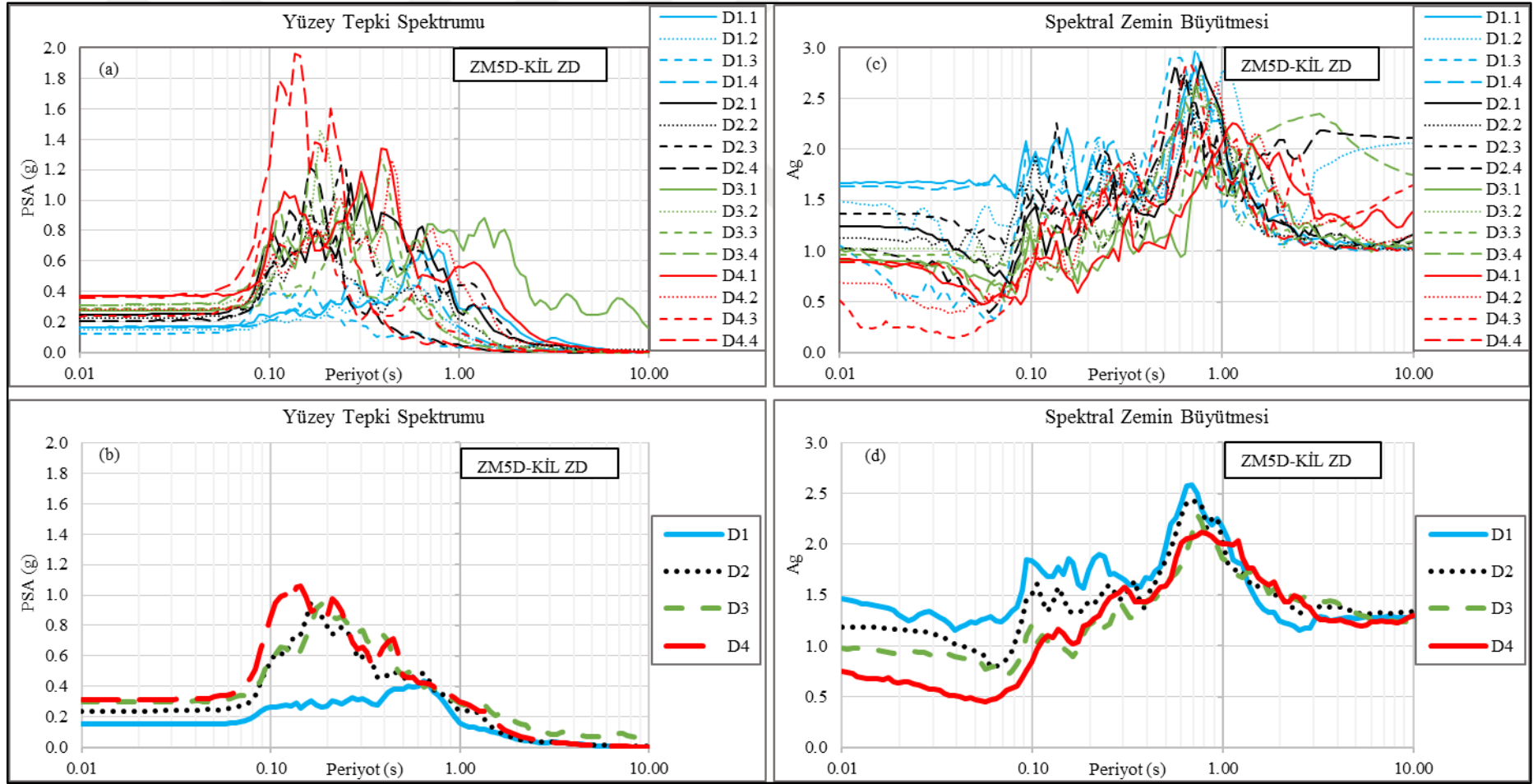
Şekil D.10 (devam) : ZM5B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



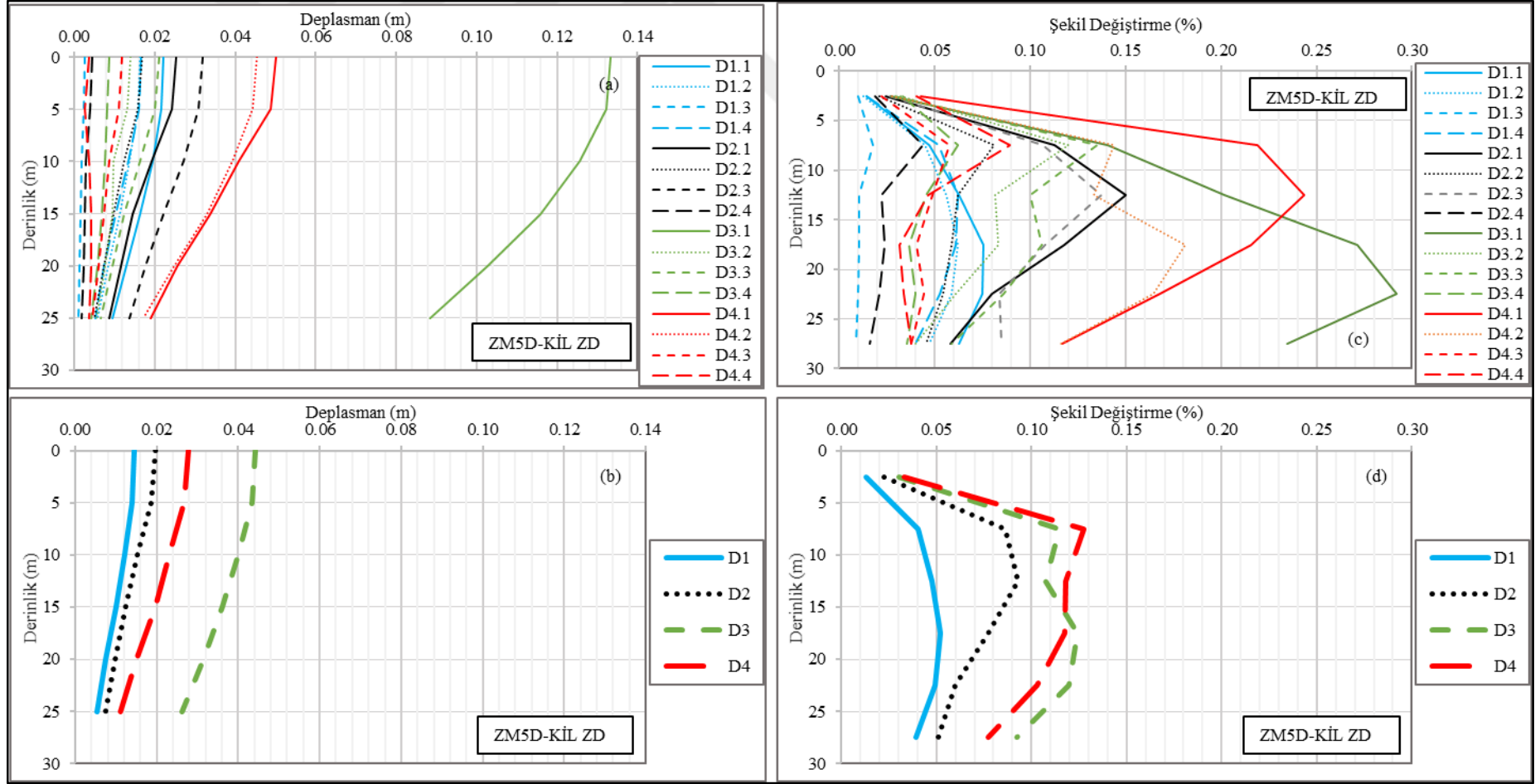
Şekil D.11 : ZM5C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



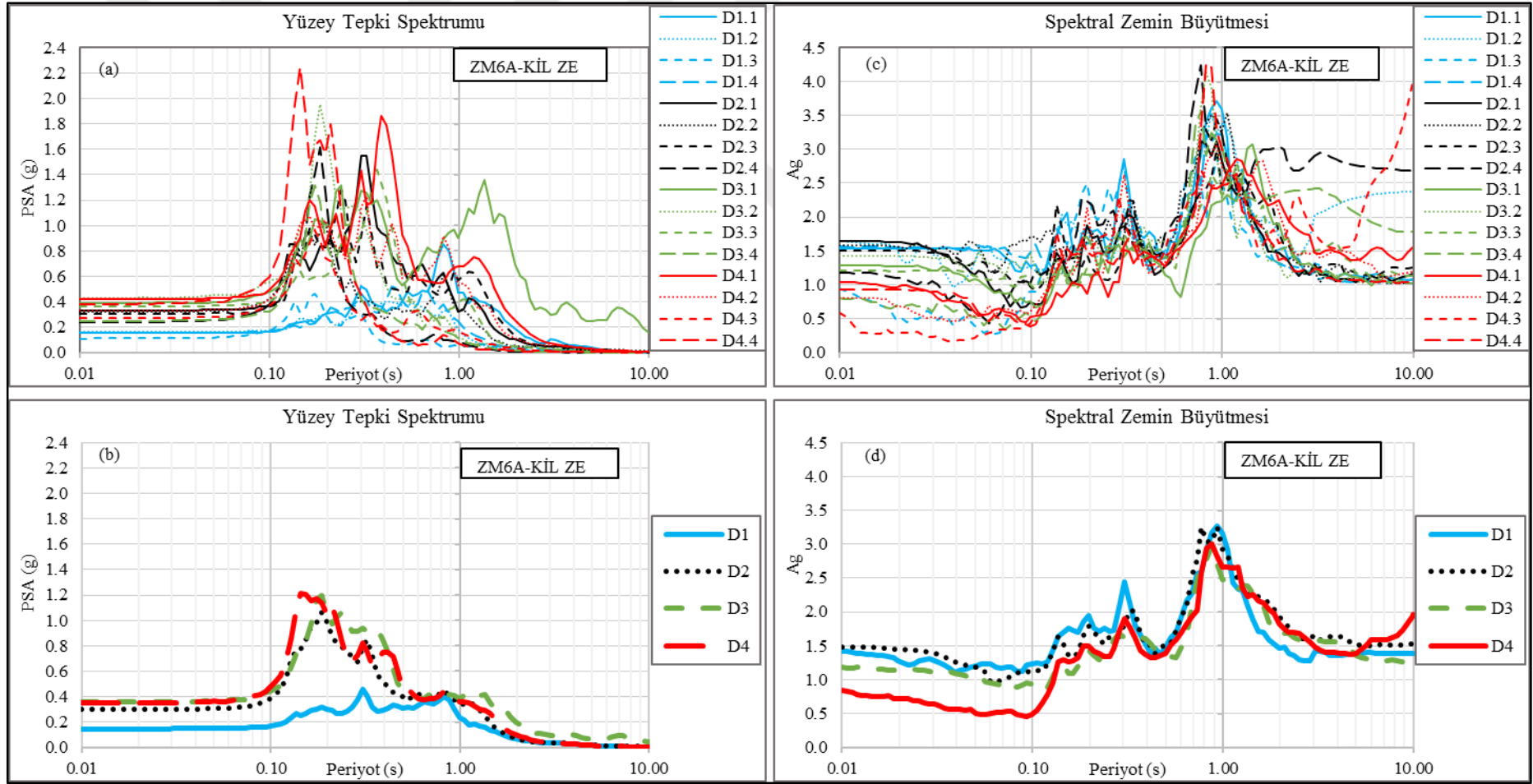
Şekil D.11 (devam) : ZM5C ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



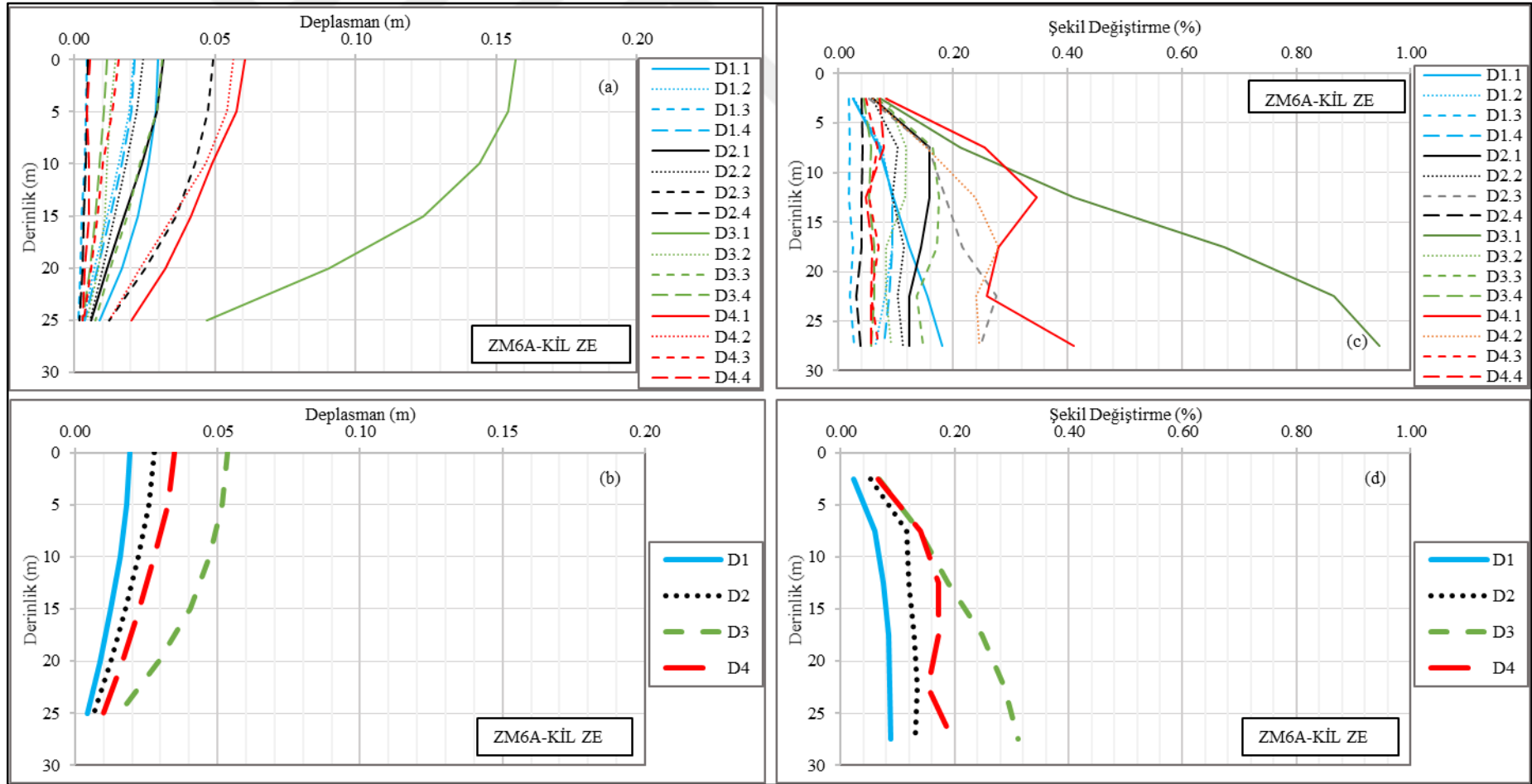
Şekil D.12 : ZM5D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



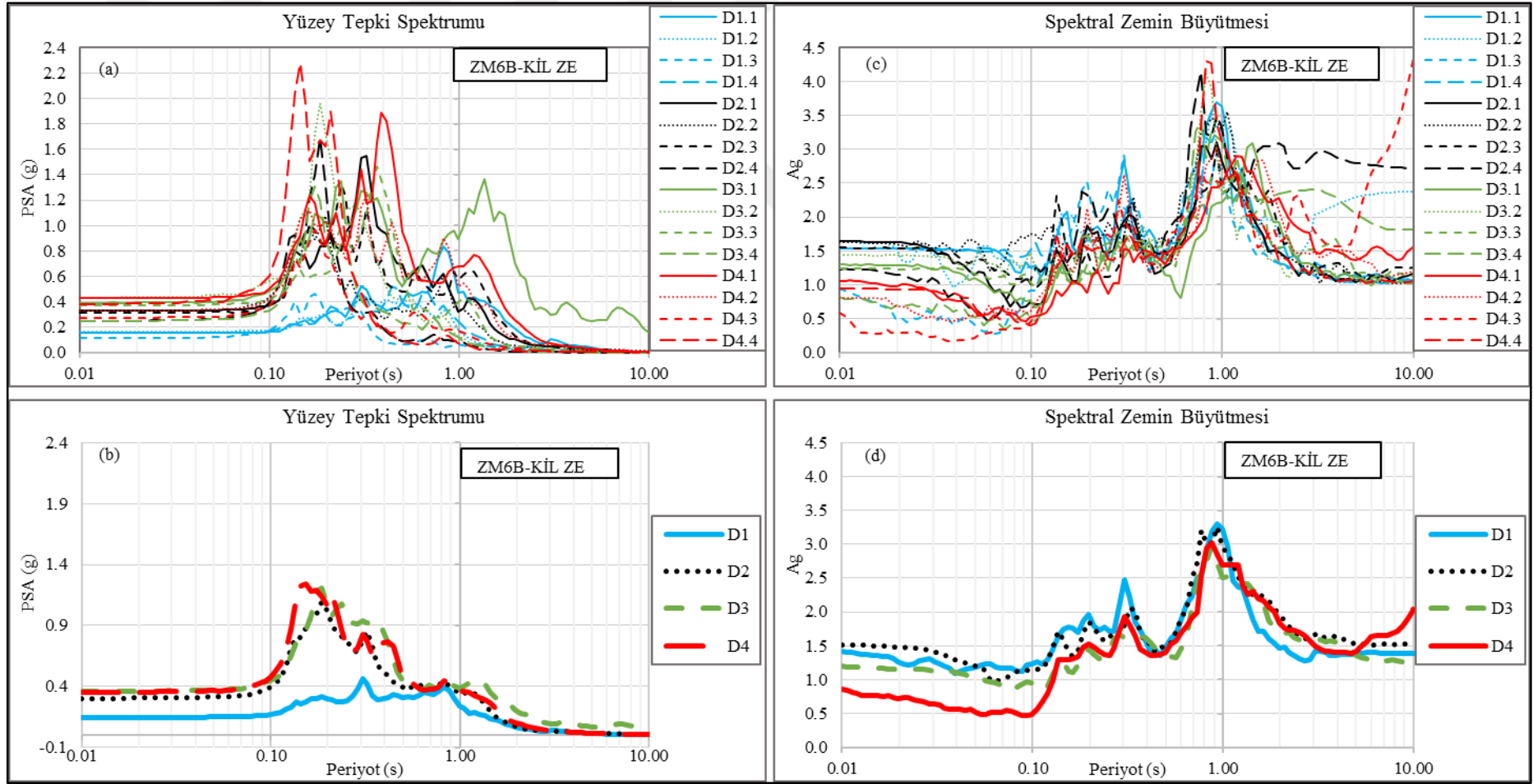
Şekil D.12 (devam) : ZM5D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



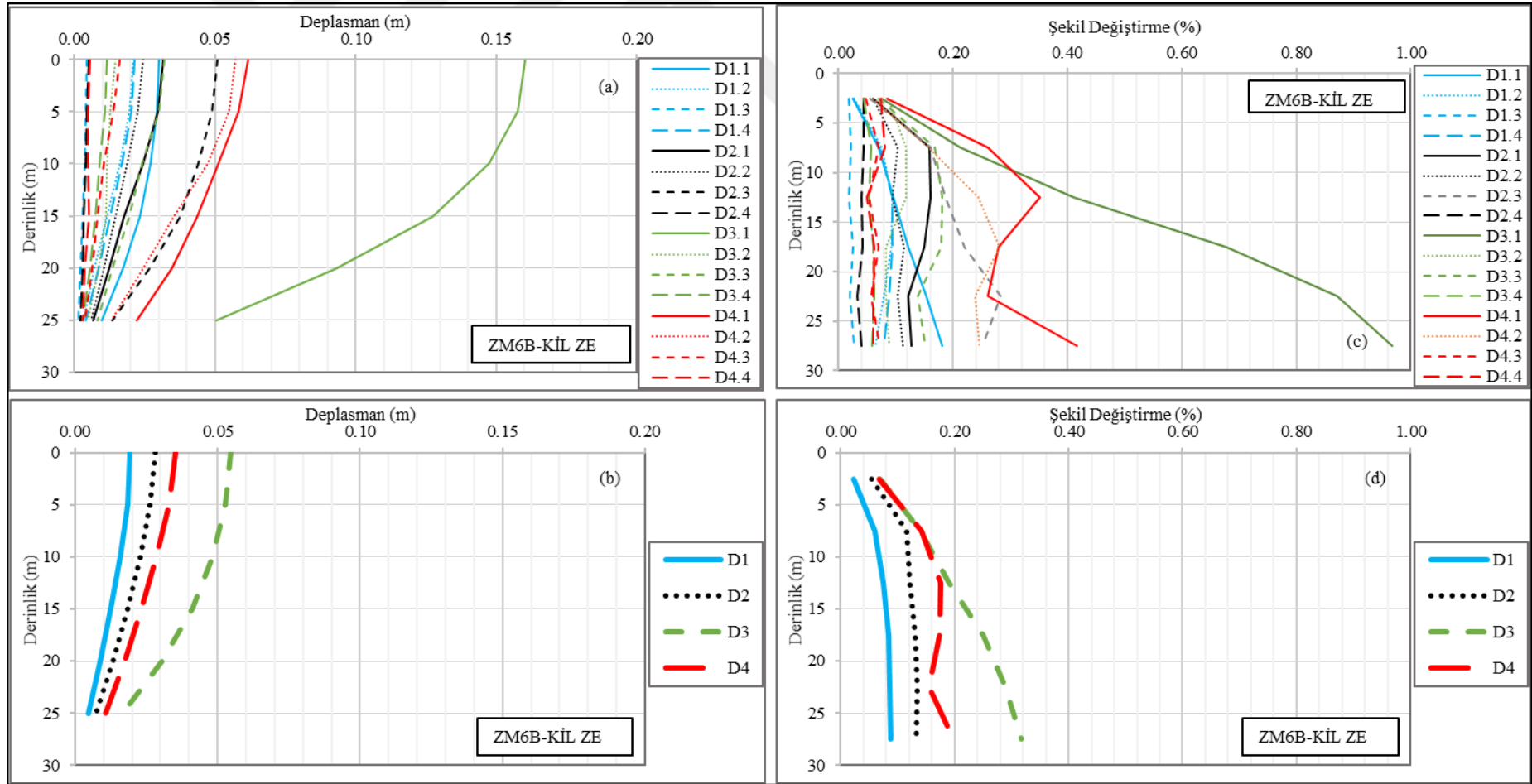
Şekil D.13 : ZM6A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



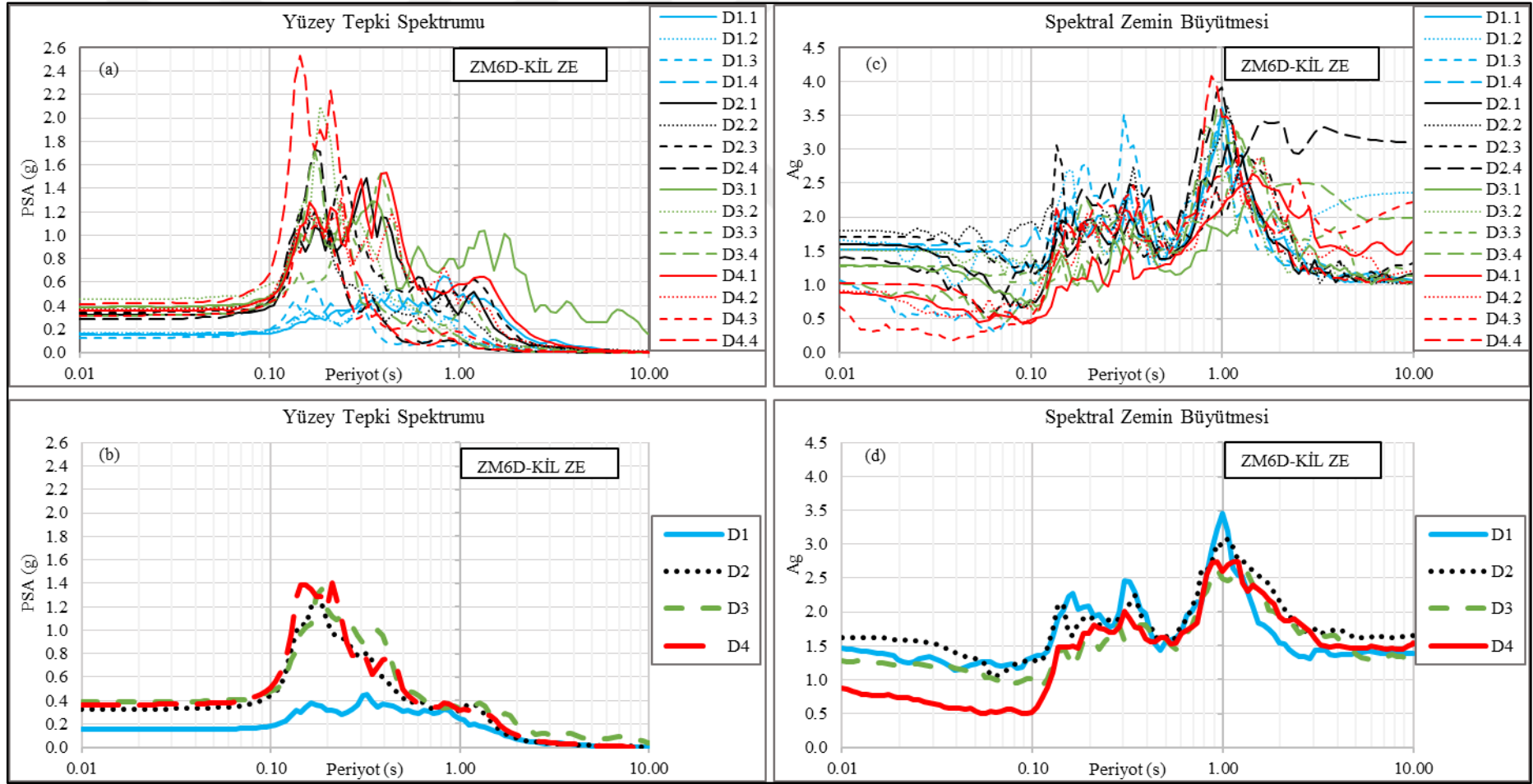
Şekil D.13 (devam) : ZM6A ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



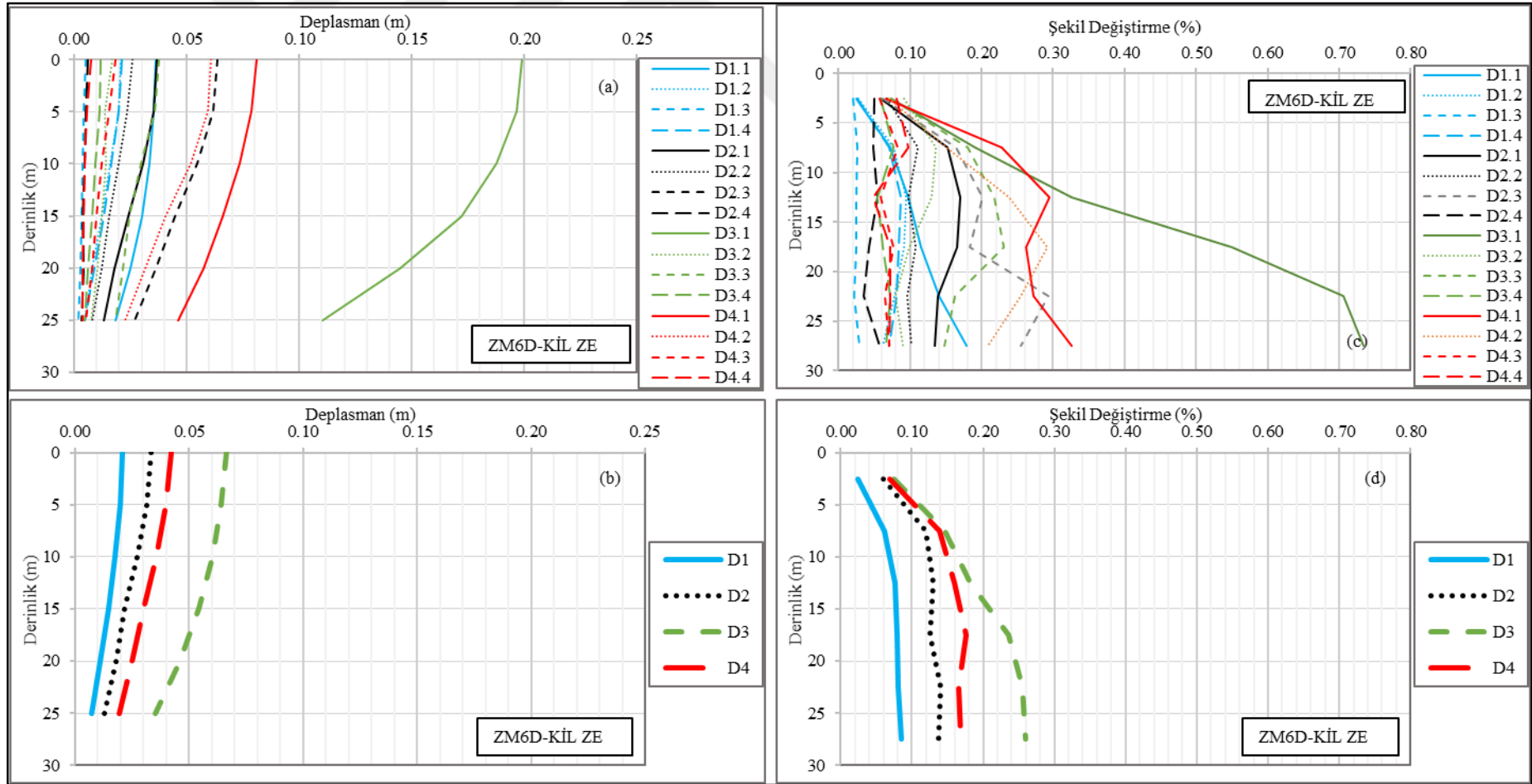
Şekil D.14 : ZM6B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



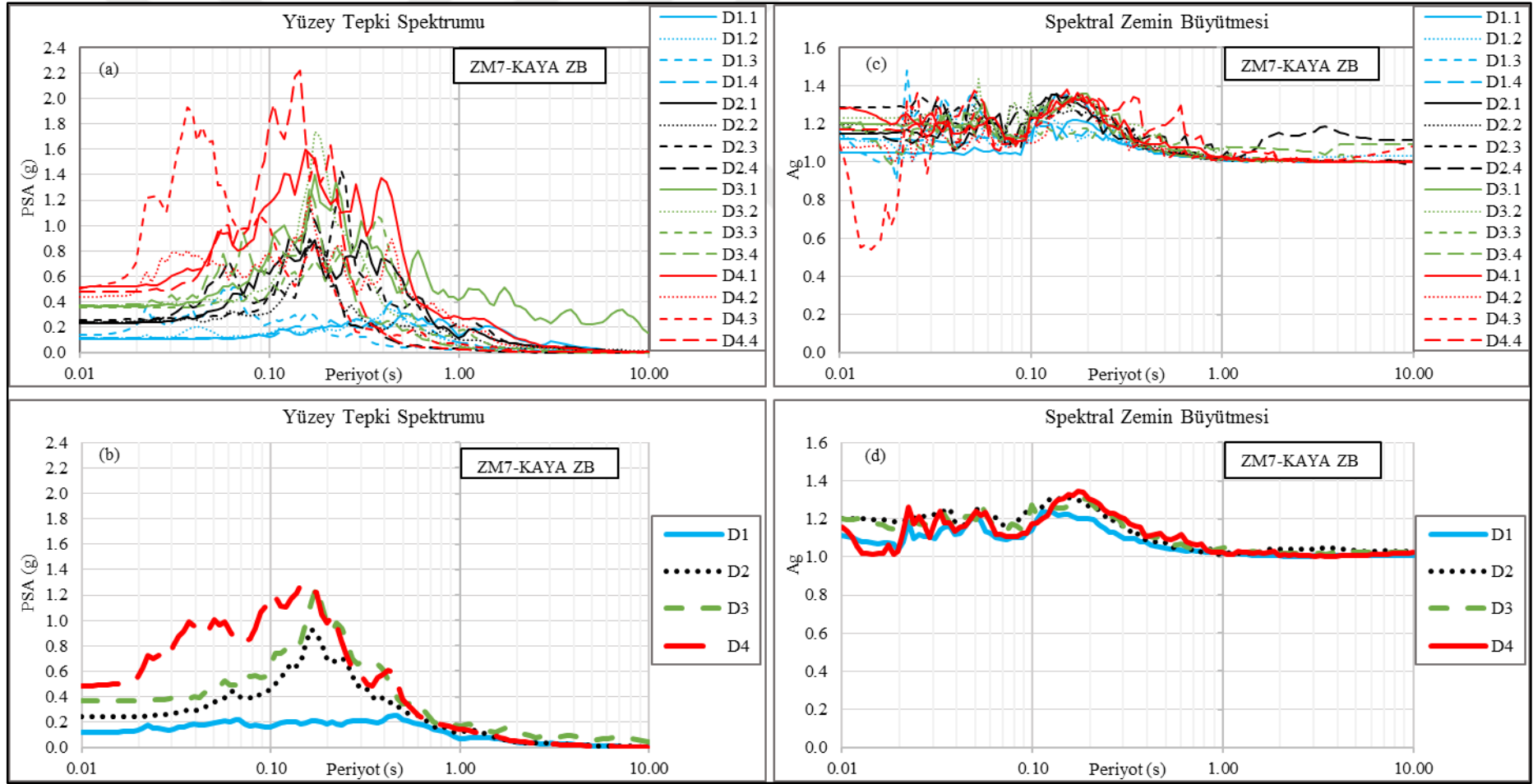
Şekil D.14 (devam) : ZM6B ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



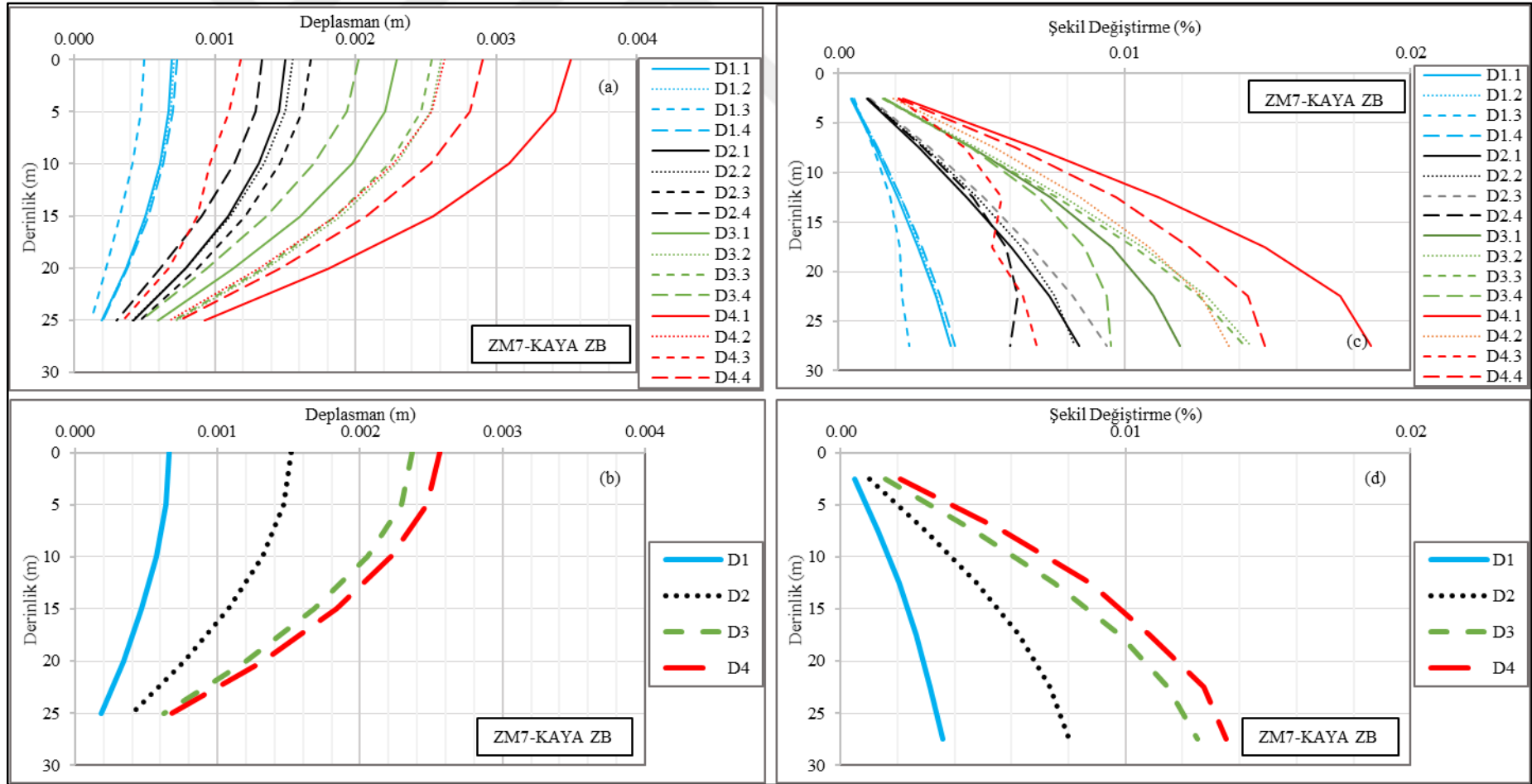
Şekil D.15 : ZM6D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



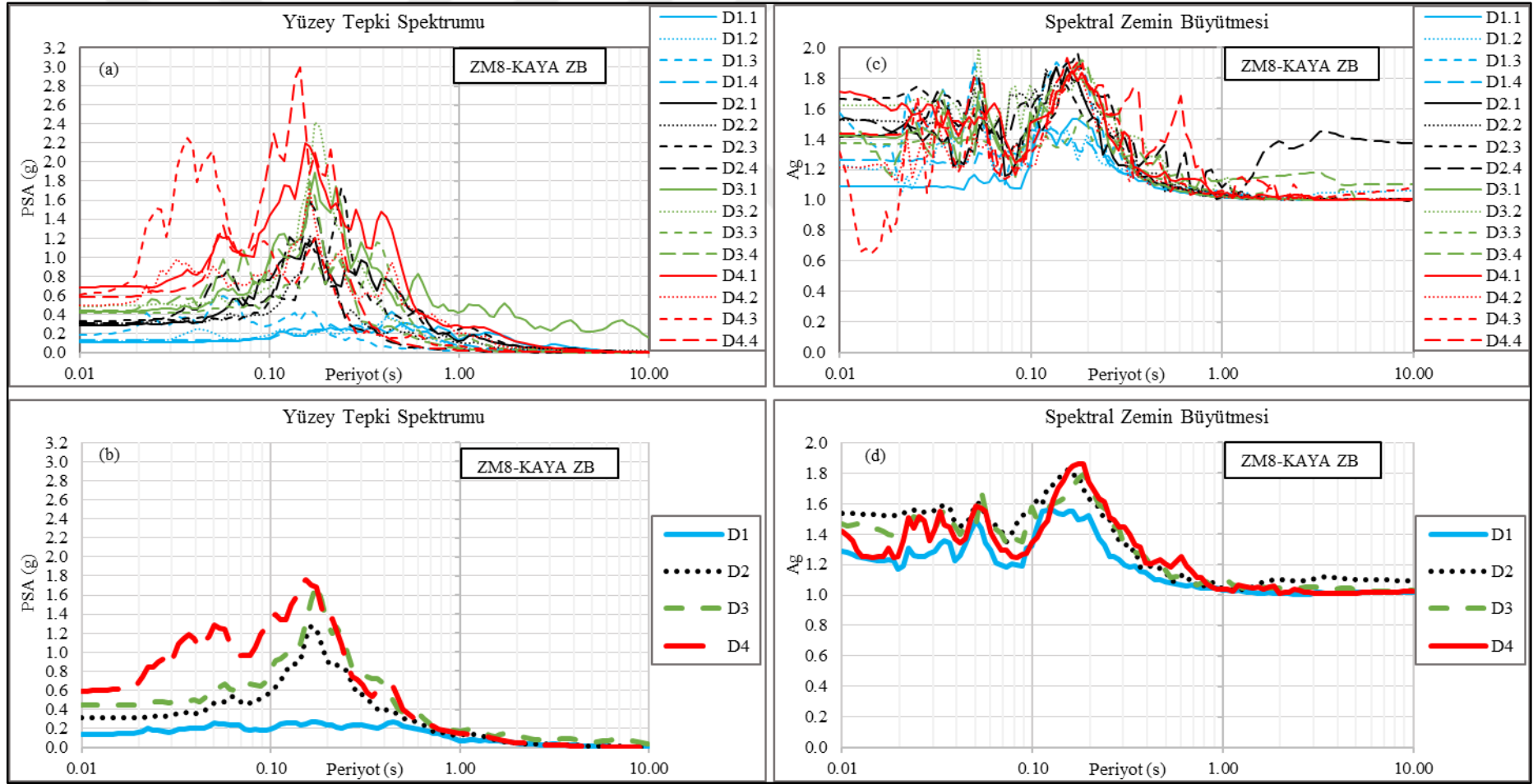
Şekil D.15 (devam) : ZM6D ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



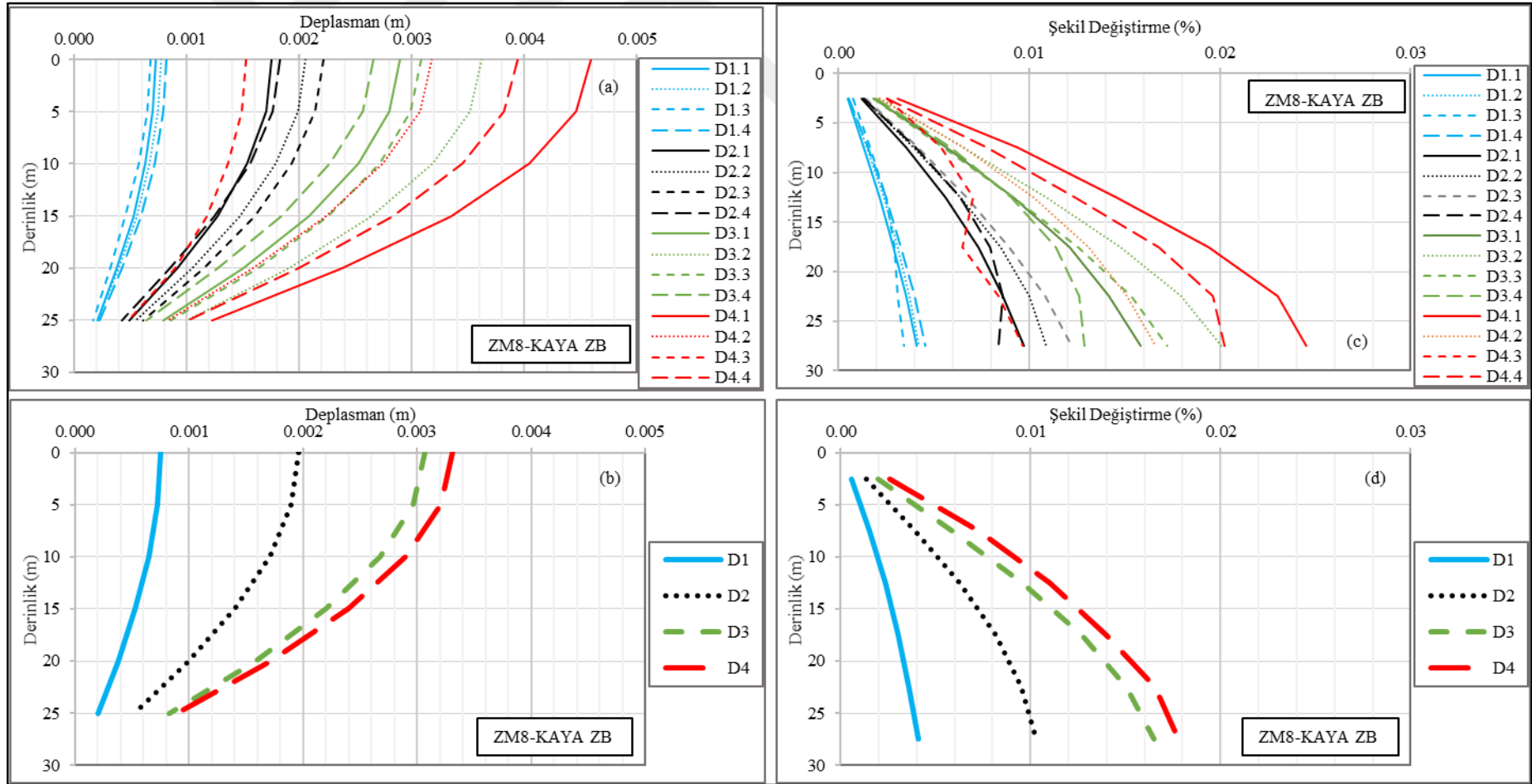
Şekil D.16 : ZM7 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



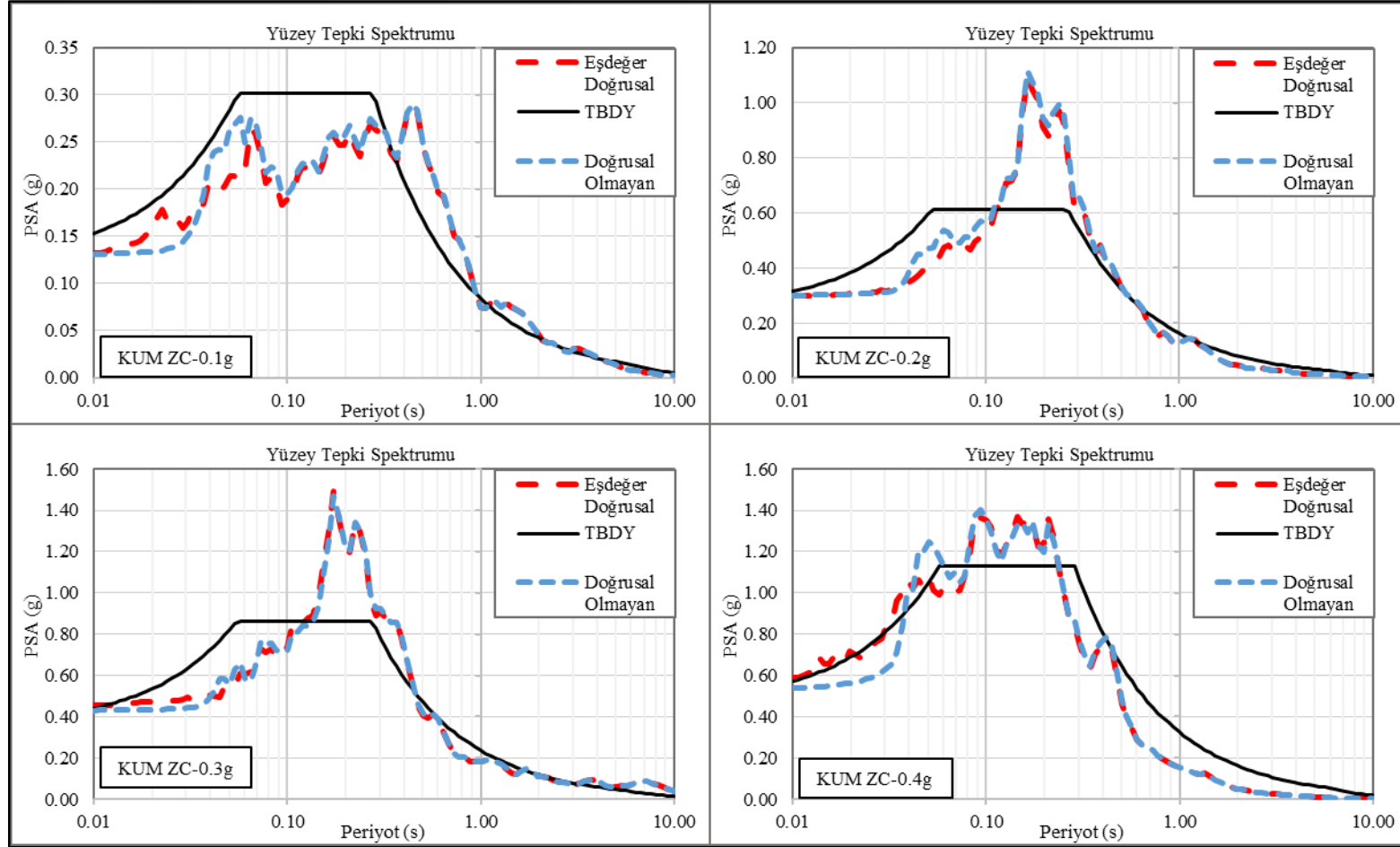
Şekil D.16 (devam) : ZM7 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



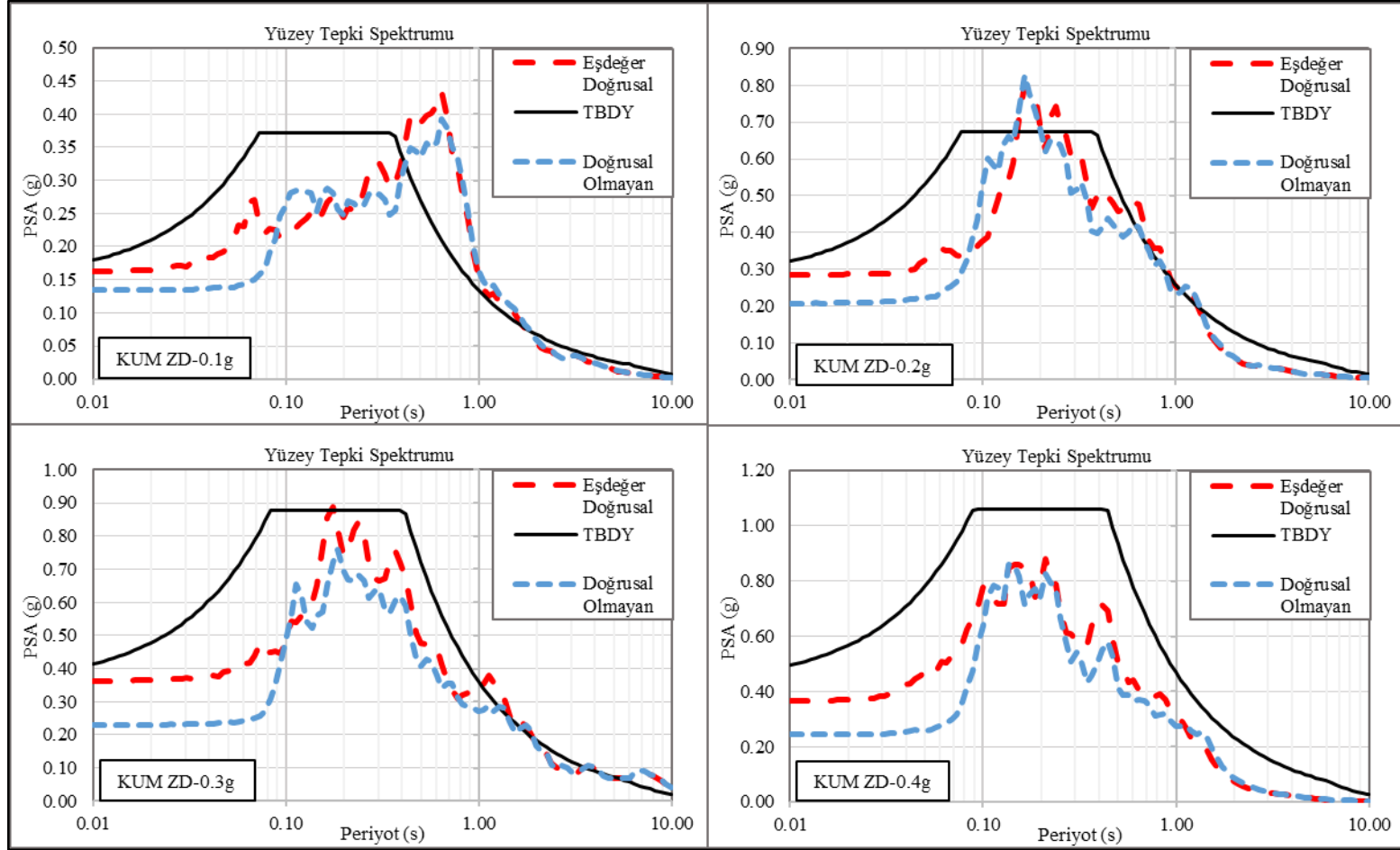
Şekil D.17 : ZM8 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



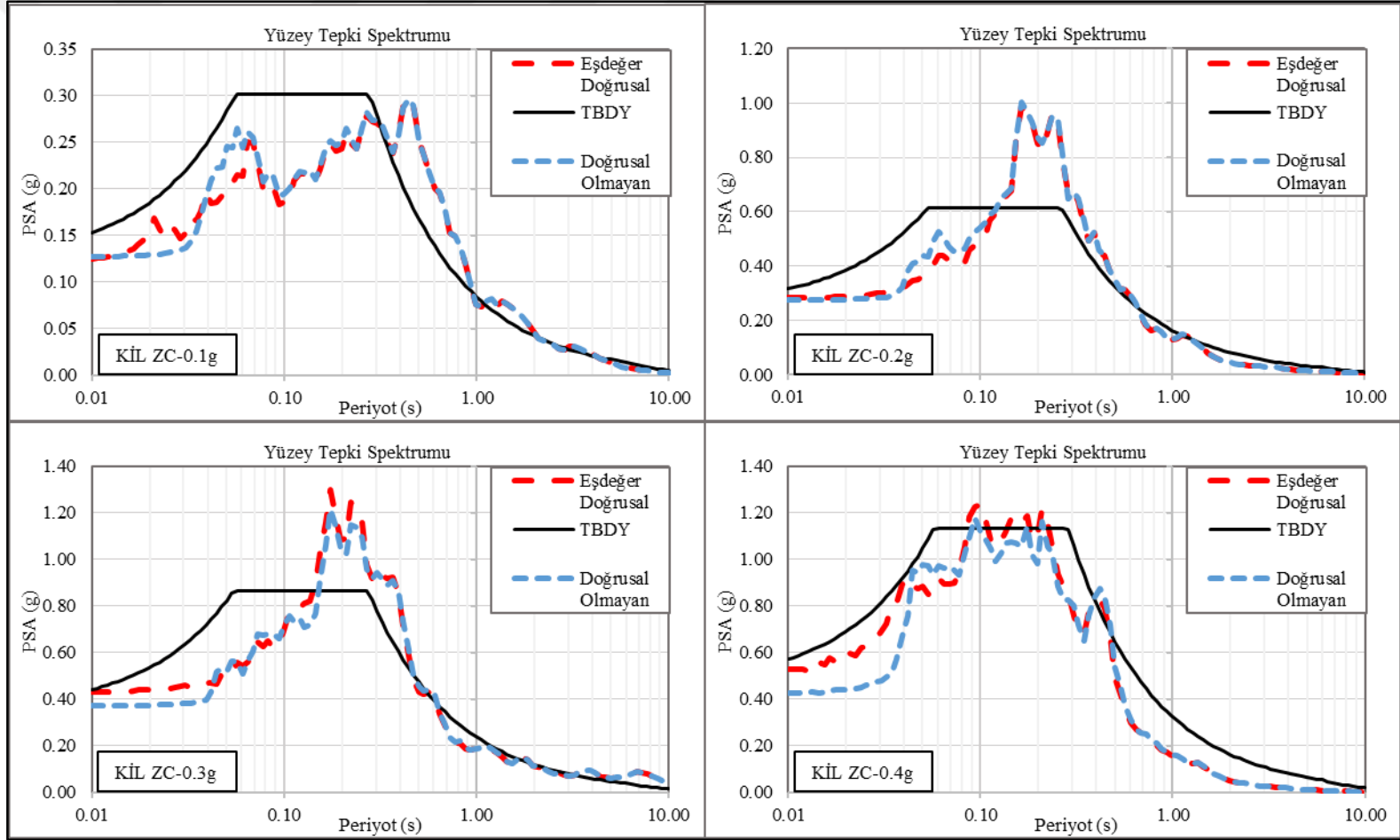
Şekil D.17 (devam) : ZM8 ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçları grafikleri.



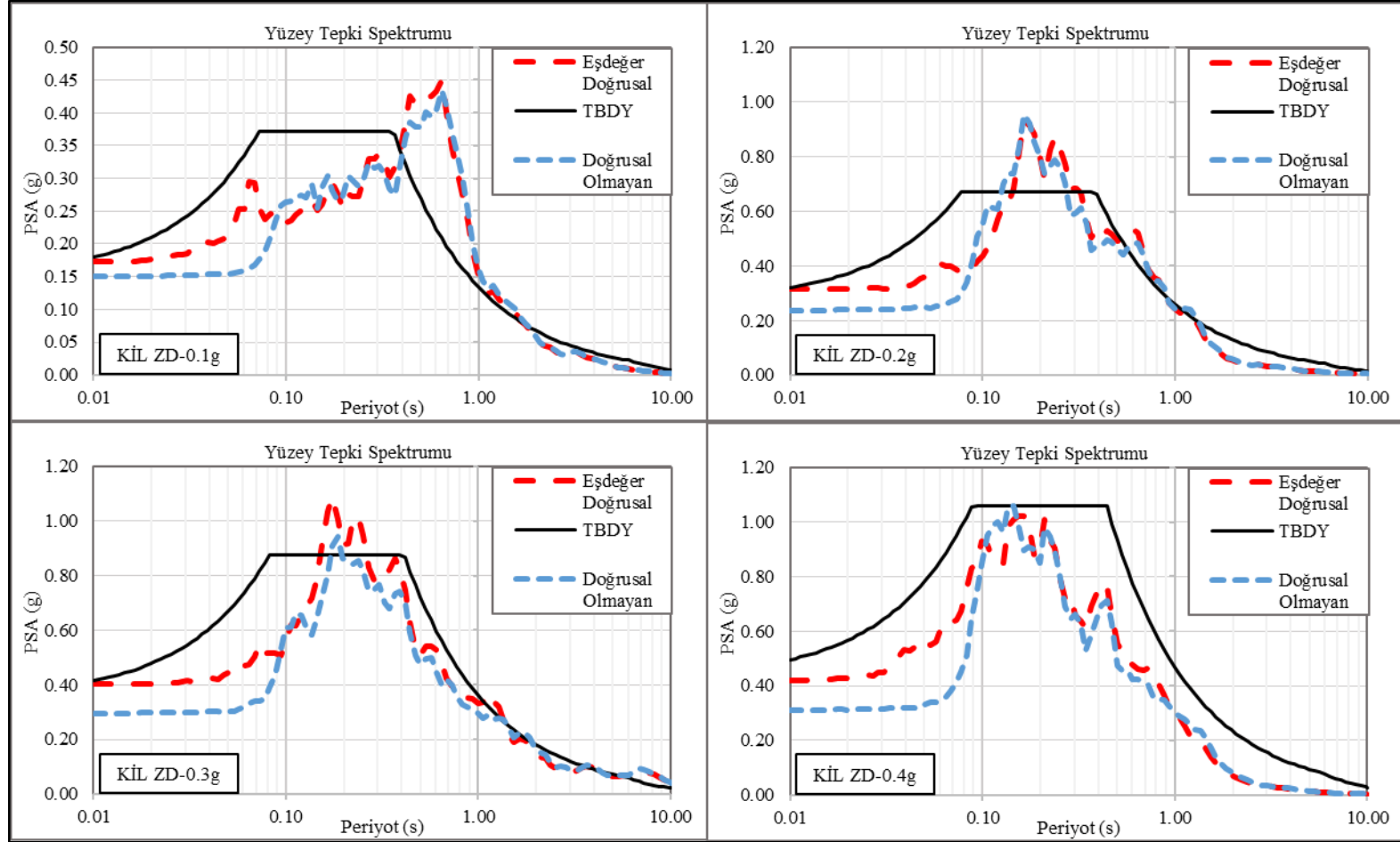
Şekil E.1 : Yerel zemin sınıfı ZC olan kum zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.



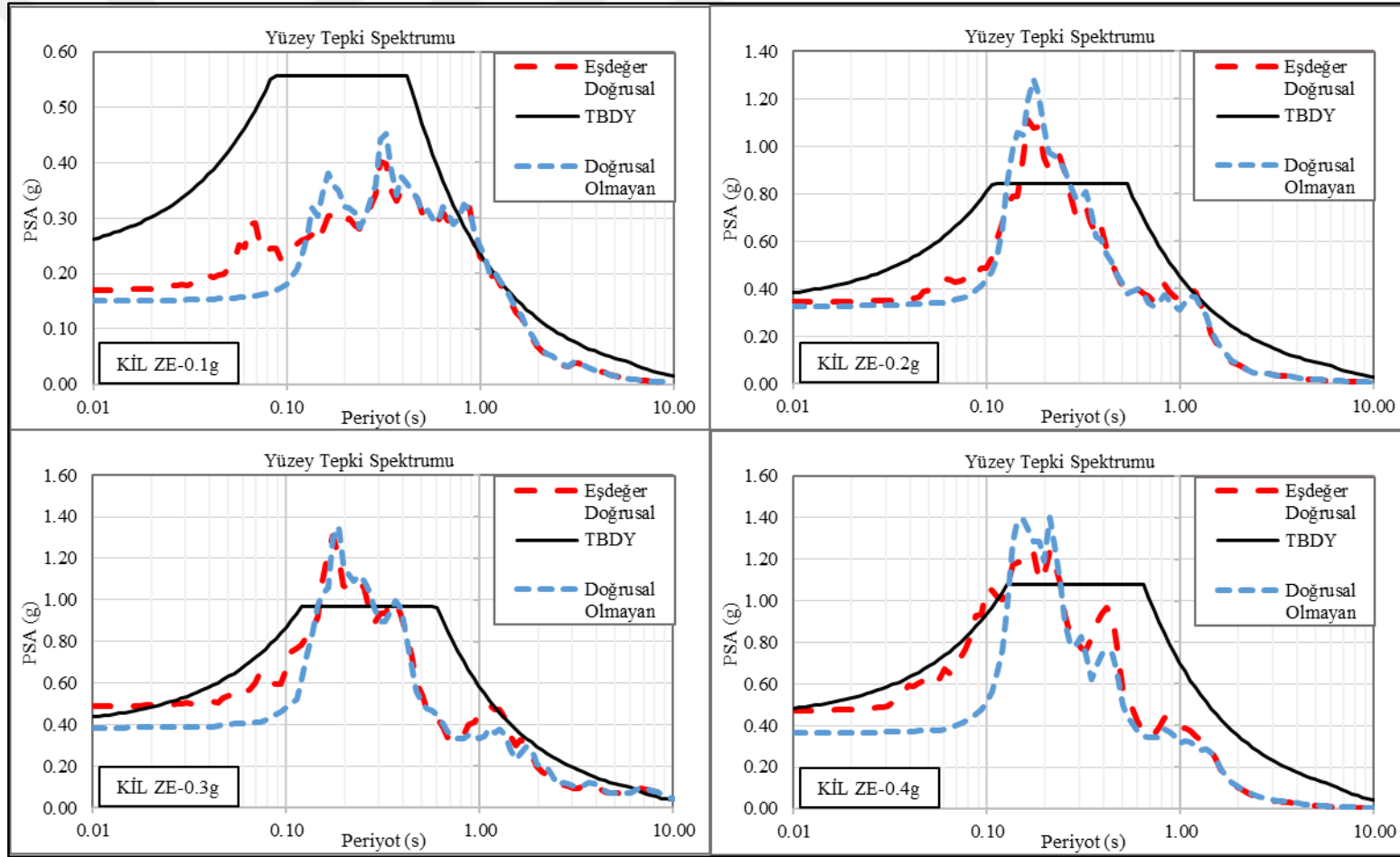
Şekil E.2 : Yerel zemin sınıfı ZD olan kum zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBODY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.



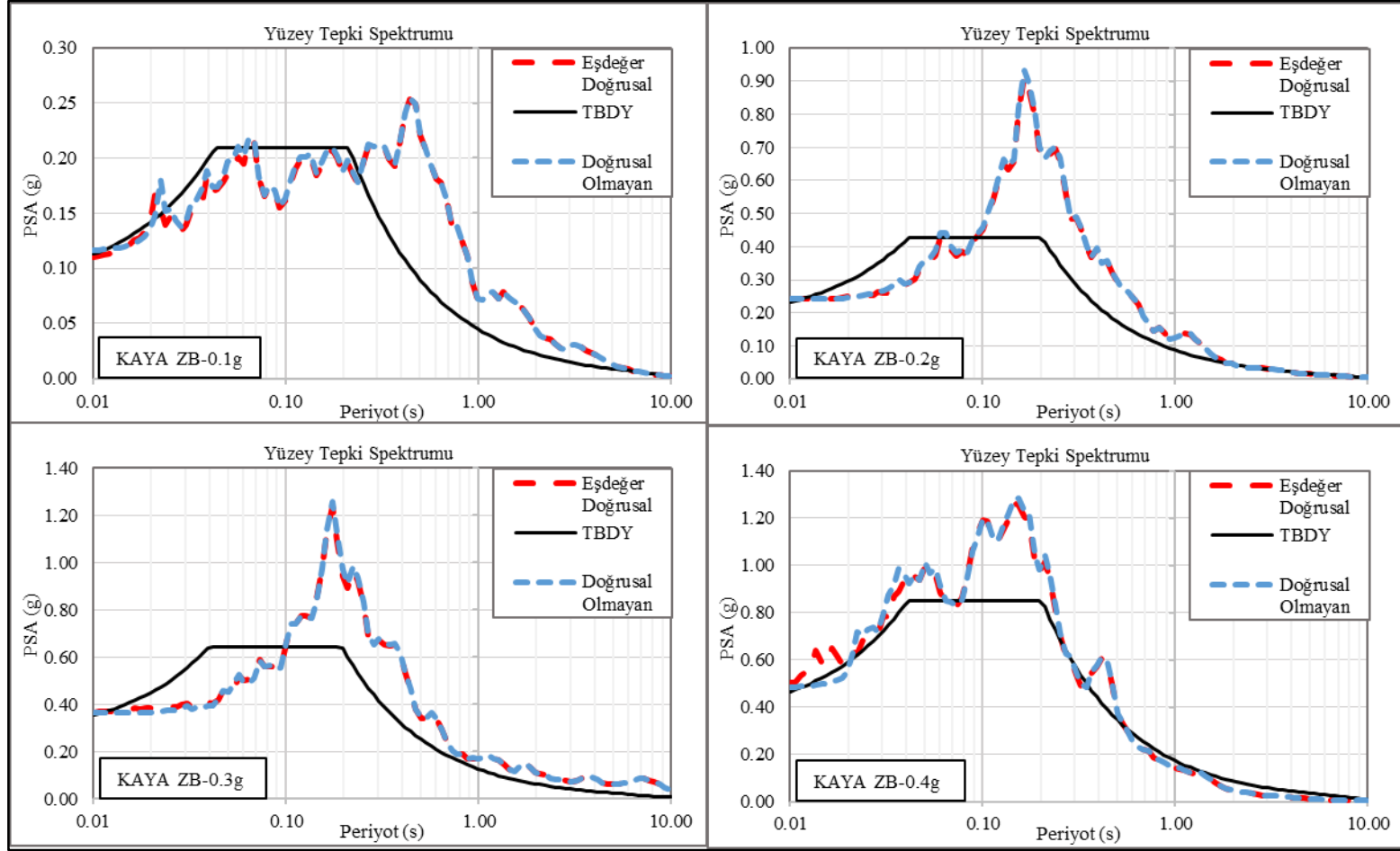
Şekil E.3 : Yerel zemin sınıfı ZC olan kil zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.



Şekil E.4 : Yerel zemin sınıfı ZD olan kil zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBODY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.



Şekil E.5 : Yerel zemin sınıfı ZE olan kil zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.



Şekil E.6 : Yerel zemin sınıfı ZB olan kaya zeminlere ait yüzey tepki spektrumlarının TBDY 2018'e göre belirlenen spektrum ile karşılaştırılması.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Tolgahan Feyizoğlu
Doğum Tarihi ve Yeri : 17.07.1994 İzmir
E-posta : feyizoglutolgahan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği