İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIKILAŞTIRMA İLE SIVILAŞMA RİSKİNİN AZALTILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Onur MAVİTUNA

(501041315)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007

Tez Danışmanı : **Yrd.Doç.Dr. Berrak TEYMUR**

Diğer Jüri Üyeleri **Doç.Dr. Recep İYİSAN**

Yrd.Doç.Dr. Şükrü ÖZÇOBAN (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Öncelikle uzun bir tez çalışması süresi boyunca bana yardım, teşvik ve gayretlerini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmam esnasında karşılaştığım problemlere büyük bir içtenlikle çözüm bulan, kısaca bana her konuda yardımcı olan tez danışmanım Yrd. Doç.Dr. Berrak Teymur'a teşekkür ederim.

İTÜ'de yaptığım bu tez çalışması süresince beni her konuda destekleyen, büyük bir sabır ve anlayış içerisinde olan, maddi-manevi yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve ellerinden gelen tüm gayretleri gösteren değerli aileme buradan sonsuz teşekkürler…

MAYIS, 2007 Onur MAVİTUNA

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **v**

ŞEKİL LİSTESİ **vi**

SEMBOL LİSTESİ **xi**

ÖZET **xiii**

SUMMARY **xiv**

1. GİRİŞ **1**

2. SIVILAŞMA KAVRAMI **3**

2.1 Sıvılaşma Nedir? 3

2.2 Geçmiş Depremlerde Gözlenmiş Olan Sıvılaşmaya Bağlı Hasarlar 5

2.3 Sıvılaşma İle İlgili Tanımlar 6

2.4 Sıvılaşma Mekanizması 7

2.5 Zeminlerin Sıvılaşmaya Karşı Duyarlılığı 11

2.6 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte Sıvılaşma İle İlgili Hükümler 19

3. SIVILAŞMAYI ÖNLEYEN TEKNİKLER **22**

3.1 Dinamik Kompaksiyon 23

3.2 Vibro Sistemler 33

3.2.1 Vibro – Kompaksiyon 38

3.2.2 Vibro – Yerdeğiştirme (Taş Kolon) 40

3.3 Jet - grout 42

3.4 Patlatma 45

3.5 Sıkılaştırma Tekniklerinin Karşılaştırılması 51

3.5.1 Vibro Sistemler 52

3.5.2 Dinamik Kompaksiyon 54

3.5.3 Patlatma 54

4. SIVILAŞMAYI ÖNLEYEN TEKNİKLERİN UYGULANDIĞI VAKA ANALİZLERİ **57**

4.1 Dinamik Kompaksiyon ile Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi 57
4.2 Kompaksiyon Enjeksiyonu Yöntemi İle Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi 61
4.3 Vibro - Yerdeğiştirme (Taş Kolon) Yöntemi İle Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi 64
5. 17 AĞUSTOS 1999 KOCAELİ DEPREMİ VE 13 EYLÜL 1999 ARTÇI DEPREMİ'NİN ANALİZİ İLE SIVILAŞMAYI ÖNLEYEN TEKNİKLERİN ETKİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ 68
5.1 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin Genel Özellikleri 68
5.2 Kocaeli – Adapazarı Bölgesinin Zemin Özellikleri 69
5.3 1999 Kocaeli Depremi Sonrası Adapazarı'nda Sıvılaşmanın İzleri 70
5.4 Eşdeğer-lineer Deprem Tepki Analizi (EERA) Programı ile 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin Analizi 72
5.4.1 EERA Programının Çalışma Prensibi 72
5.4.2 Analizler Öncesi Yapılan Kabuller 75
5.4.3 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin Analizi 86
5.4.3.1 Yarımca Petkim Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz 86
5.4.3.2 Darıca Arçelik Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz 92
5.4.3.3 Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz 98
5.4.3.4 Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz 104
5.4.4 13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin Analizi 110
5.4.4.1 Yarımca Petkim Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz 110
5.4.4.2 Darıca Arçelik Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz 117
5.4.4.3 Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz 123
5.4.4.4 Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz 129
6. SONUÇLAR 135
KAYNAKLAR 145
EKLER 151
ÖZGEÇMİŞ 216

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1	Sıvılaşma duyarlılığının belirlenmesinde Çin kriteri (Andrews ve Martin, 2000) ……...	16
Tablo 2.2	Zemin grupları (1998, 2006 ve 2007 ABYYHY) ……..	20
Tablo 2.3	Yerel zemin sınıfları (1998, 2006 ve 2007 ABYYHY) ……..	20
Tablo 2.4	Spektrum karakteristik periyotları (1998, 2006 ve 2007 ABYYHY) ……...	21
Tablo 3.1	Zemin cinsine bağlı olarak n'nin aldığı farklı değerler …….	29
Tablo 3.2	Çeşitli zeminlerin sıkılaştırılabilmesi için uygulanması gereken enerji miktarları (Lukas, 1986) ……	31
Tablo 3.3	Farklı uygulama ağırlıkları için gerekli kompaksiyon ekipmanı (Lukas, 1986) ……	32
Tablo 3.4	Sık kullanılan vibratörlerin teknik özellikleri (Degen ve Hussin 2001) ……	36
Tablo 4.1	Sahanın zemin profili (Durgunoğlu, 2004) ……	62
Tablo 5.1	Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için tanımlanan Profil A …….	78
Tablo 5.2	Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için tanımlanan Profil B …….	79
Tablo 5.3	Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için tanımlanan Profil C …….	80
Tablo 6.1	17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin analizinin sonuçları	137
Tablo 6.2	13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin analizinin sonuçları …….	140

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	**:** Aynı efektif çevre basıncındaki gevşek ve sıkı kumların birim deformasyon kontrollü üç eksenli deneylerde davranışları ……..	8
Şekil 2.2	**:** Kritik Boşluk Oranı (KBO) eğrisi (aritmetik ve logaritmik eksende) ……	8
Şekil 2.3	**:** Faz Dönüşüm Çizgisi (FDÇ) ……..…….	9
Şekil 2.4	**:** Farklı sıkılıktaki üç numunenin üç eksenli testlerde gerilme – birim deformasyon davranışı ……	10
Şekil 2.5	**:** Üç boyutlu Sabit Durum Çizgisi (SDÇ) ……..	10
Şekil 2.6	**:** Akma sıvılaşması duyarlılığını belirlemede SDÇ ……...	11
Şekil 2.7	**:** Sıvılaşmanın en çok görüldüğü dane çapı aralığı (Ishihara, 1985) ……	12
Şekil 2.8	**:** Gerilme azaltma katsayısının (r_d) derinlik ve deprem büyüklüğü ile değişimi (Idriss ve Boulanger, 2004)	14
Şekil 2.9	**:** M=7,5 depremde temiz kumlarda sıvılaşmaya neden olan DGO ile $N_{1(60)}$ değerleri arasındaki ilişki (Seed ve diğerleri, 1975) …..	15
Şekil 2.10	**:** M=7,5 depremde siltli kumlarda sıvılaşmaya neden olan DGO ile $N_{1(60)}$ değerleri arasındaki ilişki (Seed ve diğerleri, 1975) …..	16
Şekil 2.11	**:** Siltlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını tanımlamada TS 1500/2000 Plastisite Kartının kullanımı ……...	17
Şekil 2.12	**:** Tasarım ivme spektrumu …….	21
Şekil 3.1	**:** Dinamik kompaksiyonun şematik gösterimi (Lukas, 1995) …...	24
Şekil 3.2	**:** Dinamik kompaksiyonla sıkılaştırılmaya uygun dane çapı aralığı (Lukas, 1986) ……	24
Şekil 3.3	**:** Dinamik kompaksiyonun aşamaları (Menard ve Broise, 1975) ..	25
Şekil 3.4	**:** Yüksek enerji ve düşük enerji evrelerinin etkileri (Lukas, 1995)	27
Şekil 3.5	**:** Etki derinliği ve W.H arasındaki ilişki (Mayne, 1984) ……	28
Şekil 3.6	**:** Kompaksiyon noktalarının 3 metre dışında yanal hareketler (Lukas, 1986) ……...	30
Şekil 3.7	**:** Ağırlık ile düşürme yüksekliği arasındaki ilişki (Mayne ve diğerleri, 1984) ……	32
Şekil 3.8	**:** Yarı elastik uzayda bir diskin titreşimi sonucunda yaydığı enerji dalgaları (Wolf ve Song, 1999) ……...	33
Şekil 3.9	**:** Vibro tekniklerin uygulanabildiği dane çapı aralıkları ……...	34
Şekil 3.10	**:** Vibratörün hareket biçimi ……..	34
Şekil 3.11	**:** Kompaksiyon noktalarının planda yerleşimi …….	35
Şekil 3.12	**:** Vibro sistemlerde en çok kullanılan vibratör çeşitleri ……	36
Şekil 3.13	**:** Vibro tekniklerde titreşim etkisiyle zemini sıkılaştıran kuvvetler (Greenwood, 1991) ……..	37
Şekil 3.14	**:** Vibro - Kompaksiyon uygulaması ……..	39
Şekil 3.15	**:** Vibro – Kompaksiyon tekniğinin uygulama aşamaları ……...	39
Şekil 3.16	**:** Vibro - Yerdeğiştirme uygulaması ……..	40

Şekil 3.17 : Vibro – Yerdeğiştirme tekniğinin uygulama aşamaları …….. 41
Şekil 3.18 : Jet-grout ile sıkılaştırılmaya uygun dane çapı aralığı..... 42
Şekil 3.19 : Jet-grout tekniğinin uygulama aşamaları ……..... 43
Şekil 3.20 : SPT ve relatif sıkılık (D_r) arasındaki ilişki (Torrey, 1994) ……. 44
Şekil 3.21 : Patlatmadan hemen sonra görünüm (Mitchell ve Gallagher, 1998) …… 47
Şekil 3.22 : Konik şeklindeki şok dalgasında oluşan kayma gerilmesi (Hryciw, 1986) …… 49
Şekil 3.23 : *a)* Farklı derinliklerdeki 7 patlatmanın yüzeyde yarattığı oturmalar, b) Ön ve son patlamalarla oluşan oturmalar (Kummeneje ve Eide, 1961) …… 51
Şekil 3.24 : Bir Vibro – kompaksiyon uygulaması sırasında kaydedilen data (Degen ve Hussin, 2001) ……. 53
Şekil 4.1 : Çukur alanların ıslah öncesi görünüşü (Durgunoğlu, 2004) ….. 58
Şekil 4.2 : Test bölgesi dinamik kompaksiyon karelajı (Durgunoğlu, 2004) 60
Şekil 4.3 : Yüksek Enerji Kolonu teşkili (Durgunoğlu, 2004) …… 61
Şekil 4.4 : Zemin profili (Düzceer ve Gökalp, 2002) …….. 65
Şekil 4.5 : Akaryakıt tankları için zemin iyileştirme bölgesi (Japanese Geotechnical Society 1998) …….. 66
Şekil 4.6 : Taş Kolon imalatı öncesi ve sonrası yapılan SPT'lerin sonuçları (Düzceer ve Gökalp, 2002) ……. 66
Şekil 5.1 : Adapazarı şehir merkezinin idealleştirilmiş zemin profilleri (Sancio, 2003) ……. 70
Şekil 5.2 : 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nde sıvılaşma sonucu dönen ve oturan binalar (Sancio, 2003) ……. 72
Şekil 5.3 : EERA programı menüsü …… 73
Şekil 5.4 : Analiz için seçilen istasyonların depremin merkez üssüne uzaklıkları ve kaydettikleri pik ivmeler …….. 76
Şekil 5.5 : Analizlerde kullanılan idealleştirilmiş zemin profilleri ……. 77
Şekil 5.6 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma dalgası hızlarının derinlikle değişimi ….. 81
Şekil 5.7 : a) Doğal zemin koşulları için tanımlanan zemin tipi kil (1), b) Sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tanımlanan zemin tipi kil (6) 82
Şekil 5.8 : a) Doğal zemin koşulları için tanımlanan zemin tipi kum (2), b) Sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tanımlanan zemin tipi kum (5)..... 83
Şekil 5.9 : a) Seçilen zemin profillerinin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı (Seed ve diğ., 1975), b) Seçilen zemin profillerinin doğal durumda ve sıkılaştırmadan sonra oturma yüzdeleri (Tokimatsu ve Seed, 1987) ……. 85
Şekil 5.10 : Yarımca Petkim İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği …….. 86
Şekil 5.11 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi..... 87
Şekil 5.12 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi 88

Şekil 5.13 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi …… 89
Şekil 5.14 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi 90
Şekil 5.15 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için) …… 91
Şekil 5.16 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması 91
Şekil 5.17 : Darıca Arçelik İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği 92
Şekil 5.18 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi..... 93
Şekil 5.19 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi 94
Şekil 5.20 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi …… 95
Şekil 5.21 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi 96
Şekil 5.22 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için) …… 97
Şekil 5.23 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması 97
Şekil 5.24 : Bursa Tofaş Fabrikası İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği ……. 98
Şekil 5.25 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi..... 99
Şekil 5.26 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi 100
Şekil 5.27 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi …… 101
Şekil 5.28 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi 102
Şekil 5.29 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için) …… 103
Şekil 5.30 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması 103
Şekil 5.31 : Marmara Ereğlisi Botaş İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği …… 104
Şekil 5.32 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin

koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi..... 105
Şekil 5.33 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi 106
Şekil 5.34 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi …… 107
Şekil 5.35 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi 108
Şekil 5.36 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için) …… 109
Şekil 5.37 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması 109
Şekil 5.38 :Yarımca Petkim İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği 110
Şekil 5.39 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi..... 111
Şekil 5.40 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi 113
Şekil 5.41 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi …… 114
Şekil 5.42 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi 115
Şekil 5.43 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için) …… 116
Şekil 5.44 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması 116
Şekil 5.45 : Darıca Arçelik İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği 117
Şekil 5.46 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi..... 118
Şekil 5.47 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi 119
Şekil 5.48 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi …… 120
Şekil 5.49 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi 121
Şekil 5.50 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için) …… 122
Şekil 5.51 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin

koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması 122
Şekil 5.52 : Bursa Tofaş Fabrikası İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği ……. 123
Şekil 5.53 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi..... 124
Şekil 5.54 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi 125
Şekil 5.55 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi …… 126
Şekil 5.56 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi 127
Şekil 5.57 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için) …… 128
Şekil 5.58 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması 128
Şekil 5.59 : Marmara Ereğlisi Botaş İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği …….. 129
Şekil 5.60 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi..... 130
Şekil 5.61 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi 131
Şekil 5.62 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi …… 132
Şekil 5.63 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi 133
Şekil 5.64 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için) …… 134
Şekil 5.65 : Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması 134

SEMBOL LİSTESİ

a_0 : Boyutsuz Frekans

A_{cp} : Kompaksiyon Noktası Etki Alanı

AE : Uygulanan Enerji

a_{max} : Maksimum Yer Yüzey İvmesi

D_r : Relatif Sıkılık

D : Etki derinliği

Δ_u : Boşluk Suyu Basıncının Değişimi

E : Vibratörün Voltaj İhtiyacı

e_c : Kritik Boşluk Oranı

eff : Elektrik Motorunun Etkinliği

ε_a : Şekil Değiştirme

ε_{rr} : Radyal Şekil Değiştirme

$\varepsilon_{\theta\theta}$: Yanal Şekil Değiştirme

g : Yerçekimi İvmesi

G_s : Özgül Ağırlık

H : Ağırlık düşürme yüksekliği

HN : Hopkinson Sayısı

I : Ortalama Harcanan Güç

NW : Normalize Ağırlık

q : Şekil Değiştirme

Q : Birim Mesafeye Gelen Patlayıcı Ağırlığı

P : Geçiş sayısı

P : Vibratörün Gücü

PF : Barut faktörü

pf : Ortalama Güç Faktörü

R : Patlayıcı Merkezinden Zemin Tabakasına Olan Uzaklık

r_0 : Proctor Tokmağının Çapına Eşit Dinamik Ağırlık Çapı

r_d : Derinliğe Bağlı Azalma Faktörü

S_{su} : Sabit Durum Dayanımı

T_A, T_B : Spektral Karakteristik Periyotları

τ	: Kayma Gerilmesi
τ_{ort}	: Ortalama Eşdeğer Kayma Gerilmesi
τ_{maks}	: Maksimum Kayma Gerilmesi
σ_{vo}'	: Efektif Düşey Gerilme
σ_{vo}	: Toplam Düşey Gerilme
γ_d	: Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık
γ_{dev}	: Deviator Kayma Deformasyonu
w_p	: Plastik Limit
w_L	: Likit Limit
W	: Ağırlık
v_s	: Kayma Dalgası Hızı

SIKILAŞTIRMA İLE SIVILAŞMA RİSKİNİN AZALTILMASI

ÖZET

Sıvılaşmanın insan hayatına ve ekonomiye olan yıkıcı etkilerinden dolayı, bu konuda yapılan araştırmalar günden güne artmakta ve gittikçe önem kazanmaktadır. 1999 Kocaeli Depremi'nden sonra Kocaeli – Adapazarı bölgesinde sıvılaşma hasarlarının yoğun şekilde gözlenmesi, bu konuda yapılacak yeni çalışmaların gerekliliğini ve önemini ortaya koymuştur. Bu konuda bir örnek teşkil edeceği düşünülen bu çalışmada, sıvılaşma mekanizması açıklanmış, sıvılaşmayı önlemede kullanılan sıkılaştırma teknikleri arazi uygulamalarından örnekler verilerek karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın asıl hedefi, sıvılaşmayı önlemede yaygın olarak kullanılan sıkılaştırmanın etkinliğini belirlemektir. Bu amaçla Adapazarı'na ait sıvılaşma potansiyeli yüksek üç farklı zemin profilinde, sıvılaşmaya sebep olan 7.4 büyüklüğündeki 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi ve 5.8 büyüklüğündeki 13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin "Eşdeğer-lineer Deprem Tepki Analizi (EERA)" programı ile analizi yapılmıştır. Analizlerde kullanılan şiddetli yer ivmeleri depremin merkez üssüne farklı mesafelerde bulunan dört deprem istasyonunun bu depremler esnasında tuttuğu kayıtlardan alınmıştır. Seçilen zemin profillerinin önce doğal koşullar için analizleri yapılmış, daha sonra sıkılaştırma ile iyileştirildikleri varsayılarak analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, ivmenin, relatif hızın, relatif yer değiştirmenin, kayma deformasyonun, kayma gerilmesinin, şekil değiştirmenin ve spektral ivmenin sıkılaştırma öncesinde ve sonrasında değişimi elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Son olarak, analiz sonuçları yorumlanarak sıkılaştırmanın etkinliği ortaya konulmuştur.

LIQUEFACTION REMEDIATION BY DENSIFICATION

SUMMARY

Because of the devastating effects of liquefaction phenomenon on human life and economy, research on this subject has increased and is important. After 1999 Kocaeli Earthquake damage due to liquefaction was observed in Adapazarı region which has emphasized the necessity and importance of doing research on this topic. In this thesis, mechanism of liquefaction was explained and densification techniques that are used as liquefaction remediation methods were compared using case histories.

In the scope of this thesis, the aim was to obtain the effectiveness of densification which is widely used for liquefaction remediation. For this purpose, three different highly liquefiable soil profiles which belong to the city of Adapazarı were analyzed using the strong motion data from 1999 Kocaeli Earthquake and its aftershock on September 13th using Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses (EERA) program. 1999 Kocaeli Earthquake and its aftershock had magnitudes of 7.4 and 5.8 respectively. Strong motion data used in analyses was obtained from four different strong motion stations that were located at various distances to the epicentre of earthquakes. Soil profiles were analyzed initially in their natural conditions and then analyzed as densification was done. According to the analysis results, before and after densification, changes in acceleration, relative velocity, relative displacement, shear strain, shear stress, strain and spectral acceleration are compared. The analysis results are evaluated and the effectiveness of densification is discussed.

1. GİRİŞ

Sıvılaşma, geoteknik deprem mühendisliğindeki en önemli, ilginç ve üzerinde en çok tartışılan konulardan biridir. Genel olarak yeraltı su seviyesi altındaki gevşek suya doygun kum ve silt zeminlerde görülen bu olay esnasında, deprem gibi titreşimlere maruz kalan zemin sıkışmaya çalışır ve hacimce azalır, hacimdeki azalma boşluk suyu basıncını arttırır, artan boşluk suyu basıncı başlangıç efektif gerilme değerine ulaştığında, efektif gerilme sıfır olur ve kum taşıyıcılığını kaybederek sıvı gibi davranır. Bu mekanizmanın işleyişi Bölüm 2'de ayrıntılı olarak açıklanmaktır.

Tarihteki birçok büyük depremden sonra izleri görülen sıvılaşma, bu depremler sırasında meydana gelen olayları tanımlamak için kullanılmasına ve Cassagrande tarafından 1936 yılında tanımlanmış olmasına rağmen, önemi ve yıkıcı etkileri ancak 1964 Alaska, ABD ve 1964 Niigata, Japonya depremlerinden sonra tam olarak anlaşılabilmiştir. İki büyük depremde de sıvılaşma sonucu şev kaymaları, köprü ve bina temellerinin göçmesi ve gömülü yapıların yüzmesi şeklinde büyük hasarlar meydana gelmiştir. Bu tarihten sonra Seed ve Idriss önderliğinde başlayan araştırmalar ile birlikte, yaşanan 1971 San Fernando, 1989 Loma Prieta, 1995 Kobe, 1999 Kocaeli, 1999 Chi – Chi, 2005 Pakistan depremleri sıvılaşmanın yıkıcı etkilerini sergilemeye devam etmiş ve bu depremlerin çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmesiyle de literatürde değişik terminolojiler, yöntemler, analiz metodları önerilmiştir. Yaşanan bu büyük depremlerde temel zeminin sıvılaşması neticesinde oturmalar, yanal deplasmanlar ve yanal yayılmalar gözlenmiş ve buna bağlı olarak yapılarda ağır hasarlar meydana gelmiştir. Bölüm 2'de özetlenen bu depremler sıvılaşmaya karşı zemin iyileştirmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Günümüzde birçok zemin iyileştirme tekniği kullanılmasına rağmen, bu tekniklerin sıvılaşmayı önlemede etkinliklerini gösteren çok az sayıda vaka analizi bulunmaktadır

(Boulanger ve diğ., 1997). Geçmiş deneyimler sıkılaştırma, güçlendirme, enjeksiyon – karıştırma ve drenaj gibi zemin iyileştirme tekniklerinin sıvılaşma riskini azalttığını, ancak tamamen ortadan kaldırmadığını göstermektedir. Bu çalışma çerçevesinde sıkılaştırma teknikleri olarak adlandırılan dinamik kompaksiyon, vibro sistemler, patlatma ve jet grout ele alınmış, Bölüm 3'de ayrıntılı olarak incelenerek karşılaştırılmıştır. Bölüm 4'de bu tekniklerin arazi uygulamaları ile ilgili örnekler vaka analizi şeklinde sunulmaktadır.

Bu çalışmanın ana fikri sıvılaşmayı önlemede yaygın olarak kullanılan sıkılaştırmanın etkinliğini belirlemektir. Bu amaçla Bölüm 5'de, 7.4 büyüklüğündeki 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi ve 5.8 büyüklüğündeki 13 Eylül 1999 Artçı Depremi incelenmiş, bu depremler esnasında depremin merkez üssüne farklı mesafelerde bulunan dört deprem istasyonunun kaydettiği ivme verileri kullanılarak "Cyclic 1D" ve "Eşdeğer-lineer Deprem Tepki Analizi (EERA)" programları ile Adapazarı'na ait sıvılaşma görülen üç farklı zemin profilinde doğal zemin ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için analizler yapılmıştır. Analizlere dayanarak sıkılaştırma öncesinde ve sonrasında kayma deformasyonlarının, kayma gerilmelerinin, ivmelerin, relatif hızların, relatif yer değiştirmelerin, şekil değiştirmelerin ve spektral ivmelerin değişimi sayısal olarak ifade edilmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur. Cyclic 1D ve EERA programlarının tüm analizlerde hemen hemen aynı sonuçları vermesi nedeniyle, burada sadece EERA'nın sonuçları sunulmuştur.

2. SIVILAŞMA KAVRAMI

2.1 Sıvılaşma Nedir?

Sıvılaşma üzerinde çalışan ilk bilim adamı Cassagrande'dir. Cassagrande 1940'da yaptığı çalışmalar sırasında sıvılaşma terimini kullanmamış olsa da, dolgu ve şevlerin stabilitesini etkileyen kohezyonsuz zeminlerin karakteristik özelliklerini tanımlayarak, sıvılaşma mekanizmasını açıklamıştır. Cassagrande gevşek suya doygun kumların yüklemeyle yapısının bozulduğunu ve hızla deformasyona uğradıklarını bulmuştur. Cassagrande' nin ulaştığı sıvılaşmayı tanımlayan sonuçlardan birisi de şöyledir: Gevşek haldeki birçok kohezyonsuz zeminin sıkılığı, onların kritik sıkılığından düşüktür. Birçok zemin gevşek haldeyken sürekli deformasyona maruz kaldığında hacim azalması göstermektedir. Eğer zemin boşlukları suyla doluysa ve bu su deformasyon sırasında dışarı çıkamıyorsa, uygulanan yükün bir kısmı geçici olarak suya transfer olur ve bunun sonucunda kayma açısının azalması ile zeminin stabilitesi bozulur ve akma meydana gelir (Abdel ve Farag, 2000).

Terzaghi ve Peck 1948'de yükleme esnasında gevşek suya doygun zeminlerin aniden akışkan sıvı gibi davranmasını *anlık sıvılaşma* olarak tanımlamışlardır. *Sıvılaşma* terimi tarihsel olarak ilk defa 1953'de Mogami ve Kubo tarafından, kohezyonsuz zeminlerde drenajsız şartlardaki statik, dengesiz ve tekrarlamalı örselenmeden kaynaklanan zemin deformasyonları ile ilgili değişik olayları nitelemek için kullanılmıştır. Sıvılaşmanın varlığı geçmişte yaşanan birçok depremden sonra gözlense de, bu konuda sistematik çalışmalar ancak 1964'de meydana gelen büyük Alaska ve Niigata Depremlerinde olayın yıkıcı etkisinin bilim çevrelerinde yankı uyandırmasından sonra başlamıştır. İki depremde de heyelanlar, köprü ve yapı temellerindeki taşıma gücü kayıpları ve gömülü yapıların yüzmesi gibi sıvılaşma sonucu oluşan hasarların en belirgin örnekleri

gözlenmiştir. Bu tarihten sonra çok sayıda araştırmacı yaptıkları incelemelere dayanarak sıvılaşmayı tanımlamışlardır (Tao, 2003).

Seed ve Idriss 1982'de sıvılaşmanın en güncel tanımını vermişlerdir. Bu tanıma göre; eğer gevşek suya doygun bir kum zemin deprem, patlama ya da okyanus dalgaları gibi zemin titreşimlerine maruz kalırsa, sıkışmaya çalışır ve hacmi azalır. Hacimdeki bu azalma, boşluk suyu basıncını arttırır ve artan boşluk suyu basıncı başlangıç efektif gerilme değerine ulaşırsa, efektif gerilme sıfır olur ve kum taşıyıcılığını kaybederek sıvı gibi davranır. Zemin dayanımı üstünde bulunan yapıyı taşıyamayacak kadar düşer ve yapıda aşırı hareketler oluşarak oturmalar meydana gelir. Sıvılaşmış zemindeki boşluk suyu basıncı kum kaynaması yoluyla, yanal hareketlerle ya da çatlamalarla sıvılaşan zemini yüzeye taşıyabilir. Suya doygun gevşek kumlarda görülen bu sismik olay kentsel alanlarda çok büyük hasarlara sebep olur.

Ishihara 1985'de sıvılaşmayı şu şekilde tanımlamıştır: "Yer sarsıntısı ve suyun yukarı doğru akışı nedeniyle yüksek boşluk suyu basınçlarının gelişimi, kumu 'sıvılaşma' diye adlandırılan bir duruma dönüştürür. Sıvılaşma durumunda efektif gerilme sıfırdır ve zemin daneleri birbiri ile teması kaybetmiş şekilde su içinde yüzer."

Erken ve Ansal (1994) sıvılaşma kavramını, "Yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu, diğer bir deyişle suya doygun kum tabakalarında, depremler sırasında boşluk suyu basınçlarının artması sıvılaşma olarak tanımlanan bir olaya yol açmaktadır. Böyle bir durumda kum tabakası, kısa bir süre için viskoz bir sıvı haline dönüşmekte ve bu tabakaya oturan bütün yapılarda büyük oturmalar, tabakanın içinde bulunan su ve yakıt depoları gibi yapılarda ise yüzeye doğru hareketler, şevlerde ise kaymalar meydana gelebilmektedir" şeklinde tanımlamışlardır.

2.2 Geçmiş Depremlerde Gözlenmiş Olan Sıvılaşmaya Bağlı Hasarlar

9.2 büyüklüğündeki 1964 Alaska depremi sıvılaşma ve heyelan şeklinde büyük hasarlara yol açmıştır. Bu sismik olay yalnızca en büyük 2. deprem olmasıyla değil aynı zamanda 3 dakikalık süresi ve 800.000 km^2 lik alanı etkilemesi ile kayıtlara geçmiştir. Ana kum tabakalarında ve kil tabakaları arasındaki kum bantlarında meydana gelen sıvılaşma deprem sırasında yıkıcı heyelanlara sebep olmuştur. Kum bantlarındaki sıvılaşma kil tabakasının dayanımını düşürmüştür (Seed, 1973). 7.5 büyüklüğündeki 1964 Niigata depremi bölgedeki birçok yapıya hasar vermiştir. Hasar özellikle gevşek, suya doygun zeminler üzerindeki yapılarda görülmüştür. Depremin arkasından gelen tsunami kıyıdaki yapılara hasar vermiştir. Shinano Nehri Kıyısında büyük zemin haraketleri gözlenmiş, zeminin taşıma gücünün kaybolması nedeniyle Kawagishi – Cho Binaları dönmüş ancak yapısal hasar meydana gelmemiştir. Niigata'nın birçok yerinde kum kaynaması görülmüştür. Yanal deformasyonlar Showa Köprüsü'nün taşıyıcı ayaklarının ayrılmasına sebep olmuş ve köprü çökmüştür (Kramer, 1996).

6.6 büyüklüğündeki 1971 San Fernando Depremi sıvılaşmaya sebep olmuş ve Aşağı San Fernando Barajı'nın dolguları göçmüş, Yukarı San Fernando Barajı'nda ise büyük deformasyonlar oluşmuştur. 7.1 büyüklüğündeki 1989 Loma Prieta Depremi deprem merkezi olan Santa Cruz'da büyük hasar meydana getirdiği gibi daha uzaktaki San Francisco ve Oakland'ı da etkilemiştir. Suya doygun gevşek kumların bulunduğu liman alanında sıvılaşma liman yapılarına ve gömülü borulara hasar vermiştir. Buradaki kum kaynamaları sıvılaşmanın kanıtıdır. Ayrıca Oakland Havaalanı ve Salinas nehri boyunca da sıvılaşma görülmüştür.

6.9 büyüklüğündeki 1995 Kobe Depremi Japonya'yı vuran en büyük depremlerden biridir. 5.500 kişi ölmüş, 26.000 kişi yaralanmış ve 200 milyar dolarlık hasar oluşmuştur. Oluşan büyük hasar ve can kaybının sebebi depremin merkez üssünün nüfusun yoğun olduğu bölge olmasıdır. Hanshin Otoyolu'nun çökmesi yapılara büyük deprem yüklerinin etkidiğini ve güçlü zemin hareketlerinin oluştuğunu göstermektedir.

Bu otoyolun çökmesine sebep olan güçlü zemin hareketleri aynı zamanda liman yapılarını etkileyen sıvılaşmaya yol açmıştır.

7.4 büyüklüğündeki 1999 Kocaeli Depremi batıda Tekirdağ'dan doğuda Düzce'ye kadar çok geniş bir alanda etkili olmuştur. Depremin ardından bölgede heyelanlar, derin çatlaklar, aşırı oturmalar, yanal hareketler ve sıvılaşma gözlenmiştir. Depremin en çok hasar verdiği il olan Adapazarı'nda sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları nedeniyle birçok yapı oturmuş, dönmüş, gömülmüş yada tamamen yıkılmıştır. Kocaeli Depremi, Bölüm 5'de ayrıntılı olarak incelenecektir. 7.6 büyüklüğündeki 1999 Chi - Chi Depremi Tayvan'ı vuran yüzyılın en büyük depremidir. 2400 kişi ölmüş ve 20 - 30 milyar dolarlık hasar oluşmuştur. Binalarda, otoyollarda, köprülerde, barajlarda ve liman yapılarında büyük hasarlar meydana gelmiştir. Oluşan hasarın en büyük nedeni sıvılaşmadır. Sıvılaşmanın kanıtı olan kum kaynamaları, oturmalar ve yanal yayılmalar deprem sonrasında yoğun şekilde gözlenmiştir (Juang, 2002).

7.6 büyüklüğündeki 2005 Pakistan Depremi, Kaşmir bölgesini etkilemiş, 86000 kişinin ölümüne ve 4 milyon kişinin evsiz kalmasına sebep olmuştur. Hindistan ve Avrasya tektonik plakaları arasında kalan bölge sismik olarak aktif olduğundan, deprem sırasında açığa çıkan enerji yüksek olmuş, bunun sonucunda çok sayıda heyelan ve sıvılaşma vakası gözlenmiştir.

2.3 Sıvılaşma İle İlgili Tanımlar

Sıvılaşma olayını farklı oluşum sebepleri nedeniyle *akma sıvılaşması* ve *tekrarlı yükleme* olmak üzere iki gruba ayırabiliriz. Arazi şartlarında gelişen akma sıvılaşmasının oluşum sıklığı tekrarlı yüklemeden daha az olmasına rağmen, etkileri daha yıkıcıdır. Tekrarlı yükleme ise akma sıvılaşmasına göre çok daha geniş zemin ve arazi şartlarında oluşur (Kramer, 1996).

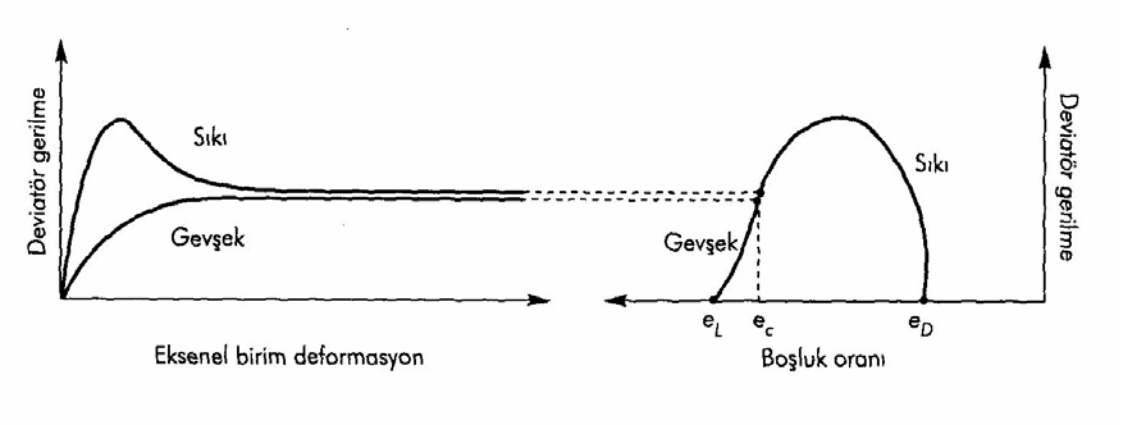
Akma sıvılaşması, katı parçacıklar arasındaki statik dengenin artan boşluk suyu basıncı yüzünden statik ve dinamik yüklerce yok olmasıdır. Statik yükleme örneğin şev üzerine inşa edilen yeni binaların zemine ek yük bindirmesi ile oluşabilir. Deprem, patlama, kazık çakılması gibi olaylar da akma sıvılaşmasını tetikleyen dinamik yüklere örnektir. Akma sıvılaşması, zemininin statik dengesini sağlayan kayma gerilmesinin (statik kayma gerilmesi), sıvılaşmış zeminin kayma dayanımından büyük olduğu zaman gelişir. Akma sıvılaşmasının karakteristik özelliği; ansızın ortaya çıkması, çabuk gelişmesi ve sıvılaşan malzemenin büyük mesafelerde hareketidir. 1964 Niigata Depremi sırasında Kawagishi-cho binalarının taşıma gücü kaybı nedeniyle taşıyıcı sistemlerinde yapısal hasar almaksızın dönmesi akma sıvılaşmasının ansızın ve çabuk gelişmesine örnektir. 1925 Santa Barbara Depremi sırasında Sheffield Barajı'nın yıkılması, 1964 Alaska Depreminde Turnagain Tepeleri bölgesinde meydana gelen heyelan ve 1971 San Fernando Depremi sırasında Aşağı San Fernando Barajı'nın yıkılması da akma sıvılaşmasının yarattığı büyük çaptaki hareketlere örnektir (Kramer, 1996).

Tekrarlı yükleme, statik kayma gerilmesinin sıvılaşmış zeminin kayma dayanımından küçük olduğu zaman gelişmektedir. Tekrarlı yükleme sonucu oluşan deformasyonlar deprem sarsıntısı sırasında kademeli olarak ortaya çıkar. Bu deformasyonların nedeni hem tekrarlı gerilmeler hem de statik kayma gerilmeleridir. Yanal yayılma olarak da adlandırılan bu deformasyonlar genellikle az eğimli yamaçlarda, nehir boyu ve göl kenarlarında görülür. Örneğin 1976'daki Guatemala Depremi'nde Motagua Nehri boyunca yanal yayılma gözlenmiştir (Kramer, 1996). Tekrarlı yüklemenin diğer bir sonucu da yüksek boşluk suyu basıncının kum tanelerini deprem sırasında ve sonrasında çatlaklardan zemin yüzeyine taşımasıyla oluşan kum kaynamasıdır. Örneğin 1999'daki Chi – Chi Depreminde kum kaynaması birçok alanda gözlenmiştir (Juang, 2002).

2.4 Sıvılaşma Mekanizması

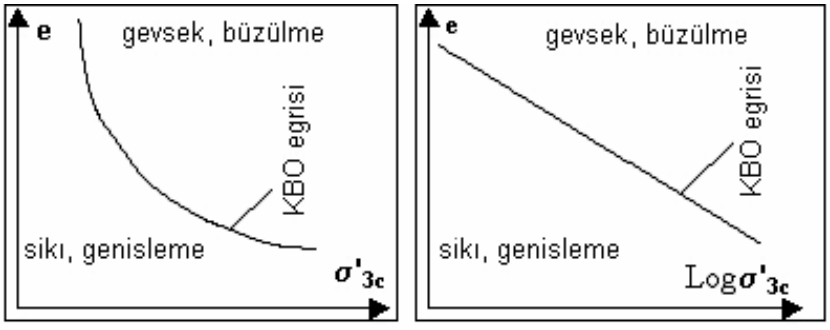
1936'da Casagrande bir dizi drenajlı deformasyon kontrollü üç eksenli deneyler yapmış ve aynı efektif çevre basıncındaki gevşek ve sıkı kum numunelerinin yüksek birim

deformasyonlarda aynı sıkılığa ulaştığını ve sabit bir kayma direnci ile devamlı şekilde kaymaya maruz kaldıklarını bulmuştur. Başlangıçta gevşek olan numuneler, yükleme sırasında büzülmüş veya sıkılaşmış; başlangıçta sıkı olan numuneler ise önce büzülmüş ve sonra çabuk bir şekilde genişlemiştir. Bu sabit sıkılıktaki boşluk oranına Kritik Boşluk Oranı (e_c) denilmiştir (Şekil 2.1).



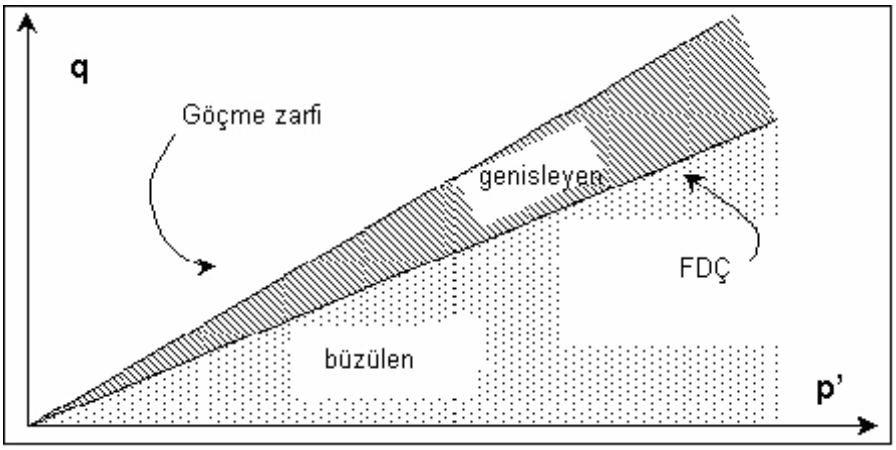
Şekil 2.1 Aynı efektif çevre basıncındaki gevşek ve sıkı kumların birim deformasyon kontrollü üç eksenli deneylerde davranışları (*http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html*)

Casagrande çeşitli çevre basınçlarında deneyler uygulayarak kritik boşluk oranının efektif çevre basıncı ile değiştiğini bulmuştur. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi bu değerlerin grafik üzerinde gösterilmesi ile elde edilen eğriye Kritik Boşluk Oranı (KBO) eğrisi denir. KBO eğrisi drenajlı üç eksenli deneylerde genişleme ve büzülme davranışını birbirinden ayıran sınırdır. Örneğin KBO eğrisinin üzerinde kalan bir zemin büzülme davranışı gösterir.



Şekil 2.2 Kritik Boşluk Oranı (KBO) eğrisi (aritmetik ve logaritmik eksende) (*http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html*)

Tekrarlı yüklemenin anlaşılmasını sağlayan anahtar nokta Faz Dönüşüm Çizgisinin (FDÇ) tanımlanması olmuştur. Statik yükleme uygulanmış sıkı ve orta sıkı kumlar başta büzülme davranışı gösterse de daha sonra deforme oldukça genişleme davranışı gösterirler. Şekil 2.3'de büzülmeden genişlemeye geçişi gösteren ve orijinden geçen FDÇ gerilme doğrultusu noktaları ile belirtilmiştir (Ishihara, 1985).

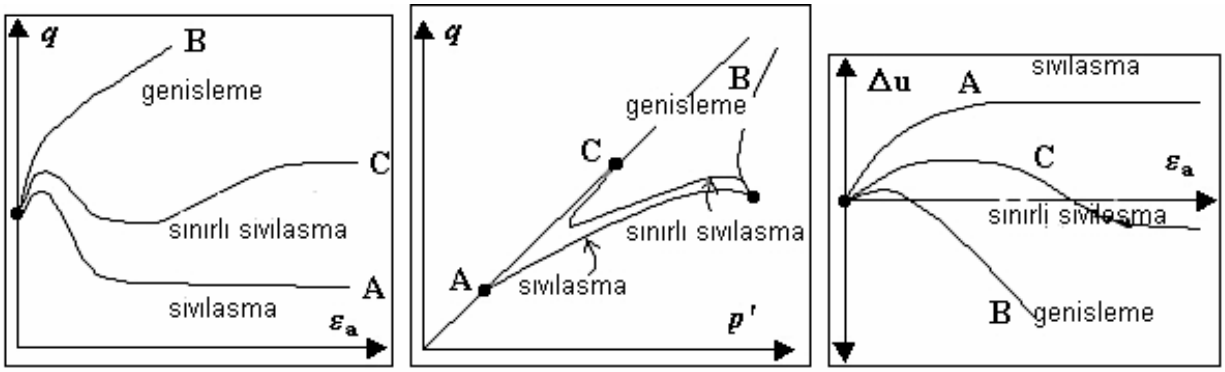


Şekil 2.3 Faz Dönüşüm Çizgisi (FDÇ)

(http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html)

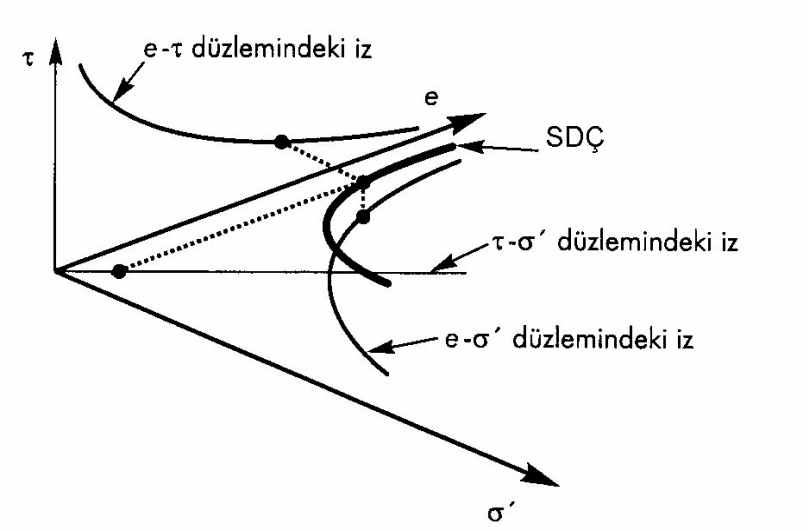
1960'ların ortasında Casagrande'nin öğrencisi Castro bir dizi drenajsız gerilme kontrollü üç eksenli test uygulayarak zeminin durumuna bağlı olarak üç tür gerilme – birim deformasyon davranışı tespit etmiştir. Çok gevşek numuneler (Şekil 2.4 - A numunesi) düşük kayma birim deformasyonunda çökmüş ve düşük efektif çevre basıncındaki büyük deformasyonlara doğru çabucak akmıştır. Castro bu davranışı "sıvılaşma" olarak adlandırmıştır ve bu davranış günümüzde akma sıvılaşması olarak bilinmektedir. Sıkı numuneler (Şekil 2.4 - B numunesi) başta büzülmüş ancak sonra yüksek efektif çevre basıncı ve büyük birim deformasyon dayanımına erişene kadar genişlemiştir. Orta sıkı numuneler (Şekil 2.4 - C numunesi) başta gevşek numuneler gibi aynı davranışı göstermiş fakat sonra büzülerek değişime uğramış, daha sonra ise genişlemiştir. Castro bu davranışı "sınırlı sıvılaşma" olarak tanımlamıştır. Şekil 2.4'de bu üç değişik gerilme – birim deformasyon davranışı türüne ait eğriler gösterilmiştir. Burada, A eğrisi akma

sıvılaşmasının deformasyon özelliğini, B ve C eğrileri ise tekrarlı yüklemenin deformasyon özelliğini göstermektedir (Castro, 1969).



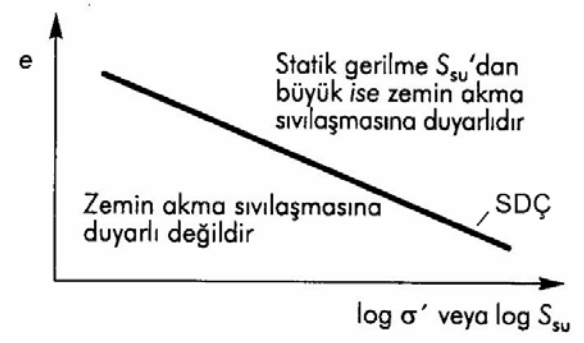
Şekil 2.4 Farklı sıkılıktaki üç numunenin üç eksenli testlerde gerilme – birim deformasyon davranışı (*http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html*)

Castro, yaptığı deneyler sonucunda efektif çevre basıncı ve deformasyonun sabit durumunda boşluk oranı ilişkisini Şekil 2.5'deki gibi çizmiştir. Castro, bu ilişkiyi tanımlayan noktaların yerine Sabit Durum Çizgisi (SDÇ) adını vermiştir. SDÇ gerçekte e – σ' – τ eksenlerinde tanımlanmış üç boyutlu bir eğridir. SDÇ, KBO eğrisine benzemektedir, aradaki fark ise Casagrande'nin tanımladığı "akış yapısıdır" (Kramer, 1996).



Şekil 2.5 Üç boyutlu Sabit Durum Çizgisi (SDÇ) (http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html)

SDÇ, bir zeminin akma sıvılaşmasına duyarlılığını belirlemede kullanılabilir. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi SDÇ üstündeki alana düşen zeminler, statik kayma dayanımı sabit durum dayanımından (S_{su}) büyük olduğu zaman akma sıvılaşmasına duyarlıdır. SDÇ'nin altına düşen zeminler ise akma sıvılaşmasına duyarlı değildir. Tekrarlı yükleme ise, SDÇ'nin üstüne veya altına düşen zeminlerde yani hem sıkı hem de gevşek zeminlerde meydana gelir (Kramer, 1996).



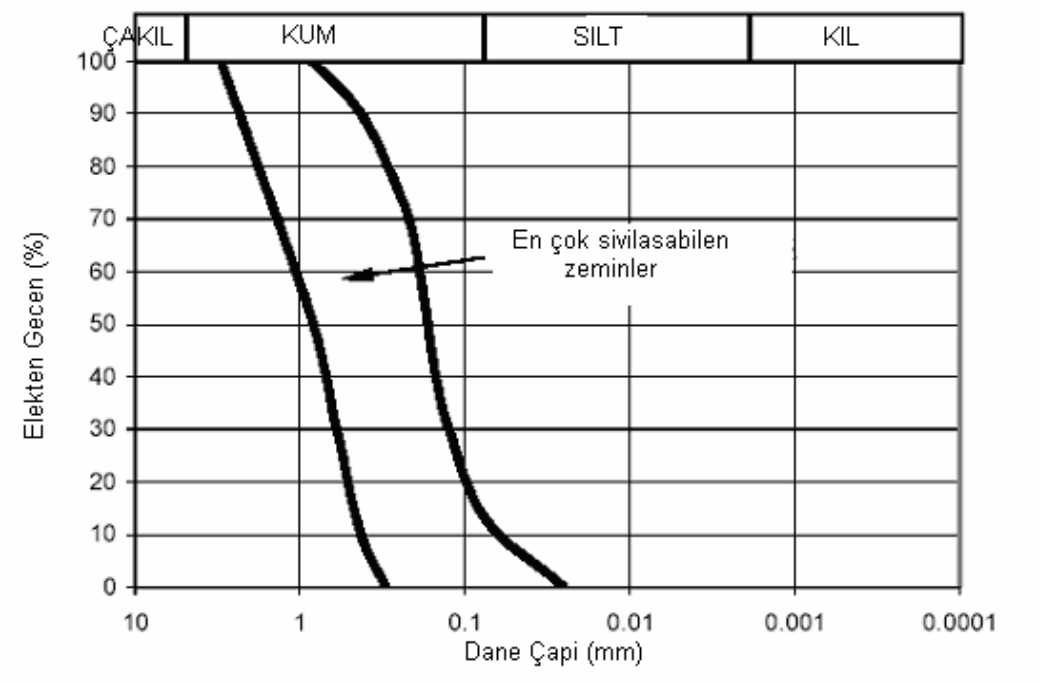
Şekil 2.6 Akma sıvılaşması duyarlılığını belirlemede SDÇ
(*http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html*)

Akma sıvılaşması sadece statik denge için gerekli kayma gerilmesinin sabit durum dayanımından büyük olduğu zamanki tekrarlı yükleme ile başlatılabilir. Ancak akma sıvılaşmasının oluşması için kuvvetli bir drenajsız örselenme gereklidir. Tekrarlı yükleme ise statik kayma gerilmesi sabit durum kayma dayanımından küçük olduğunda gerçekleşebilir (Kramer, 1996).

2.5 Zeminlerin Sıvılaşmaya Karşı Duyarlılığı

Sıvılaşma; zeminin bileşim özellikleri, suya doygunluk ve drenajsız yükleme (ani yükleme) olmak üzere üç koşula bağlıdır. Sıvılaşma için aşırı boşluk suyu basıncının oluşması gerektiğinden, sıvılaşmaya olan duyarlılık, hacim değişim davranışını etkileyen bileşim özelliklerinden etkilenmektedir. Dane çapı ve şekli, dane çapı dağılımı gibi özellikler başlıca bileşim özellikleridir.

Sıvılaşma araştırmalarının başladığı ilk yıllarda çalışmalar sadece kumlu zeminlere odaklanmıştı. İnce daneli zeminlerin sıvılaşma için gerekli olan yüksek boşluk suyu basınçlarını oluşturamadıkları ve daha iri daneli zeminlerin de oluşan boşluk suyu basınçlarını düşürecek şekilde çok geçirimli olduğu düşünülmekteydi. Ancak yakın geçmişte birçok laboratuar deneyi ve arazi deneyimleri düşük plastisiteli ve plastik olmayan siltlerin ve siltli kumların da sıvılaşabildiğini, hatta bunların sıvılaşabilen zeminler arasında en tehlikeli olduklarını göstermiştir. İnce daneli zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığında dane boyundan çok, plastisite özelliklerinin önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Siltli kumların sıvılaşmasının en bilinen örneği 1971 San Fernando Depremi sırasında Aşağı San Fernando Barajı'nın göçmesidir (bölgedeki zemin profilinin üst tabakaları % 28'e varan oranlarda silt içermekteydi). 1999 Kocaeli Depremi sonrasında siltlerin sıvılaşması ile ilgili araştırmalar artmıştır. 1995 Kobe Depremi sırasında meydana gelen beklenmedik sıvılaşma da, sıvılaşabilen zeminlerin dane dağılımını iri kum ve çakıllara kadar genişletmiştir (bölgedeki zemin profilinin üst tabakaları granit türleri içermekteydi) (Tao, 2003). Hassas killer sıvılaşan zeminlerdeki gibi birim deformasyon yumuşaması gösterse de, killer sıvılaşmaya karşı duyarlı değildir. Sıvılaşmanın en çok görüldüğü dane çapı aralığı Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 Sıvılaşmanın en çok görüldüğü dane çapı aralığı (Ishihara, 1985)

İri daneli zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığının belirlenmesinde en çok kullanılan deney Standart Penetrasyon Deneyi'dir (SPT). Seed ve diğerleri (1983) belirli bir SPT direncine sahip temiz kumda sıvılaşma oluşturması beklenen minimum devirsel gerilme oranını belirlemek için, M=7,5 depremlerde sıvılaşmanın gözlendiği veya gözlenmediği temiz kum (Şekil 2.9) ve siltli kum (Şekil 2.10) sahalarındaki düzeltilmiş SPT direnci ile devirsel gerilme oranını (DGO) karşılaştırmışlardır.

Devirsel gerilme oranı (DGO), ortalama eşdeğer kayma gerilmelerinin (τ_{ort}) efektif düşey gerilmelere (σ_{vo}') oranıdır. Ortalama eşdeğer kayma gerilmelerinin maksimum gerilmenin % 65'inde oluştuğundan yola çıkılarak DGO aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$DGO = \frac{\tau_{ort}}{\sigma_{vo}'} = 0,65 \times \frac{\tau_{mak}}{\sigma_{vo}'} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Maksimum kayma gerilmelerinin (τ_{mak}), Seed ve Idriss (1971) tarafından 12 m derinliğe kadar deprem durumunda aşağıdaki şekilde hesaplanması önerilmiştir.

$$\tau_{mak} = \frac{\sigma_{vo}}{g} \times a_{mak} \times r_d \qquad \textbf{(2.2)}$$

Burada, $\sigma_{vo;}$ herhangi bir derinlikteki toplam düşey gerilmeyi, g; yerçekimi ivmesini, a_{mak}; maksimum yüzey ivmesini ve r_d; derinliğe bağlı azalma faktörünü (gerilme azaltma katsayısı) göstermektedir. Gerilme azaltma katsayısı için Youd ve diğ. (1997) aşağıdaki ifadeyi önermişlerdir:

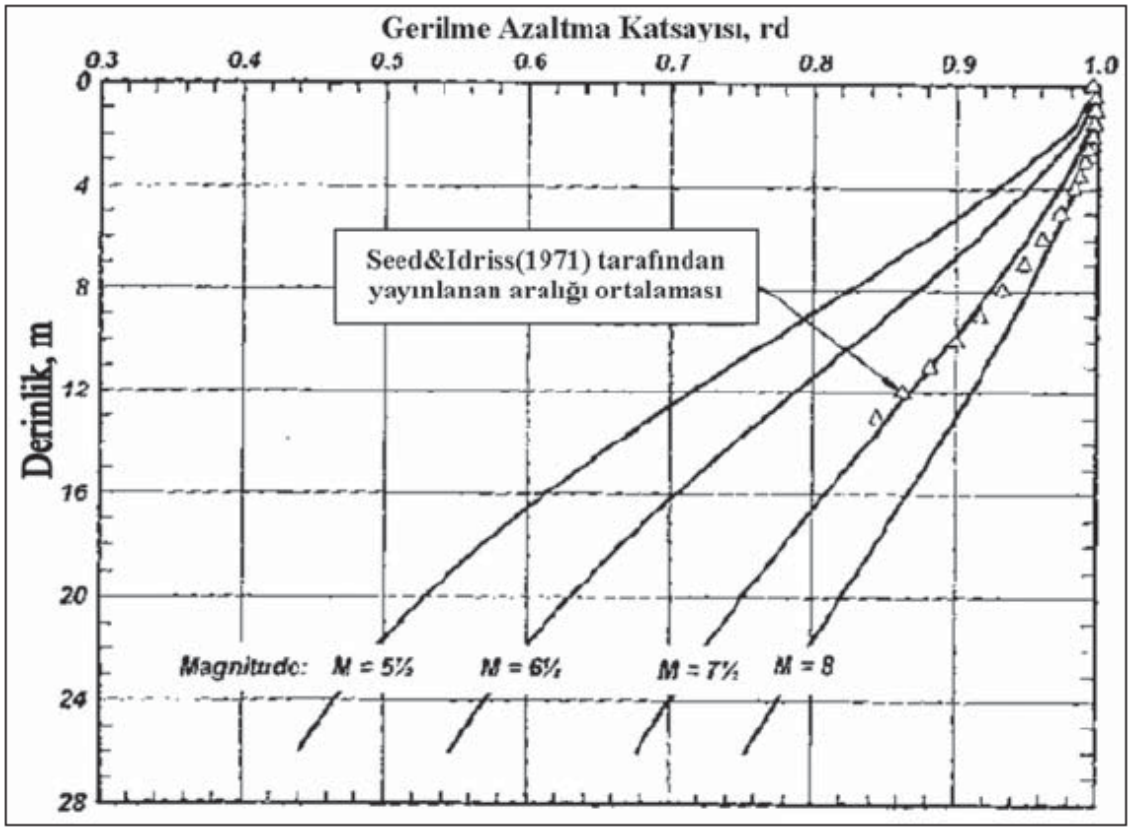
$$r_d = \frac{(1,0 - 0,41z^{0,5} + 0,04z + 0,0017z^{1,5})}{(1,0 - 0,41z^{0,5} + 0,057z - 0,006z^{1,5} + 0,0012z^2)} \qquad \textbf{(2.3)}$$

Liao ve Whitman (1986) ise gerilme azaltma katsayısı için şu ifadeyi önermişlerdir:

$r_d = 1 - 0{,}00765z \qquad z < 9.15$ m

$r_d = 1.174 - 0{,}0267z \qquad z = 9.15 - 23$ m **(2.4)**

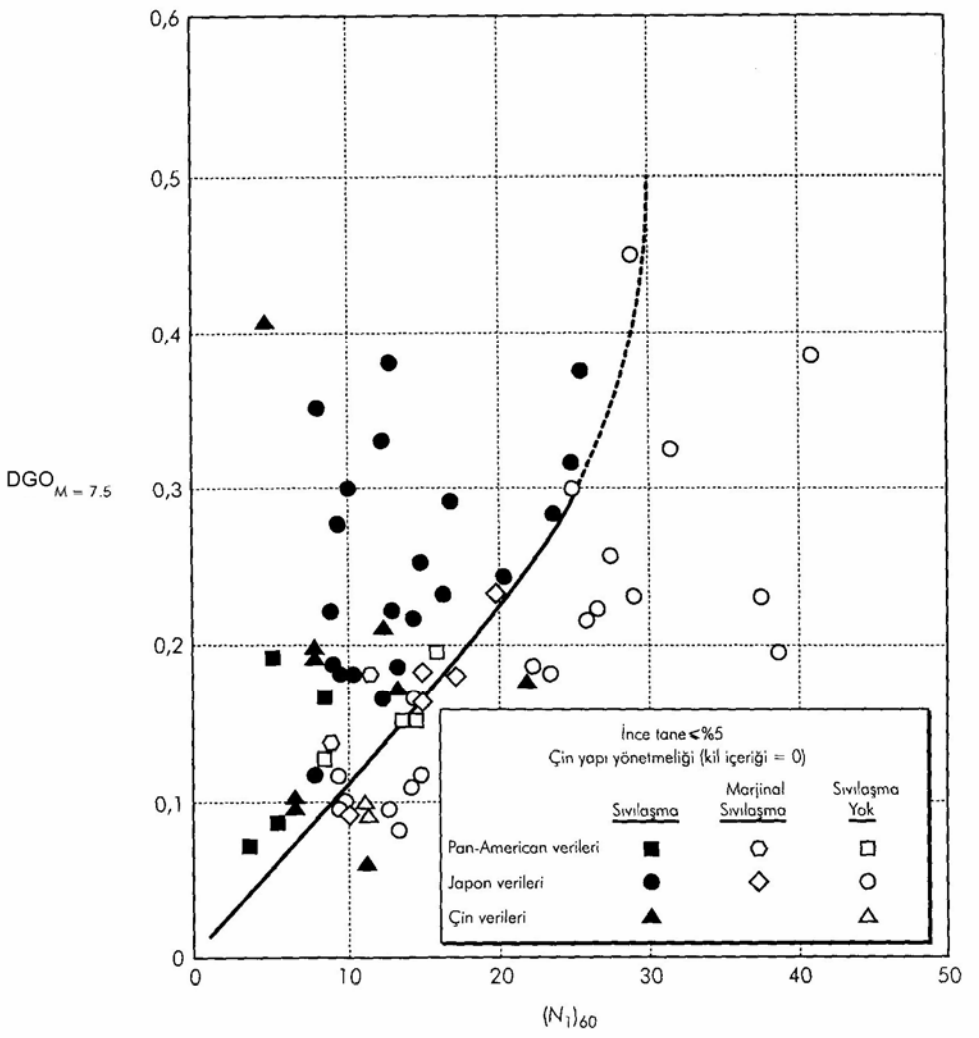
Idriss ve Boulanger (2004), r_d değerinin depremin büyüklüğüne de bağlı olduğunu belirterek Şekil 2.8'de gösterilen r_d (z, M) bağıntılarını vermişlerdir.



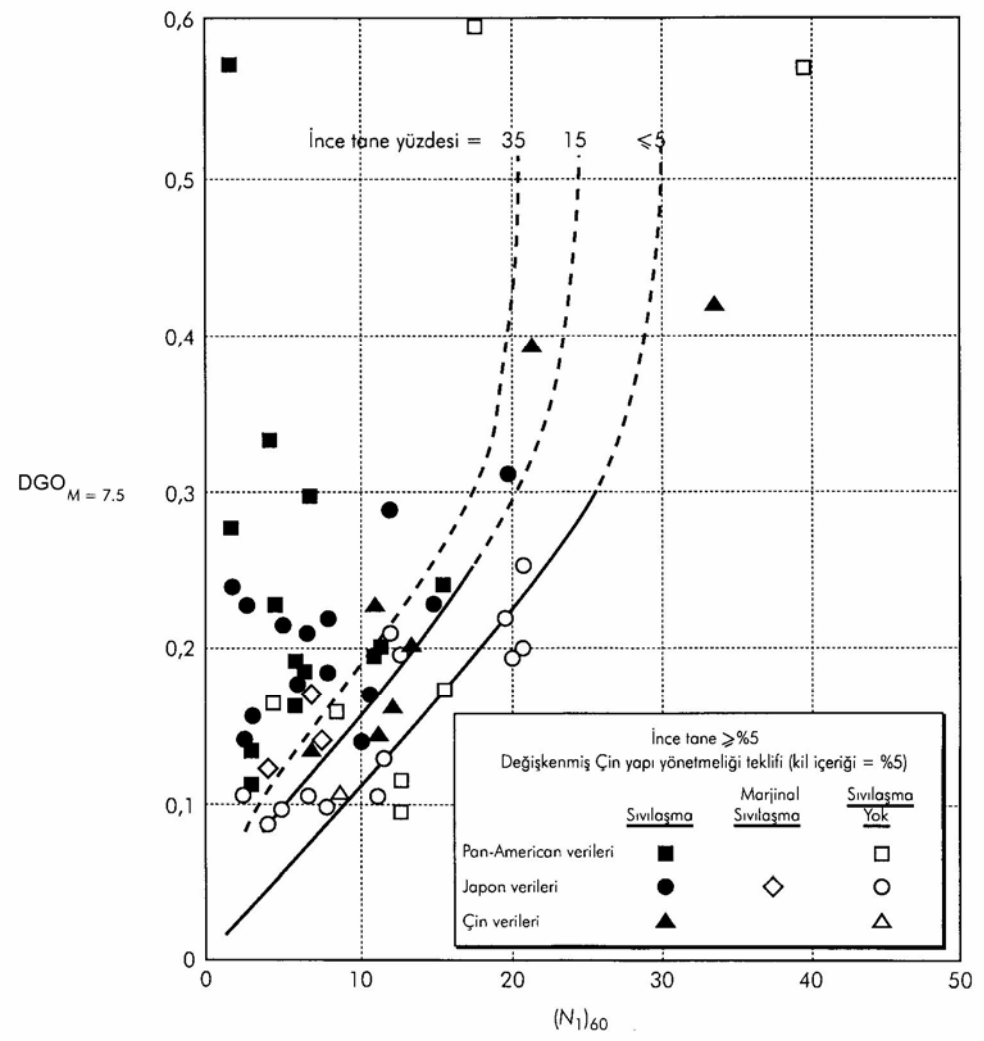
Şekil 2.8 Gerilme azaltma katsayısının (r_d) derinlik ve deprem büyüklüğü ile değişimi (Idriss ve Boulanger, 2004)

İnce danelerin varlığı SPT direncini etkiler ve bu nedenle de sıvılaşma direncinin belirlenmesinde hesaba katılmalıdır (Seed ve diğerleri, 1985; Ishihara ve Kosecki, 1989; Koester, 1994). Ancak Şekil 2.9 ve 2.10'un incelenmesinden anlaşılmaktadır ki, ince dane oranı %5'i geçmediği takdirde kumların sıvılaşma direnci ince danelerden

etkilenmemektedir. İnce daneli malzemenin plastisitesi de sıvılaşma direncini etkiler. Plastik özellikli daneler birbirine yapışarak, tekil partiküllerin hareketini sınırlandırır ve deprem sırasında aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu azaltır. Plastisite indisinin %10'dan büyük değerlerinde sıvılaşma direnci artmaktadır.



Şekil 2.9 M=7,5 depremde temiz kumlarda sıvılaşmaya neden olan DGO ile $N_{1(60)}$ değerleri arasındaki ilişki (Seed ve diğerleri, 1975)



Şekil 2.10 M=7,5 depremde siltli kumlarda sıvılaşmaya neden olan DGO ile $N_{1(60)}$ değerleri arasındaki ilişki (Seed ve diğerleri, 1975)

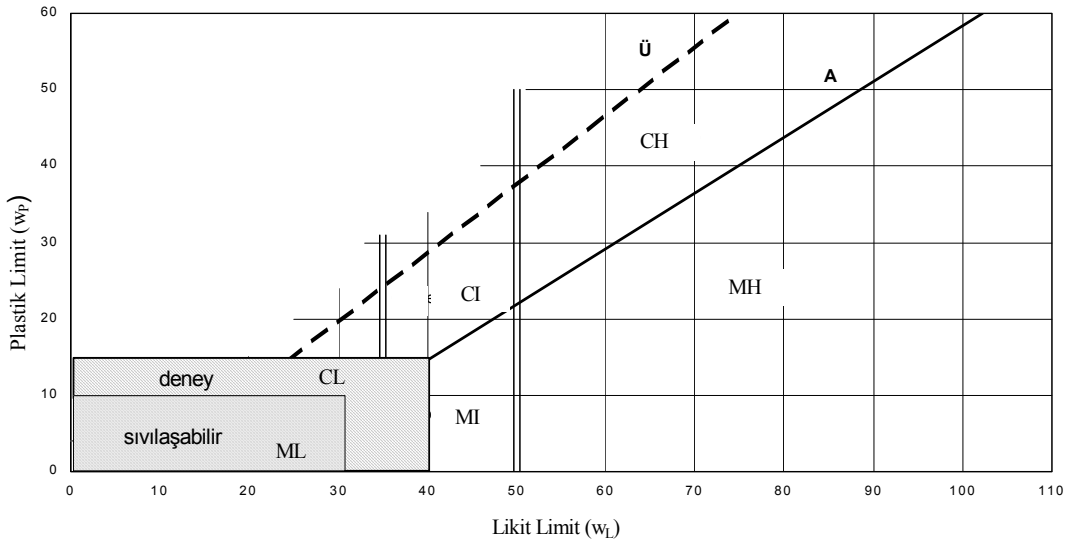
Pratikte, ince daneli zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığının belirlenmesinde kullanılan "*Çin kriteri*" nin çeşitli versiyonları bulunmaktadır. Andrews ve Martin tarafından önerilen en son versiyon aşağıda Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Sıvılaşma duyarlılığının belirlenmesinde Çin kriteri (Andrews ve Martin, 2000)

	Likit Limit < 32	**Likit Limit > 32**
Kil < %10	sıvılaşma riski	bilinmiyor
Kil > %10	bilinmiyor	sıvılaşma riski yok

Çin kriteri olarak bilinen koşullara göre siltlerin sıvılaşabilmesi için temel parametre likit limit olup, bunun %32 ve daha düşük, likitlik indisinin 0.9 ve daha büyük, kil içeriğinin %10 ve daha küçük olması gerekmektedir. Buradan görüldüğü gibi bu tür zeminlerin sıvılaşması kumlarda olduğu gibi standart penetrasyon direnci ile ilişkilendirilmemiştir.

Seed ve diğerleri (2001) siltlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını tanımlamada Casagrande plastisite kartını kullanmışlardır (Şekil 2.11). Bu şekilde kesin sıvılaşma likit limitin %30, plastisite indisinin %10 ve daha küçük olduğu bölgede ve TS 1500/2000 plastisite kartı üzerinde gösterilmiştir. Likit limitin %30-40, plastisite indisinin de %10-15 aralığında kaldığı şerite düşen siltlerin sıvılaşma yeteneğinin deneyle değerlendirilmesi önerilmiştir. Bu deneylerin hangileri olduğu belirtilmemekle birlikte başarılı örselenmemiş numune alınabildiği taktirde dinamik üç eksenli veya kesme kutusu deneyleri söz konusu olmaktadır (Sancio ve diğerleri, 2002).



Şekil 2.11 Siltlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını tanımlamada TS 1500/2000 Plastisite Kartının kullanımı (Seed ve Çetin, 2001)

Zeminin dane çapı dağılımı da sıvılaşma duyarlılığını etkilemektedir. İyi derecelenmiş zeminlerin zayıf derecelenmiş zeminlere göre sıvılaşma duyarlılığı daha düşüktür. İyi

derecelenmiş zeminlerde büyük partiküller arasındaki boşluklar küçük partiküllerle dolu olduğundan, drenajlı şartlarda hacim değişimi azalmakta, drenajsız şartlarda da aşırı boşluk suyu basıncı düşük olmaktadır. Bir diğer bileşim özelliği olan *dane şekli* ise sıvılaşma duyarlılığını arttırmaktadır. Yuvarlak daneli zeminlerin köşeli daneli zeminlere göre daha kolay sıkılaştığı ve buna göre de sıvılaşmaya olan duyarlılıklarının daha yüksek olduğu bilinmektedir. Gevşek şekilde çökelmiş doygun zeminlerin bulunduğu alüviyal ortamlarda dane yuvarlaklaşması görüldüğünden, bu alanların sıvılaşma duyarlılığı yüksektir. Birçok kaynakta, boşluk oranı ve relatif sıkılık sıvılaşma duyarlılığını etkileyen en önemli bileşim özellikleri olarak kabul edilmektedirler. Sıvılaşma için gerekli olan bir diğer koşul ise suya doygunluktur. Bu nedenle yeraltı suyu seviyesi önemlidir. Yeraltı suyunun derinliği arttıkça sıvılaşma duyarlılığı azalır. Sıvılaşmanın en sık görüldüğü alanlar yeraltı suyunun zemin yüzeyinden birkaç metre derinde olduğu yerlerdir.

Son araştırmalar sıvılaşma duyarlılığını belirleyen etkenlerin sadece bunlar ile sınırlı olmadığını, daha birçok faktör olduğunu göstermiştir. Bu faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Tao, 2003):

- Zeminlerin minarel yapısı
- Boşluk oranı ve relatif sıkılık
- Dane dağılımı
- İnce daneler veya zeminin mikro yapısı
- Başlangıç efektif çevre basıncı
- Drenaj koşulları
- Zemin içindeki sıkışmış hava
- Yükleme özellikleri (periyod, frekans, uygulama noktaları...)
- Geçmiş deformasyon durumu

Özetle, kohezyonsuz bir zeminin sıvılaşma duyarlılığı birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin bazıları zeminin karakteristik özellikleri ile alakalı olup, bazıları ise yükleme

koşulları yada arazinin özellikleri ile ilgilidir. Ancak bu faktörlerin sıvılaşma duyarlılığını aynı ölçüde etkilemedikleri de bir gerçektir. Genel kural olarak; sıvılaşma duyarlılığının yükleme koşullarından çok, zeminin karakteristik özelliklerinden etkilendiği kabul edilmektedir.

2.6 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte Sıvılaşma İle İlgili Hükümler

1998'de yürürlüğe giren, 2006'da yenilenen ve 2007'de tekrar çıkan Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)'de zeminlerin saha ya da laboratuar deneyleriyle saptanan karakteristik özelliklerine göre gruplandırılması Tablo 2.2'de (bu tablo ABYYHY, 1998 içinde Tablo 12.1; ABYYHY, 2006 ve 2007 içinde Tablo 6.1 olarak yer almaktadır) gösterilmiştir. Zemin grubuna göre belirlenen yerel zemin sınıfları ise Tablo 2.3'de (ABYYHY, 1998 Tablo 12.2; ABYYHY, 2006 ve 2007 Tablo 6.2) gösterilmiştir.

Daha önceki deprem yönetmeliklerinde yer almayan zemin sıvılaşmasına ilişkin 1998 Deprem Yönetmeliği'nde bir madde eklenerek sıvılaşma potansiyelinin incelenmesi zorunluluğu getirilmiştir. 2006 ve 2007 Deprem Yönetmeliği'nde de aynen korunan bu maddede, "Sıvılaşma Potansiyelinin İrdelenmesi" başlığı altında "bütün deprem bölgelerinde, yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinden itibaren 10 m içinde olduğu durumlarda, Tablo 12.1'de (ABYYHY, 1998), Tablo 6.1'de (ABYYHY, 2006 ve 2007) (D) grubuna giren zeminlerde *Sıvılaşma Potansiyeli*'nin bulunup bulunmadığının, saha ve laboratuar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve sonuçların belgelenmesi zorunludur" denilmektedir. Bu tabloda görüldüğü gibi (D) grubu zeminler yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları ile gevşek kum ve yumuşak kil, siltli kil olarak belirtilmiştir.

Tablo 2.2 Zemin grupları (ABYYHY, 2006)

Zemin Grubu	*Zemin Grubu Tanımı*	*Stand. Penetr.* (N/30)	*Relatif Sıkılık* (%)	*Serbest Basınç Direnci* (kPa)	*Kayma Dalgası Hızı* (m/s)
(A)	1. Masif volkanik kayaçlar ve ayrışmamış sağlam metamorfik kayaçlar, sert çimentolu tortul kayaçlar....	—	—	> 1000	> 1000
	2. Çok sıkı kum, çakıl.....	> 50	85–100	—	> 700
	3. Sert kil ve siltli kil.....	> 32	—	> 400	> 700
(B)	1. Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayaçlar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrışmış çimentolu tortul kayaçlar....	—	—	500–1000	700–1000
	2. Sıkı kum, çakıl.....	30–50	65–85	—	400–700
	3. Çok katı kil ve siltli kil...	16–32	—	200–400	300–700
(C)	1.Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayaçlar ve çimentolu tortul kayaçlar.....	—	—	< 500	400–700
	2. Orta sıkı kum, çakıl.....	10–30	35–65	—	200–400
	3. Katı kil ve siltli kil.....	8–16	—	100–200	200–300
(D)	1.Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları.....	—	—	—	< 200
	2. Gevşek kum.....	< 10	< 35	—	< 200
	3. Yumuşak kil, siltli kil.....	< 8	—	< 100	< 200

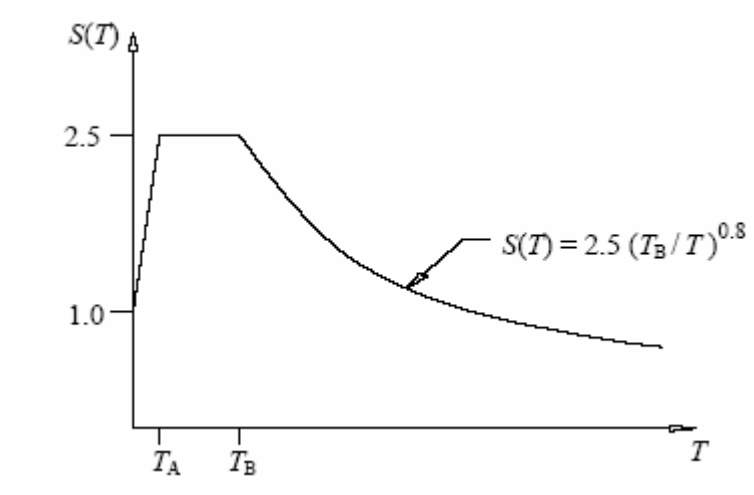
Tablo 2.3 Yerel zemin sınıfları (ABYYHY, 2006)

Yerel Zemin Sınıfı	*Tablo 6.1'e Göre Zemin Grubu ve En Üst Zemin Tabakası Kalınlığı* (h_1)
Z1	(A) grubu zeminler $h_1 \leq 15$ m olan (B) grubu zeminler
Z2	$h_1 > 15$ m olan (B) grubu zeminler $h_1 \leq 15$ m olan (C) grubu zeminler
Z3	15 m $< h_1 \leq 50$ m olan (C) grubu zeminler $h_1 \leq 10$ m olan (D) grubu zeminler
Z4	$h_1 > 50$ m olan (C) grubu zeminler $h_1 > 10$ m olan (D) grubu zeminler

Spektrum karakteristik periyotları T_A ve T_B ise yerel zemin sınıflarına bağlı olarak aşağıda Tablo 2.4'de (ABYYHY, 1998 Tablo 6.4; ABYYHY, 2006 ve 2007 Tablo 2.4) verilmiştir. Spektrum karakteristik periyotları T_A ve T_B'ye göre tanımlanan tasarım ivme spektrumu ise Şekil 2.12'de (ABYYHY, 1998 Şekil 6.6; ABYYHY, 2006 ve 2007 Şekil 2.5) gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Spektrum karakteristik periyotları (ABYYHY, 2006)

Tablo 6.2'ye göre Yerel Zemin Sınıfı	T_A *(saniye)*	T_B *(saniye)*
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90



Şekil 2.12 Tasarım ivme spektrumu (ABYYHY, 2006)

3. SIVILAŞMAYI ÖNLEYEN TEKNİKLER

Sismik tehlikelerden biri olan sıvılaşmayı önlemede çok sayıda zemin iyileştirme tekniği kullanılmaktadır. Bunlar arasında; sıvılaşma potansiyeli olan zeminin kazılması ve/veya yer değiştirilmesi, sıkılaştırma teknikleri ile zemin mukavemetinin arttırılması, aşırı boşluk suyu basınçlarının taş kolonlar veya şerit drenler ile drenajı, enjeksiyon ve karıştırma teknikleri ile zeminde mukavim kolonlar oluşturulması, yer altı su seviyesinin düşürülmesi, kazıklı temeller, diyafram duvar ve radye temel uygulamaları sayılabilir. Zemin iyileştirme tekniğinin seçiminde tekniğin uygulama kolaylığına, tanımlanan sismik problemin çözümüne uygunluğuna, maliyetine ve çevresel etkilere duyarlılığına bakılmalıdır (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003). Bu tez konusu çerçevesinde sadece sıkılaştırma teknikleri üzerinde durulacaktır.

Belirli bir zemini oluşturan danelerin çok değişik şekilde dizilmeleri söz konusudur. Ancak danelerin sıkı bir şekilde dizildiği durumdaki zemin dayanımı ve rijitliği, gevşek şekilde dizildiğindekinden daha yüksektir. Ayrıca, zemin sıkı olduğu zaman tekrarlı yüklemeye maruz kaldığında pozitif boşluk suyu basıncı oluşturma eğilimi, gevşek olduğu zamankinden düşüktür. Bu nedenle sıvılaşma gibi sismik tehlikeleri önlemede en etkili zemin iyileştirme yöntemlerinden biri *sıkılaştırmadır*. Ayrıca sıkılaştırma ile rijitliği artan zeminin deprem hareketine tepkisinin farklı olacağı unutulmamalıdır. Yerdeğiştirme genlikleri muhtemelen azalacak, ancak ivmeler iyileştirilmeyen zemine göre daha büyük olacaktır.

Sıkılaştırma tekniklerinin çoğu gevşek, suya doygun kumda geçici ve yerel bir sıvılaşma zonu oluşturur. Sıkılaşma, kum tanelerinin yeniden oturması sırasındaki dizilimden ileri gelmektedir. Özellikle plastik karakterdekiler olmak üzere ince daneli malzemenin varlığı, yüksek boşluk suyu basınçlarının gelişmesini ve danelerin yeniden dizilmesini

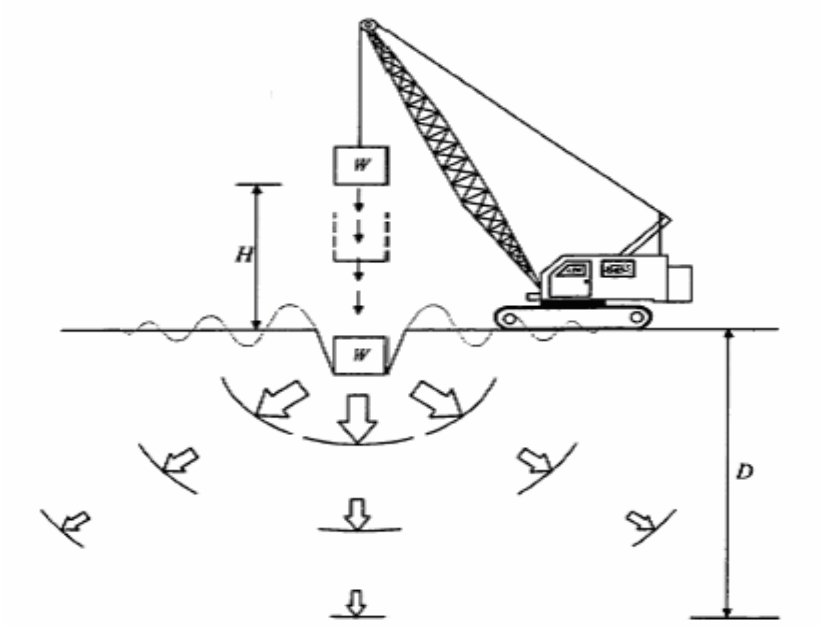
engellemektedir. Bunun sonucunda da, ince daneli zeminlerde titreşimli tekniklerin etkinlik derecesi azalmaktadır (Kramer, 1996).

Sıkılaştırma işlemi zeminde kalıcı hacim değişimleri oluşturur ve bu da çoğu zaman yer yüzeyinde oturma ile sonuçlanır. Farklı sıkılaştırma teknikleri farklı miktarda oturmalar meydana getirir. Oturmayı azaltmak amacıyla sıkılaştırma işlemi sırasında bazı teknikler kullanılarak zemin üzerine veya altına ilave dolgular yapılır. Buna rağmen sıkılaştırma tekniklerinin çoğu, sadece zemin oturmasından zarar görebilecek yapı ve tesislerin bulunmadığı sahalarda uygulanabilir.

Sıkılaştırma işleminde en yaygın olarak kullanılan teknikler; dinamik kompaksiyon, vibro sistemler, patlatma ve jet – grout olmak üzere dört çeşittir. Bunlardan ilk üçü, granüler zeminlerin titreşimle sıkışma eğiliminden yararlanır. Bu neden ile bu teknikler temiz kum ve çakıllarda daha iyi sonuçlar vermektedir. Aşağıda bu sıkılaştırma teknikleri detaylı olarak incelenecektir.

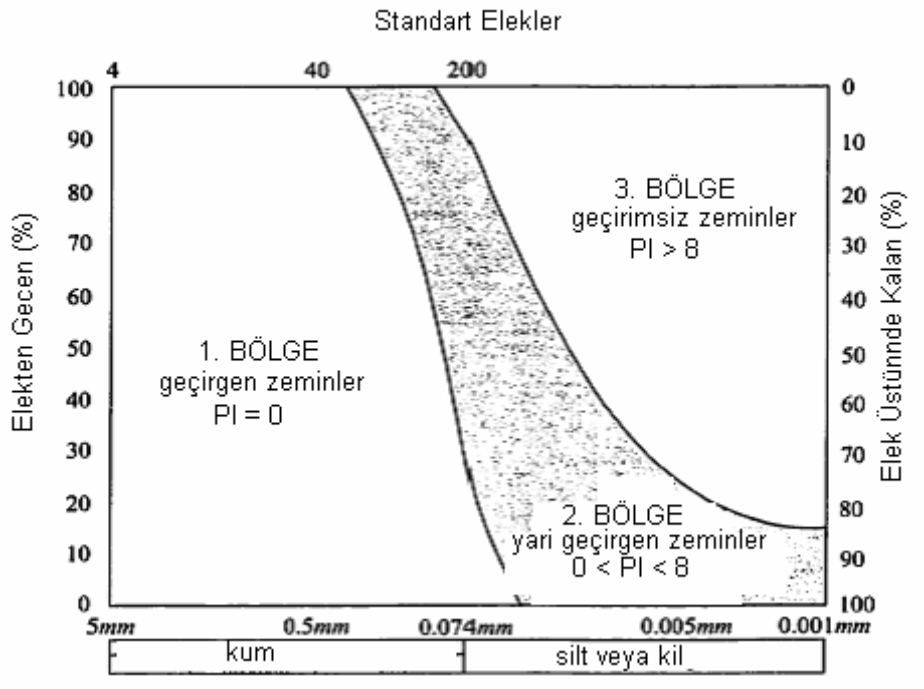
3.1 Dinamik Kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon; arazide önceden belirlenen noktalara sistematik olarak ağırlıkların düşürülmesi suretiyle uygulanan, gevşek zeminlerin sıkılaştırılmasında ve taşıma güçlerinin arttırılmasında etkili olan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Yüzyıllar önce bu tekniğin Romalılar tarafından kullanıldığı bilinse de, zemin iyileştirme tekniği olarak literatüre ancak 1960'ların sonunda "dinamik kompaksiyon" yada "dinamik konsolidasyon" adıyla girebilmiştir (Elias ve diğerleri, 1999). 10 – 40 ton arasında değişen ağırlıkların 20 – 40 metre arasında değişen yüksekliklerden zemin yüzeyine düşürülmesiyle uygulanan teknik, aşağıda Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Dinamik kompaksiyonun şematik gösterimi (Lukas, 1995)

Şekil 3.2'de dinamik kompaksiyonla sıkılaştırılmaya uygun olan dane çapı aralığı gösterilmiştir. Burada, 1. bölgede bulunan zeminler dinamik kompaksiyona en çok elverişli, 3. bölgede bulunan zeminler ise en az elverişli zeminlerdir.

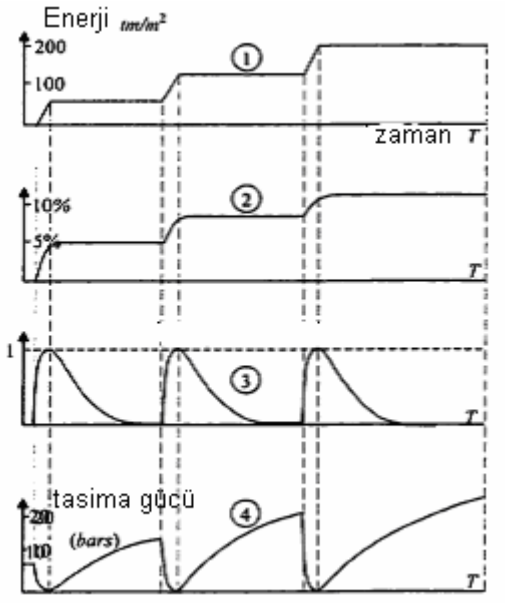


Şekil 3.2 Dinamik kompaksiyonla sıkılaştırılmaya uygun dane çapı aralığı (Lukas, 1986)

Menard ve Broise 1975'de dinamik kompaksiyon sırasında meydana gelen olayları sırasıyla aşağıdaki gibi açıklamışlardır:

1. Mikro balonların varlığı nedeniyle suya doygun zeminlerin sıkılaşabilirliği
2. Tekrarlanan vuruşlar altında sıvılaşma
3. Zemindeki fissürlenmeden sonra yüksek permeabiliteye bağlı olarak, boşluk basıncının hızla azalması
4. Taşıma gücünün artması

Bu aşamalar Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Burada, her enerji yükselişi yeni bir ağırlık düşürülmesini simgelemektedir. Aynı zamanda şekilden de görüldüğü gibi sıvılaşma riski azalmakta, boşluk suyu basıncının düşmesine bağlı olarak zeminin taşıma gücü artmaktadır. Bu olay yalnızca dinamik kompaksiyona özgü değil, diğer sıkılaştırma teknikleri olan vibro – kompaksiyon ve patlatmalı kompaksiyonda da görülmektedir.



(1) uygulanan enerji, tm/m^2
(2) hacim değişimi
(3) boşluk basıncı
(4) taşıma gücü

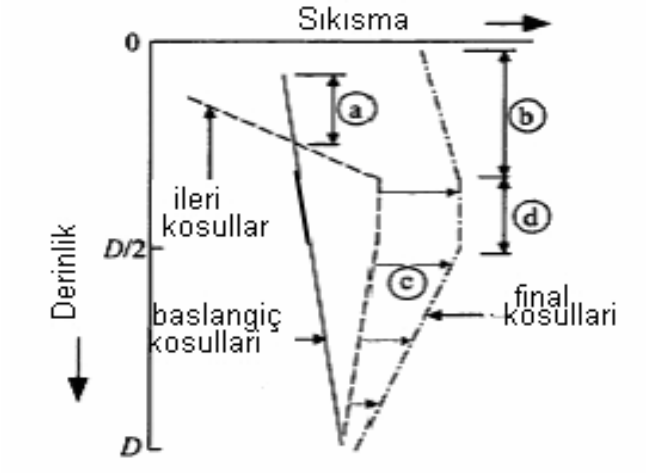
Şekil 3.3 Dinamik kompaksiyonun aşamaları (Menard ve Broise, 1975)

Dinamik kompaksiyonda, dinamik basınçların zemin yüzeyine kontrollü uygulanması önem taşımaktadır. Bu basınçlar planda önceden belirlenmiş aralıklarda ağırlıkların 5 – 15 defa düşürülmesi ile uygulanır. Kompaksiyon noktaları arasındaki mesafe, zemin koşullarına ve sıkılaştırılmak istenen zemin tabakasının kalınlığına bağlı olarak 5 – 10 m arasında seçilir (Van İmpe ve Madhav, 1995). Genellikle kompaksiyon noktalarında yer altı su seviyesinin yüksekliği, ağırlıkların düşürülme sayılarını yani vuruş sayısını sınırlandırmaktadır. Sıkılaştırma işlemine krater derinliği ağırlık yüksekliğinin iki katına ulaştığında yada yer altı suyu krater tabanına ulaştığında son verilir.

Vuruş sayısının sınırlı olması nedeniyle sıkılaştırma işlemi birkaç geçişte uygulanır. Geçiş, bir kompaksiyon noktasında tek seferde uygulanabilen maksimum vuruş sayısı olarak tanımlanır. Örneğin seçilen bir kompaksiyon noktasında 12 vuruş yapılması düşünülmüş, ancak krater derinliğinin sınır değerine ulaşması ya da yer altı suyunun krater tabanında yükselmesi gibi sebeplerle 3 vuruş yapılabilmişse, bu 3 vuruş ilk geçiş olarak adlandırılır (Elias ve diğerleri, 1999). Birbirini izleyen geçişler arasında kraterler granüler dolgu malzemeleri ile geri doldurulur. İnce daneli zeminlerde bazen 3 – 4 geçiş yapmak gerekmekte, birçok zeminde ise tek geçiş yeterli olmaktadır.

Gerekli zemin iyileştirme miktarına bağlı olarak dinamik kompaksiyon iki evreden oluşur. Sıkılaştırma sırasında büyük ağırlıkların büyük yüksekliklerden düşürüldüğü ilk evreye “yüksek enerji evresi” adı verilir. Bu evre derinlerdeki tabakaları sıkılaştırmak için gereklidir ve yanlış uygulanırsa sıkı bir üst tabaka yaratarak, alttaki gevşek tabakaların iyileştirilmesini engeller. Yüksek enerji evresinin tamamlanmasının ardından kraterlerin içindeki dolguları ve zeminin en üstteki 1,5 metrelik tabakasını sıkılaştırmak için uygulanan evreye “düşük enerji evresi” yada “ütüleme” adı verilir. Bu evrede hafif ağırlıklar yakın aralıklarla 5 – 6 metreden düşürülür.

Yüksek enerji ve düşük enerji evrelerinin etkileri Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yüksek enerji evresi sırasında yüzeye yakın zemin tabakaları krater derinliğine kadar gevşemiş, daha sonra uygulanan düşük enerji evresinde bu tabakalar sıkılaştırılmıştır.



a) yüzey tabakalarının ilk sıkılaştırılma evresi

b) yüzey tabakalarının ütüleme evresi ile sıkılaştırılması

c) zemin dayanımının artması

d) maksimum iyileşme, etki derinliğinin yarısı ile 1/3'ü arasında meydana gelir.

Şekil 3.4 Yüksek enerji ve düşük enerji evrelerinin etkileri (Lukas, 1995)

Green (2001) dinamik kompaksiyonun etki derinliğini (D) aşağıdaki eşitlikle ifade etmiştir:

$$D = n \times \sqrt{W \times H} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada;

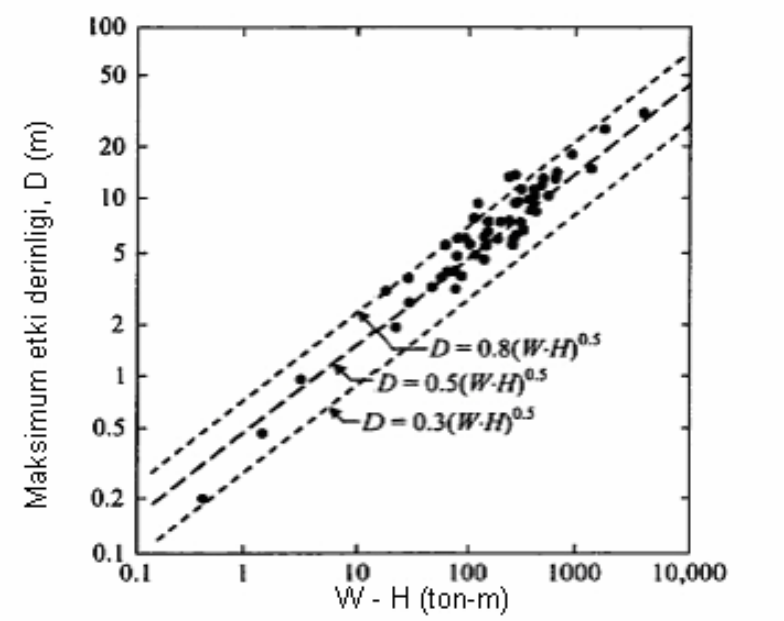
D : Etki derinliği (sıkılaştırılabilecek maksimum zemin derinliği) (m)

n : Ampirik sabit

W: Ağırlık (ton)

H : Ağırlık düşürme yüksekliği (m)

n'nin üç farklı değeri için bu eşitliğin grafiği Şekil 3.5' te çizilmiştir.



Şekil 3.5 Etki derinliği ve W.H arasındaki ilişki (Mayne, 1984)

n değerlerini etkileyen faktörler Lukas (1995) tarafından aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Kreynin ağırlık düşürme mekanizması
- Uygulanan enerjinin miktarı
- Sıkılaştırılan zemin cinsi
- Enerjiyi hapseden tabakaların varlığı
- Sıkılaştırılan tabakanın altında yada üstünde sert bir tabakanın bulunması
- Ağırlığın zemine teması sırasındaki basınç

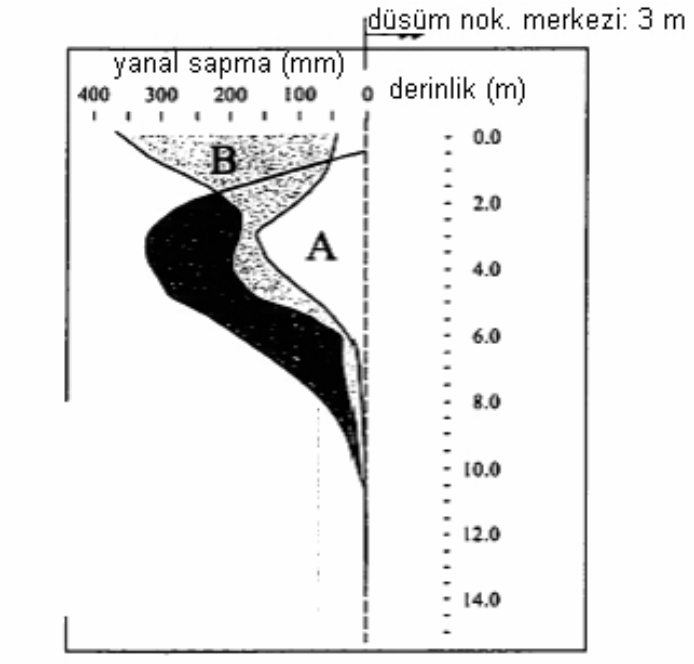
Genel olarak zeminin permeabilitesi arttıkça, "n" de artar. Tablo 3.1'de zemin cinsine bağlı olarak n'nin aldığı farklı değerler gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Zemin cinsine bağlı olarak n'nin aldığı farklı değerler (Green, 2001)

REFERANS	n değerleri
Menard ve Broise (1975)	1
Lenards (1980)	0,5
Ramaswamy (1981)	0,6*
Bhandari (1981)	0,51
Charles (1981)	0,35*
Santoyo ve Fuentes (1982)	0,37
Bjolgerud ve Haug (1983)	1 (kaya dolgu)
Smoltczyk (1983)	0,5 (dengesiz yapıda zeminler) 0,67 (silt ve kum) 1 (sürtünmeli zeminler)
Lukas (1984)	0,65 - 0,8
Mayne (1984)	0,3 - 0,8
Gambin (1984)	0,5 -1
Qian (1985)	0,55 (lös) 0,65 (ince kum) 0,66 (yumuşak kil)
Van İmpe (1989)	0,5 (killi kum) 0,65 (siltli kum)

NOT: * değerler Moreno (1983) tarafından hesaplanmıştır

Şekil 3.4'de gösterildiği gibi, en büyük iyileşme, genellikle etki derinliğinin yarısı ile 1/3'ü arasında meydana gelir (Lukas, 1995). Şekil 3.6'da görüldüğü gibi bu aralık maksimum yanal sapmanın derinlikle değişimine benzemektedir. Bu şekilde gösterilen veriler kompaksiyon noktalarının 3 metre dışında yapılan inklonometre ölçümlerinden alınmıştır. Maksimum sıkılaşma derinliği ile maksimum yanal sapma arasındaki benzerliğin büyük deviator kayma deformasyonlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



A: kohezyonlu zeminde 21,3 metrede 15 vuruş, 16,3 ton enerji

B: siltli kum zeminde 30,5 metrede 12 vuruş, 27,2 ton enerji

C: gevsek kum zeminde 18,3 metrede 15 vuruş, 15 ton enerji

Şekil 3.6 Kompaksiyon noktalarının 3 metre dışında yanal hareketler (Lukas, 1986)

Eşitlik 3.2 kullanılarak arazide birim alana uygulanan potansiyel enerji kümülatif olarak hesaplanabilir.

$$AE = \frac{N \times W \times H \times P \times g}{A_{cp}} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Burada;

AE: Uygulanan enerji (kJ/m^2)

W: Ağırlık (ton)

H: Ağırlık düşürme yüksekliği (m)

P: Geçiş sayısı

N: Her geçişte uygulanan ağırlık düşürme sayısı

g: Yerçekimi ivmesi

A_{cp}: Kompaksiyon noktası etki alanı (m^2)

Çeşitli zeminlerin sıkılaştırılabilmesi için uygulanması gereken enerji miktarları Tablo 3.2'de verilmiştir. Standart kompaksiyon ekipmanı ile sıkılaştırılabilecek maksimum zemin derinliği 11 metredir, bunun için 16 ton ağırlık 22,9 – 27,4 metreden düşürülür. Zemin daha çok sıkılaştırılmak isteniyorsa, ki bu maksimum 14 m olabilir, 27 ton ağırlık, özel kompaksiyon ekipmanı ile 30 metreden düşürülür (Elias ve diğerleri, 1999).

Tablo 3.2 Çeşitli zeminlerin sıkılaştırılabilmesi için uygulanması gereken enerji miktarları (Lukas, 1986)

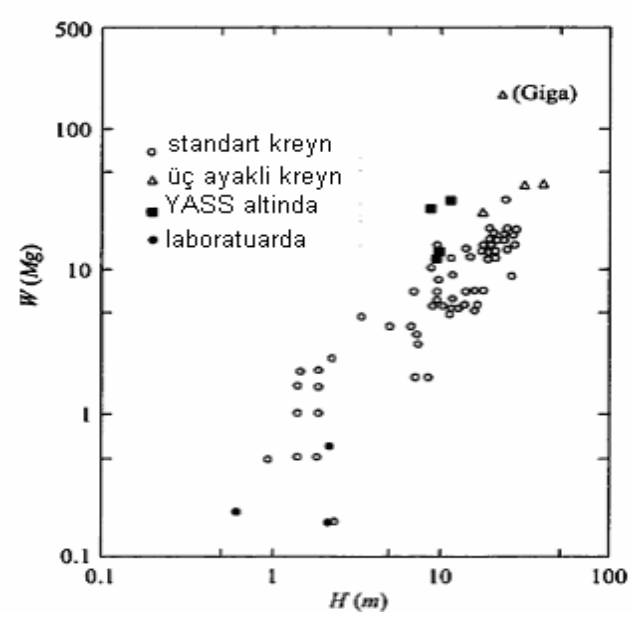
Zemin Çeşidi	Uygulanan Birim Enerji (kJ/m^3)	Standart Proctor Enerji Yüzdesi
Geçirgen iri daneli zemin (1.bölge)	200 - 250	33 - 41
Yarı-geçirgen ince daneli zemin (2.bölge) ve yer altı su seviyesi üstündeki kil dolgular (3.bölge)	250 - 350	41 - 60
Dolgular	600 - 1100	100 - 180
NOT: Standart Proctor Enerjisi = 600 (kJ/m^3)		

Dinamik kompaksiyon ile iyileştirilecek bir bölgede sıkılaştırma programının hazırlanmasında aşağıdaki aşamalar kullanılabilir:

1. Zemin tipine bağlı olarak gerekli kompaksiyon enerjisinin Tablo 3.2'den belirlenmesi
2. İstenen iyileştirme derinliği (D) miktarına bağlı olarak, Eşitlik 3.1 kullanılarak W – H hesaplanır. Uygun n değeri Tablo 3.1'den alınır. Şekil 3.7'den istenen W – H değerine yakın W – H değerleri seçilebilir. Tablo 3.3 ise seçilen W ağırlığı için gerekli kreyn boyutunu verir.
3. Eşitlik 3.2 kullanılarak gerekli vuruş ve geçiş sayısı belirlenebilir.

Tablo 3.3 Farklı uygulama ağırlıkları için gerekli kompaksiyon ekipmanı (Lukas, 1986)

Ağırlık	Kreyn Ağırlığı	Kablo Boyutu
3,5 - 7,5 ton	40 - 50 ton	19 – 22 mm
7,5 - 13 ton	50 - 100 ton	22 – 25 mm
13,5 - 16,5 ton	100 - 125 ton	25 – 29 mm
16,5 - 23 ton	150 - 175 ton	32 – 38 mm



Şekil 3.7 Ağırlık ile düşürme yüksekliği arasındaki ilişki (Mayne ve diğerleri, 1984)

Tablo 3.2'de gösterildiği gibi dinamik kompaksiyon için gerekli enerjiler, bazen bir Standart Proctor Testi sırasında uygulanan enerjilerin yüzdesi olarak da verilebilir. Dinamik kompaksiyon, Standart Proctor Testi'ne benzese de sıkılaştırmanın mekanizması ve uygulanan enerjinin yayılması farklıdır. Öncelikle, dinamik kompaksiyon sırasında meydana gelen yanal deformasyonlar, Proctor Testi'nde kabın rijitliği nedeniyle oluşmaz. Ayrıca, yanal deformasyonlara izin verilerek aynı sınır koşulları sağlansa da düşürülen ağırlıkların geometrileri farklı olduğundan uygulanan enerjinin yayılması da farklıdır. Dinamik kompaksiyonda uygulanan enerji P-, S- ve Rayleigh dalgaları şeklinde yayılır. Bu dalgalar tarafından taşınan enerji yüzdeleri Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi P-, S- ve Rayleigh dalgaları tarafından taşınan enerji yüzdeleri boyutsuz frekans parametresine (a_0) bağlıdır.

$$a_0 = \frac{\omega \times r_0}{v_s} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Burada;

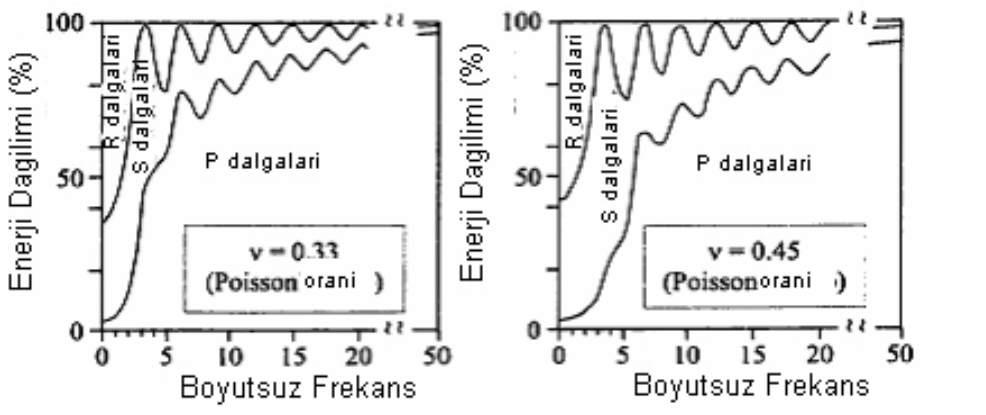
a_0: Boyutsuz frekans

ω: Uygulanan yükün frekansı

r_0: Proctor tokmağının çapına eşit dinamik ağırlık çapı

v_s: Zeminin kayma dalgası hızı

Şekil 3.8'de gösterilen koşullar (yarı elastik uzayda harmonik hareket yapan kütlesiz disk) dinamik kompaksiyondakilerden farklı olsa da, enerjinin yayılması benzer kabul edilebilir.

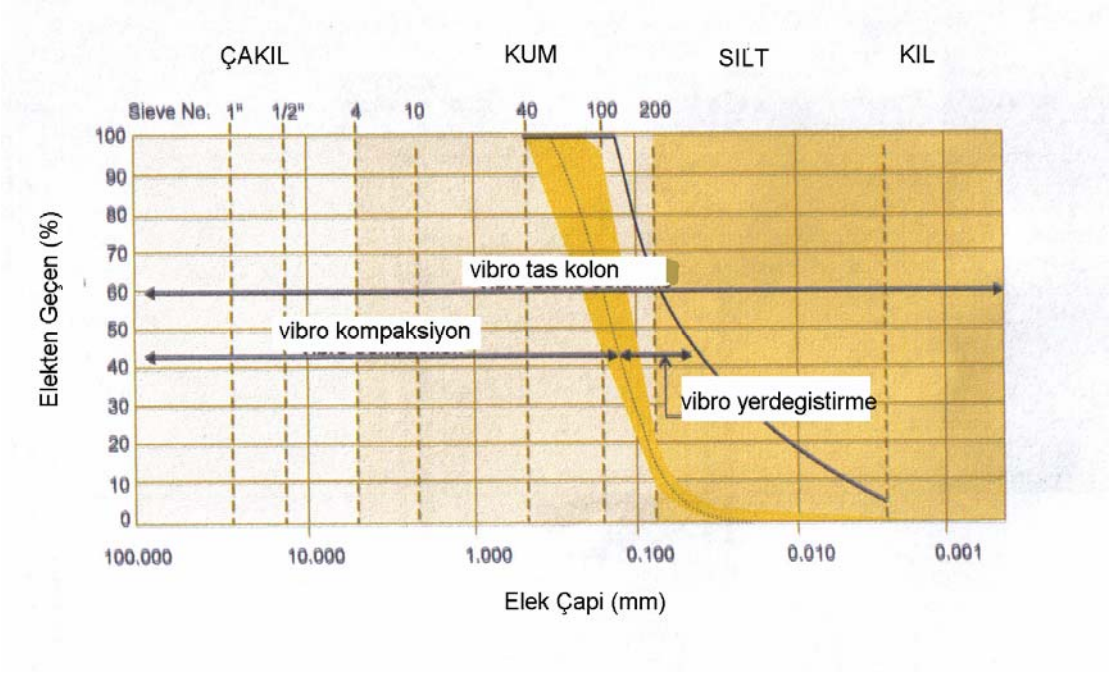


Şekil 3.8 Yarı elastik uzayda bir diskin titreşimi sonucunda yaydığı enerji dalgaları (Wolf ve Song, 1999)

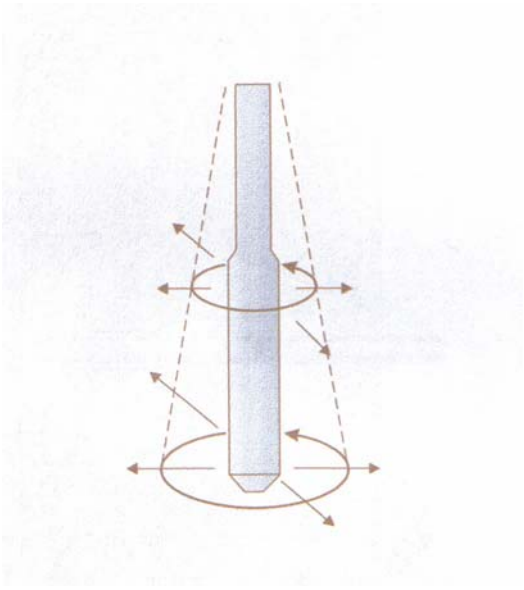
3.2 Vibro Sistemler

Vibro sistemlerde zemine yerleştirilen vibratörlerin yaydıkları titreşimler ile gevşek zemin sıkılaştırılır. Bu amaçla, kreynlere asılan vibratörler, genellikle su / hava jeti yardımıyla istenilen iyileştirme derinliğine kadar titreşimler ve kendi ağırlıkları ile indirilirler (Mitchell, 1981). İyileştirme derinliğinde eksantrik ağırlıkların (200 HP

gücüne kadar elektrik motorları ve 38 tona kadar eksantrik kuvvetler) kullanımı ile yatay titreşimler yaratılır. Vibro sistemlerin başarısı, iyileştirilecek tabakanın kalınlığı, SPT-N değerleri, dane dağılımı, kil içeriği gibi zemin özelliklerine bağlıdır. Vibro sistemler ile iyileştirilebilecek zeminlerin dağılımı Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



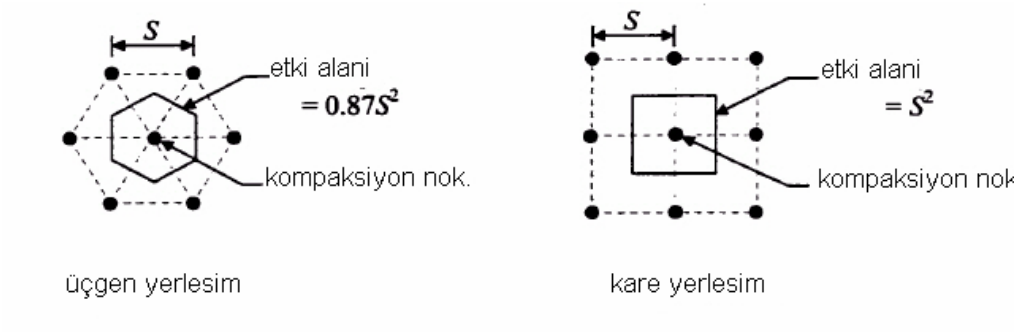
Şekil 3.9 Vibro tekniklerin uygulanabildiği dane çapı aralıkları (*http://www.haywardbaker.com*)



Şekil 3.10 Vibratörün hareket biçimi (*http://www.haywardbaker.com*)

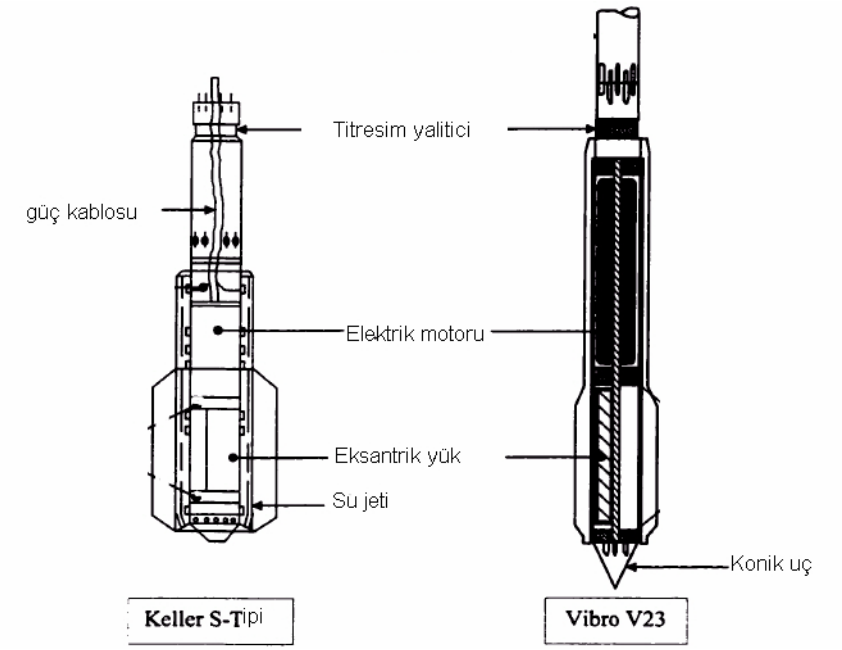
Vibratörün hareketi Şekil 3.10'da gösterildiği gibi yatay düzlemde radyaldır. Zeminin zayıf olduğu doğrultuda dinamik kuvvetler yaratan bu hareket, maksimum sıkılaşmayı sağlamada vibratör enerjisinin en etkili kullanımıdır. Yatay titreşimler ile birlikte su jetinin sıkılaştırıcı etkisi vibro sistemlerin karakteristik özelliğidir.

Vibro sistemler geniş arazilerde uygulandığında kompaksiyon noktaları planda Şekil 3.11'de gösterildiği gibi üçgen yada kare oluşturacak biçimde yerleştirilir. Kompaksiyon noktaları arasındaki mesafe zemin türüne, geri dolgu türüne, vibro sistem tipine, enerjiye, gerekli iyileştirme derecesine bağlı olarak 1 – 3 m olarak seçilir (Mitchell ve Gallagher, 1998). Vibro sistemler zemini iyileştirmede 20 metre derinliğe kadar başarıyla uygulanmakta olup, hatta bazı uygulamalarda 30 m derinliğe kadar da inildiği bilinmektedir.



Şekil 3.11 Kompaksiyon noktalarının planda yerleşimi

Vibratörde kullanılabilecek motorların fiziksel gücü ve boyutu vibratörün boyutu ile sınırlıdır. Vibratör boyutu ise zemine penetrasyon olabilecek maksimum çapa bağlıdır. Genelde vibratörün gücü 75 kW – 125 kW, çapı 0,4 metredir. En çok kullanılan vibratör çeşitleri Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Bu şekildekilere ek olarak Tablo 3.4'de çeşitli vibratörlerin teknik özellikleri verilmektedir.



Şekil 3.12 Vibro sistemlerde en çok kullanılan vibratör çeşitleri

(*http://www.haywardbaker.com*)

Tablo 3.4 Sık kullanılan vibratörlerin teknik özellikleri (Degen ve Hussin 2001)

Üretici	Bauer	Bauer	Keller	Keller	Keller	Keller	Vibro	Vibro
Makina Adı	TR13	TR85	M	S	A	L	V23	V32
Uzunluk *(m)*	3.13	4.20	3.30	3.00	4.35	3.10	3.57	3.57
Çap *(m)*	300	420	290	400	290	320	350	350
Ağırlık (kg)	1000	2090	1600	2450	1900	1815	2200	2200
Motor *(kW)*	105	210	50	120	50	100	130	130
Rpm	3250	1800	3000	1800	2000	3600	1800	1800
Yerdeğiştirme.Amp.	6	22	7.2	18	13.8	5.3	23	32
Dinamik Kuvvet *(kN)*	150	330	150	280	160	201	300	450

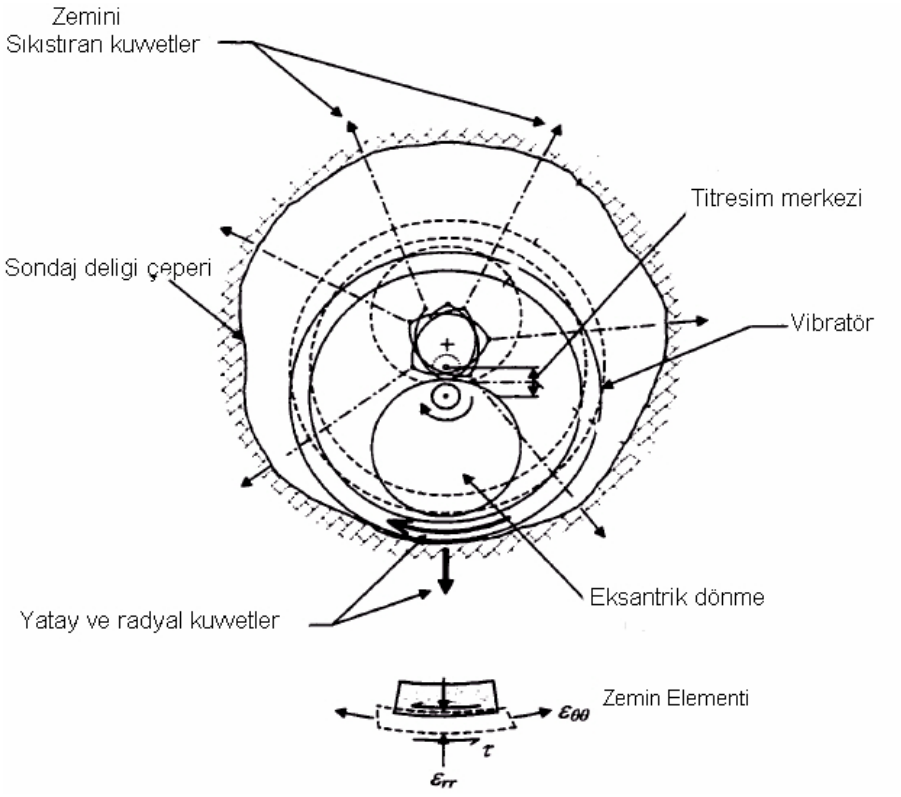
Vibratör ve çevresindeki zemin arasındaki ilişki, özellikle titreşim ile sıkılaştırma sırasında geri dolgu sondaj deliğine yerleştirilirken son derece karışıktır. Bu ilişki ve zeminde oluşan gerilme – şekil değiştirmeler Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yatay kuvvet zeminde hem radyal şekil değiştirmelere (ε_{rr}), hem de yanal

şekil değiştirmelere ($\varepsilon_{\theta\theta}$) sebep olmaktadır. Oluşan deviator kayma deformasyonları aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir:

$$\gamma_{dev} = \frac{1}{2}\left[\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta}\right] \qquad \textbf{(3.4)}$$

Burada,

γ_{dev} : deviator kayma deformasyonu
ε_{rr} : radyal şekil değiştirme
$\varepsilon_{\theta\theta}$: yanal şekil değiştirme



Şekil 3.13 Vibro tekniklerde titreşim etkisiyle zemini sıkılaştıran kuvvetler (Greenwood, 1991)

Yatay titreşimlere, su jeti etkisine ve geri dolguya bağlı olarak ortaya çıkan radyal ve yanal şekil değiştirmeler, zeminin üniformluğunu ve rijitliğini arttırdığı gibi aynı zamanda da dane dağılımını ve drenaj durumunu iyileştirmektedir. Bu nedenle, örneğin

1964 Niigata Depremi'nde vibro sistemlerle temelleri iyileştirilmiş yapılarda hasar görülmemesi bu tekniklerin sıvılaşmayı önlemede başarısını ortaya koymaktadır.

Vibro sistemlerin en çok kullanılan türleri Vibro – Kompaksiyon ve Vibro – Yerdeğiştirme'dir (taş kolon). Vibro – Kompaksiyon gevşek kum ve çakılları sıkılaştırmak için kullanılır. Yalnızca titreşimle sıkılaştırılamayan ince daneli zeminlerde ise iyileştirme Vibro – Yerdeğiştirme metodu kullanılarak taş kolon imalatı ile sağlanır (Şekil 3.9).

Bugüne kadar vibro teknikleri karşılaştıran bir çok çalışma yapılmıştır (Brown ve Glenn, 1976; Sailto, 1977; Schroeder ve Byington, 1972; Neely ve Leroy, 1991). Bu çalışmalarda hangi tekniğin daha etkili olduğu konusunda farklı sonuçlara varılmıştır. Aşağıda vibro sistemler ayrıntılı olarak incelenmektedir.

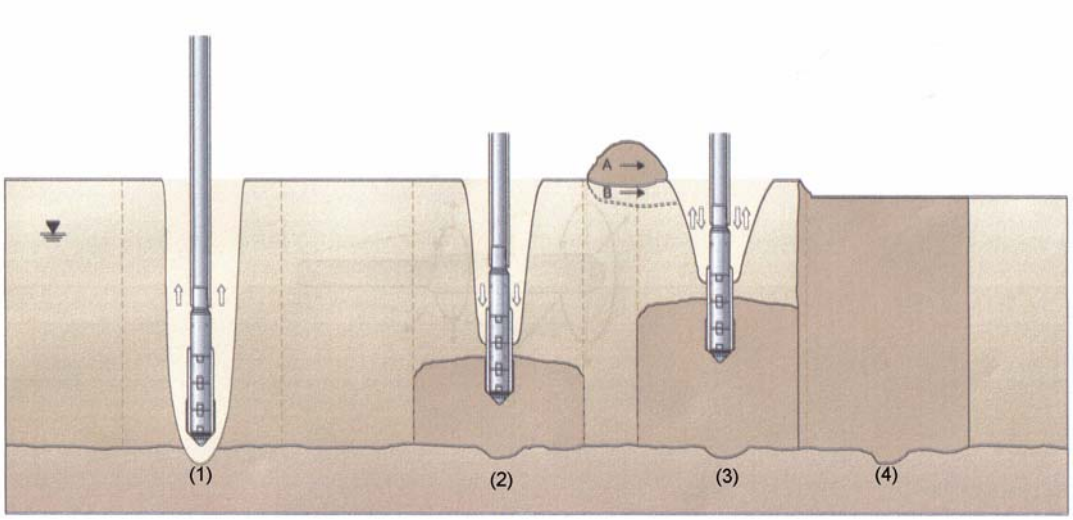
3.2.1 Vibro - Kompaksiyon

Vibro - Kompaksiyon ilk defa 1934'de Almanya'da S.Steuemann ve W.L. Degen tarafından uygulanmış, gelişimini burada sürdürmüş ve 1940'dan sonra Amerika'da da uygulanmaya başlanmıştır (Degen ve Hussin, 2001). Geçmiş yıllarda Vibro – Kompaksiyon, Vibrofloatasyon olarak da adlandırılmıştır. Vibro - Kompaksiyon uygulamasını gösteren fotoğraflar Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

Vibro - Kompaksiyon, temiz kohezyonsuz zeminleri sıkılaştırmada uygulanan birincil yöntemdir. Yöntemin uygulamasında genellikle vibratörün hareketine eşlik eden su jeti, zemin daneleri arasındaki sürtünme kuvvetlerini azaltarak, daha sıkı konuma hareket etmelerini sağlar. Vibratör tasarım derinliğine indirildikten sonra, iyileştirme önceden belirlenmiş derinlik aralıkları ile gerçekleştirilir. Kompaksiyon sırasında, vibratörün yarattığı titreşimlerle zemin sıkılaşırken, meydana gelen hacim azalmasını karşılamak için zemin yüzeyinden geri dolgu yapılır. Böylece orijinal zemin seviyesi korunur. Yöntemin uygulama aşamaları Şekil 3.15'de gösterilmektedir.



Şekil 3.14 Vibro - Kompaksiyon uygulaması (*http://www.haywardbaker.com)*



(1) Vibratörün tasarım derinliğine indirilmesi

(2) Titreşimlerle zeminin sıkılaştırılması

(3) Geri dolgu yapılması

(4) İyileştirilen zeminin yüzeyden sıkılaştırılması

Şekil 3.15 Vibro – Kompaksiyon tekniğinin uygulama aşamaları

(*http://www.haywardbaker.com*)

3.2.2 Vibro - Yerdeğiştirme

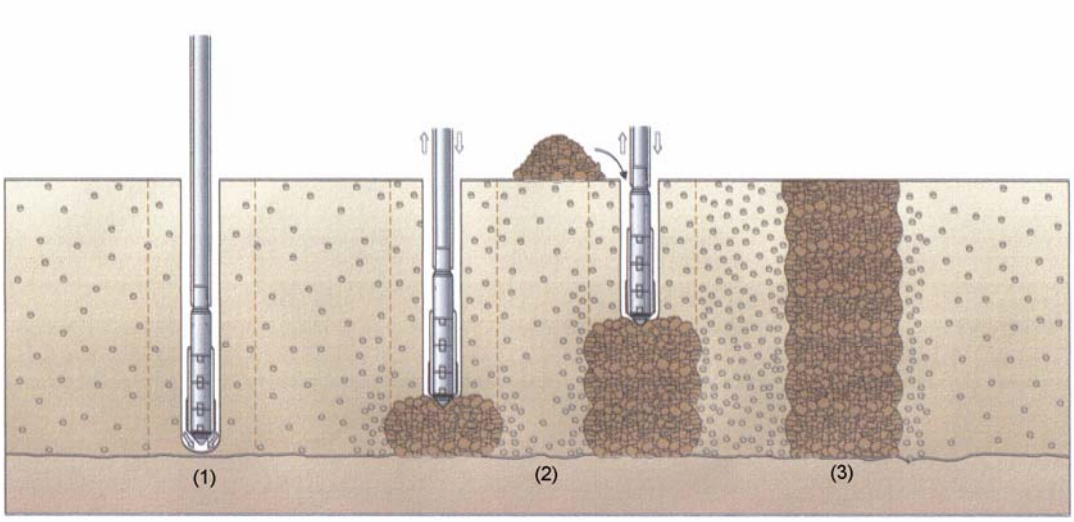
Kohezyonlu ve tabakalı zeminleri sıkılaştırmak için titreşimler tek başına yeterli olmamaktadır. Bu tür zeminler için Vibro - Yerdeğiştirme metodu geliştirilmiştir. Bu yöntemle vibro sistemlerin iyileştirebileceği zemin çeşitleri de genişlemiştir. Vibro - Yerdeğiştirme uygulamasını gösteren fotoğraflar Şekil 3.16'da gösterilmektedir.



Şekil 3.16 Vibro - Yerdeğiştirme uygulaması (*http://www.haywardbaker.com*)

Yöntemin uygulama aşamaları Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Öncelikle vibratör kendi ağırlığı altında, su jeti yardımıyla yada su jeti olmadan tasarım derinliğine indirilir. Sonra vibratör belirli aralıklarla kaldırılarak zemin yüzeyinden taş geri dolgu yapılır,

yapılan her taş dolgunun üzerine tekrar penetre edilen vibratörün oluşturduğu yatay kuvvetler ile taş kolon yanal olarak sıkılaştırılır. Bu işlem zemin yüzeyine ulaşıncaya kadar devam eder, sonuçta çok iyi sıkılaştırılmış bir taş kolon elde edilir. Vibro - Yerdeğiştirme metodu ile geliştirilen taş kolonlar taşıma gücünü arttırır, oturmaları azaltır, kayma dayanımını arttırır, sıvılaşma potansiyelini azaltır. Sıkılaştırılmış taş titreşim enerjisinin zemine aktarılmasına yardımcı olur. Taş kolon ve çevresindeki zemin sıkışabilirliği düşük, kayma dayanımı yüksek bir sistem oluşturur. Ayrıca taş kolonlar düşey dren görevi görerek fazla boşluk suyunun tahliyesini sağlarlar. Taş kolonlar değişik yüklere, zemin türlerine ve performans ihtiyaçlarına göre uygun olacak şekilde imal edilebilirler. Taş kolonlar arasındaki mesafe 1,5 – 3 m arasında seçilir.



(1) Vibratörün tasarım derinliğine indirilmesi

(2) Taş dolgu yapılması ve vibratörle sıkılaştırılması

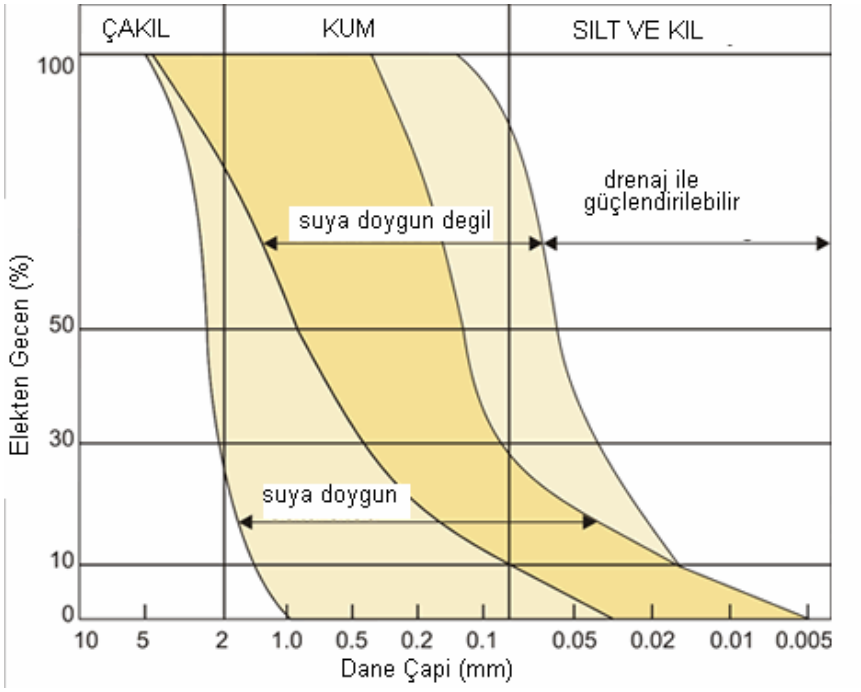
(3) Sıkılaştırılmış taş bir kolon elde edilmesi

Şekil 3.17 Vibro – Yerdeğiştirme tekniğinin uygulama aşamaları

(*http://www.haywardbaker.com*)

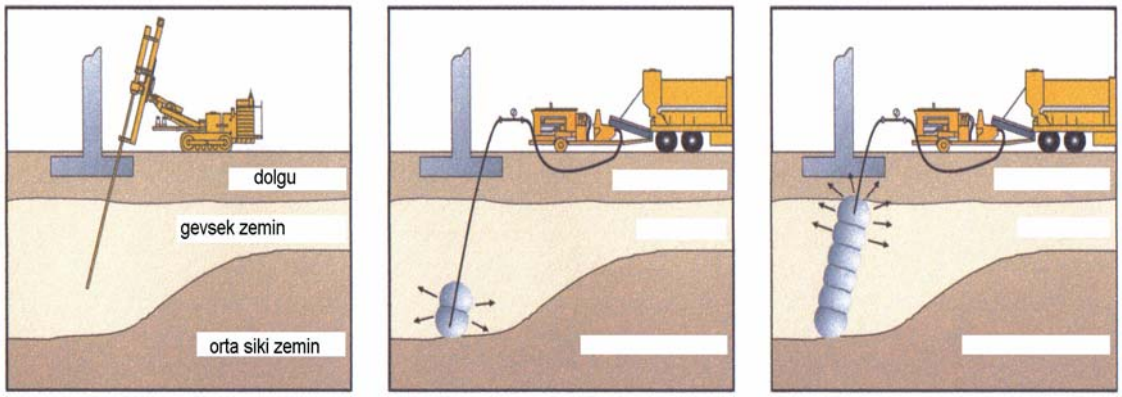
3.3 Jet - grout

Jet - grout 1950'lerden beri uygulanmaktadır. Uzun yıllar bu yöntem yapı oturmalarını önlemek amacıyla kullanılmış, son 20 yıldır ise gelişerek sıkılaştırma tekniği olarak sıvılaşma riskinin azaltılmasında uygulanmaya başlanmıştır. Yöntemin gelişmesi, Güney California da farklı oturmalar yapan kötü derecelenmiş dolgu zeminlerin iyileştirilmesinde geleneksel yöntemlerin yetersiz kalışı üzerine gerçekleşmiştir. Mevcut yapıların sıvılaşma riskine karşı güçlendirilmesi gerekliliği arttıkça jet - grout yöntemi yaygınlaşmış, ayrıca minimum deformasyona sebep oluşu, titreşim yaratmaması, dar yapısal alanlarda çalışmaya olanak vermesi, istenilen derinliğe kadar zeminde iyileştirme yaratabilmesi gibi özellikleri nedeniyle de diğer yöntemlere üstünlük sağlamıştır (Boulanger ve Hayden, 1995). Jet - grout her çeşit zeminde kullanılabilmekle birlikte, en çok suya doygun olmayan kumlarda ve plastik olmayan siltlerde etkili olmaktadır. Şekil 3.18'de yöntemin başarılı sonuçlar verdiği dane çapı aralığı gösterilmektedir.



Şekil 3.18 Jet - grout ile sıkılaştırılmaya uygun dane çapı aralığı (*http://www.haywardbaker.com*)

Jet - grout, yer değiştirme ile zemini iyileştirir. Şekil 3.19'da gösterilen yöntemin uygulamasında, yüksek basınç altında zemine çimento şerbeti enjeksiyonu yapılır. Bu şerbet çok viskoz olduğundan çevresindeki zemini yer değiştirme ile sıkılaştıran bir ampul veya kolon oluşturur. Enjeksiyon ampulünün boyutu ve şekli, zeminin rijitliği ve dayanımına, enjeksiyon şerbetinin verilme hızına bağlıdır.



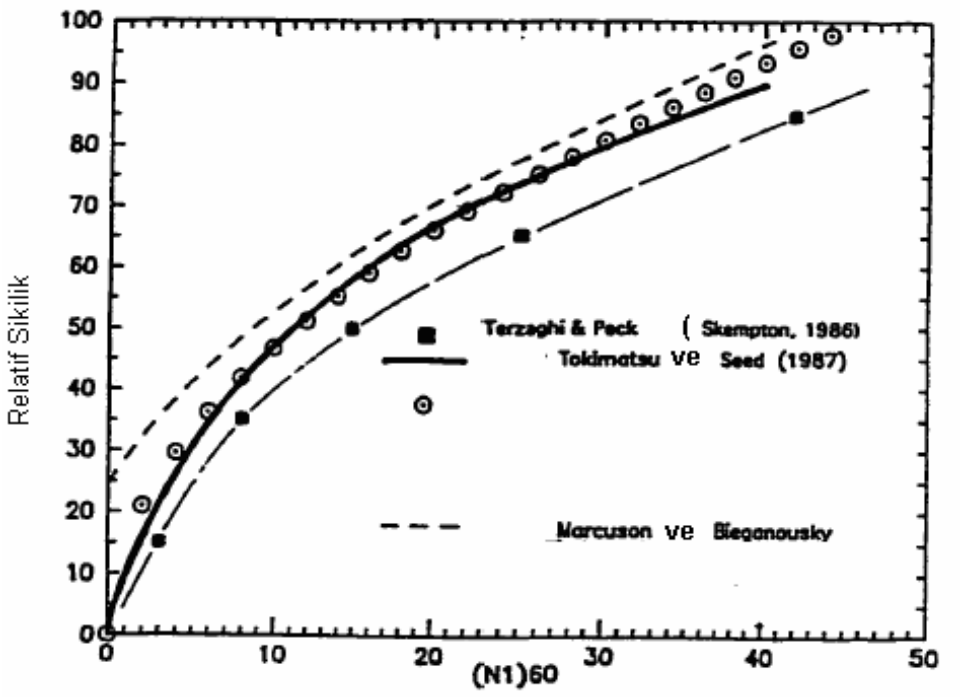
Şekil 3.19 Jet - grout tekniğinin uygulama aşamaları
(http://www.haywardbaker.com)

Jet - grout aralıkları genellikle 1 – 4,5 m arasında seçilir, derin zeminleri sıkılaştırmada daha geniş enjeksiyon aralıkları kullanılır. Çapları 1 metreden fazla olabilen jet - grout kolonlarının imalatları kolon çapına bağlı olarak bölümler halinde aşağıdan yukarı ya da yukarıdan aşağıya gerçekleştirilir. İmalat doğrultusunun seçilmesi zeminin özelliklerine, hedef bölge olarak adlandırılan iyileştirme yapılacak zemin bölgesinin derinliğine ve maliyet analizine bağlıdır. Uygulama şekline bir adet test kolonunun aşağıdan yukarı imal edilmesiyle karar verilir. Genelde yukarı doğru yapılan imalatın maliyeti daha düşüktür ve daha çok kullanılmaktadır.

Jet - grout projelerinde tasarım genellikle basit bir şekilde yapılır. İstenilen sıkılaşmanın miktarı SPT ve CPT değerleri olarak ifade edilir. Bu amaçla, sıkılaştırmadan önceki zeminin relatif sıkılığı (D_r) ve boşluk oranına (e_o) bağlı olarak, Şekil 3.20'deki gibi D_r ve SPT arasında korelasyon yapılarak, sıkılaşma sonrası zeminin relatif sıkılığı (D_r) ve boşluk oranı (e_f) bulunur.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \qquad \textbf{(3.5)}$$

Denklem 3.5'teki oran sıkılaştırılma yapılacak bölgede istenilen çapta bir jet - grout kolonu için ne kadar enjeksiyon yapılması gerektiğini hesaplamak için kullanılır. Ancak, bu eşitlik belirlenen hacimde tamamen enjeksiyon gerçekleştirildiğinde geçerlidir. Ayrıca uygulamada çoğu zaman tasarımda hesaplanan sıkılaştırma sonrası boşluk oranı (e_f) değerlerine ulaşılamamaktadır.



Şekil 3.20 SPT ve relatif sıkılık (D_r) arasındaki ilişki (Torrey, 1994)

Geçmiş deneyimler, jet - grout yönteminin penetrasyon direncini arttırması sayesinde sıvılaşmayı önlemede oldukça yararlı bir yöntem olduğunu göstermiştir. Tasarım aşamasında zeminin sıkılaştırılması için gerekli jet - grout miktarının doğru tahmin edilememesi, yöntemin etki mekanizmasının da çözülmesini güçleştirmektedir. Yanal gerilmelerin artışının zeminin sıkılaştırılmasında rol oynadığı kanıtlanmakla beraber, diğer yandan bu sıkılaşmanın zamanla kaybolabilmesi de kaygı yaratmaktadır.

Sıvılaşma riskinin azaltılmasında jet - grout yönteminin rahatlıkla ve ekonomik bir şekilde uygulanabilmesi için etki mekanızmasının çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu konuda çalışan Boulanger ve Hayden 1995'de şu konulara dikkat çekmişlerdir:

1. Hacim artışlarının jet - grout kolonu çevresinde dağılımı
2. Sıkılaştırma sonucu ortaya çıkan sükunetteki gerilmeler
3. Yanal gerilmelerin ve yoğunluk artışının sıvılaşma direncine etkisi
4. Jet - grout kolonlarının arazinin sismik aktivitesine etkisi

Bu maddeler jet - grout yöntemini anlamak ve analiz etmek için temel teşkil etmektedir.

3.4 Patlatma

Patlatma, dinamik kompaksiyona benzer şekilde zemine ani enerji uygular. Zemine yerleştirilen patlayıcıların patlatılması ile açığa çıkan bu enerji geçici sıvılaşma yaratarak zemin danelerinin daha sıkı konuma gelmelerini sağlar. Bu yöntem ilk kez 1930'da Amerika'nın New Hampshire bölgesinde bir baraj yapımında başarıyla uygulanmıştır (Lyman, 1942). Ancak bu erken başarısına rağmen, sıvılaşmayı önleyici bir teknik olarak literatüre yakın zamanda girebilmiştir.

Patlatma ile sıkılaştırılmaya en uygun zeminler, başlangıç relatif sıkılığı % 50 den az olan, % 20'den az silt ve % 5'den az kil içeren gevşek kumlardır. Zeminin çok az miktarda kil içermesi bile patlatmanın etkinliğini azaltmaktadır. Yöntem, tamamen suya doygun zeminleri sıkılaştırmada etkilidir, ancak kısmen doygun zeminlerdeki kılcal çekim ve gaz kabarcıkları patlamanın etkisini azaltır (Gohl ve diğerleri, 2000).

Patlatmanın en büyük avantajı, dinamik kompaksiyon ve vibro tekniklerin kullanılamadığı derin zemin tabakalarında uygulanabilmesidir. Patlatma ile zeminler 40 metreye kadar başarıyla sıkılaştırılabilmekte, maksimum etki derinliği ise henüz bilinmemektedir (Solymar, 1984). Genel olarak, büyük derinlikler için gerekli patlayıcı

miktarının fazla olması ve bu patlayıcıların o derinliklere yerleştirilebilmesinin yarattığı zorluklar bu tekniğin etki derinliğinin belirlenmesinde engel teşkil etmektedir. Ancak zemin yüzeyinde patlatma sonucu göçükler oluşturmamak için derinlik - patlayıcı miktarı ilişkisinin mutlaka belirlenmesi gerekmektedir.

Yöntemin tipik uygulaması, sondajla yada basınçlı su ile açılmış kuyularda düşey olarak 3 – 6 m aralıklarla yerleştirilmiş 2 – 15 kg arasında değişen çoklu patlayıcıların patlatılması şeklinde yapılır (Mitchell ve Gallagher, 1998). Kuyular arası mesafe 5 – 15 m arasında seçilir. Derinliği 10 metreden az olan zemin tabakalarında patlayıcılar sıkılaştırılacak zemin tabakasının kalınlığının yarısına yada 1/3'üne yerleştirilir. Derinliği 10 metreden fazla olan zemin tabakaları ise alt tabakalara ayrılır ve her tabakaya ayrı bir patlayıcı yerleştirilir. Sıkılaştırmanın etkinliğini arttırmak için, farklı seviyelerdeki patlayıcılar küçük zaman aralıklarından oluşan gecikmelerle patlatılabilir (Narin van Court ve Mitchell, 1995).

Patlatmadan hemen sonra zemin yüzeyi yükselir ve çatlaklardaki su ve gaz dışarı itilir, bu esnada aşırı gaz ve su basıncı sönümlenirken zemin yüzeyinde ani oturma meydana gelir. Bir patlatma uygulaması sonrası görünüm Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Bu oturmanın miktarı sıkılaştırılmak istenen zemin tabakası kalınlığının % 2 – 10' u civarında olmaktadır. Patlatma işlemi kademeli yapıldığında, ilk patlamada en büyük oturma meydana gelir, sonraki patlamalarda oturma miktarı azalır. Oturma ani olsa da penetrasyon direnci zamana bağlı olmakta ve tamamlanması haftalarca sürmektedir (Mitchell ve Gallagher, 1998).



Şekil 3.21 Patlatmadan hemen sonra görünüm (Mitchell ve Gallagher, 1998)

Patlatma ile sıkılaştırmada gerekli patlayıcı miktarının belirlenmesi için 3 çeşit yöntem kullanılmaktadır. Bunlar Hopkinson sayısı, normalize edilmiş ağırlık ve barut faktörüdür (Narin van Court ve Gallagher, 1994). Hopkinson sayısı (HN) en çok tercih edilen yöntemdir ve şu eşitlikle ifade edilir:

$$HN = \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \qquad \textbf{(3.6)}$$

Burada,

HN: Hopkinson sayısı $(kg^{0,33} / m)$

W: Patlayıcı ağırlığı (TNT olarak) (kg)

R: Patlayıcı merkezinden zemin tabakasına olan uzaklık (m)

Hopkinson sayısı, patlayıcı ağırlığı ve mesafeyi hesaba katar, patlayıcı geometrisi ile ilgilenmez. Sonuç olarak bu yöntemin büyük derinliklerde kolonsal yerleştirilen patlayıcılar için değil, sığ derinliklerde yerleştirilen patlayıcılar için uygun olduğu kabul edilmektedir.

Kolonsal yerleştirilen patlayıcılarda gerekli patlayıcı miktarının belirlenmesinde en iyi yöntem normalize ağırlık yöntemidir ve şu eşitlikle ifade edilir.

$$NW = \frac{\sqrt{Q}}{R} \tag{3.7}$$

Burada,

NW: Normalize ağırlık $(kg^{0,5} / m^{1,5})$

Q: Birim mesafeye gelen patlayıcı ağırlığı (kg / m)

R: Patlayıcı kolonu merkezinden olan radyal mesafe (m)

Barut faktörü ise, birim hacime düşen zemini sıkılaştırmak için gerekli patlayıcı miktarının belirlenmesinde kullanılır ve şu eşitlikle ifade edilir.

$$PF = \frac{W}{V} \tag{3.8}$$

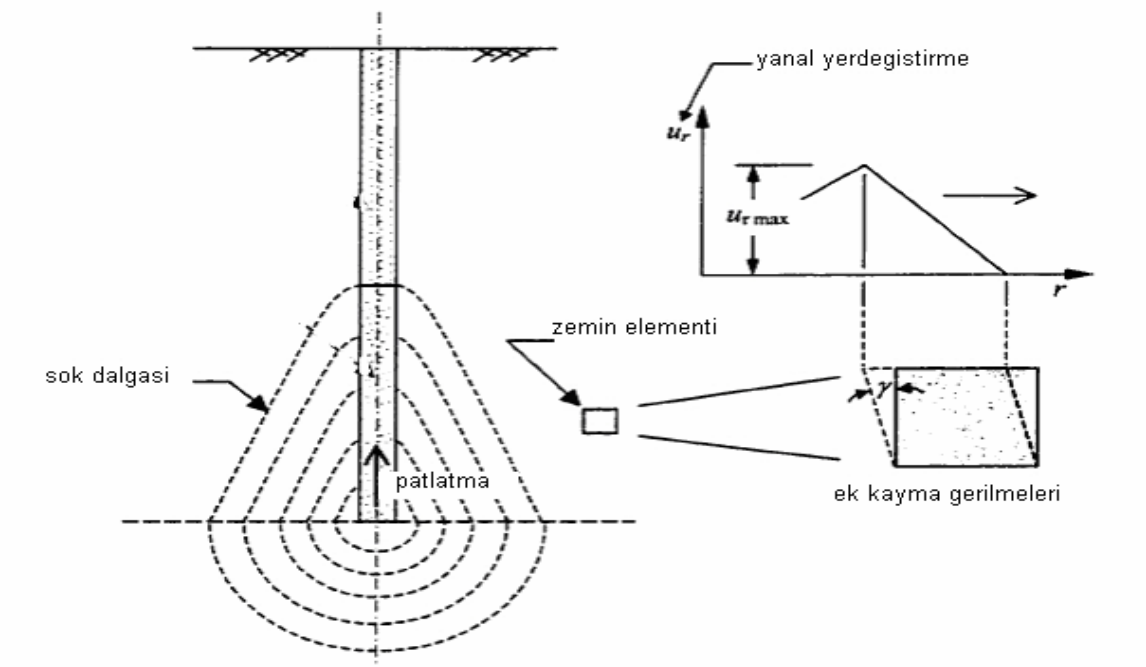
Burada,

PF: Barut faktörü (g / m^3)

W: Patlayıcı ağırlığı (g)

V: Sıkılaştırılan zemin hacmi (m^3)

Genellikle patlayıcılar küresel değil silindirik, patlatma düzeni ise aynı anda değil teker teker patlatma şeklindedir. Bu nedenle Şekil 3.22'de gösterildiği gibi şok dalgası konik şeklinde oluşmaktadır. Görüldüğü gibi patlatma işlemi aşağıdan yukarı doğru yapıldığında başarılı bir şok dalgası elde edilmektedir. Ayrıca konik şeklindeki şok dalgasının zeminde ek kayma gerilmeleri yarattığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.22 Konik şeklindeki şok dalgasında oluşan kayma gerilmesi (Hryciw, 1986)

Oluşan kayma gerilmesinin değeri şu eşitlikle ifade edilir:

$$\gamma_{con} = \frac{\upsilon}{V_d} \tag{3.9}$$

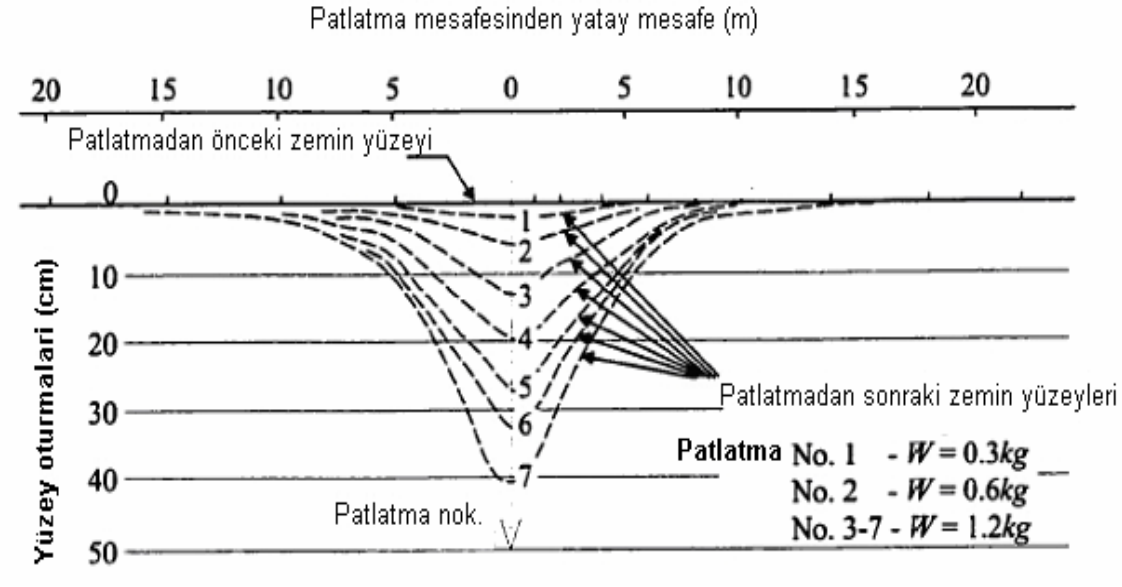
Burada,

γ_{con} : Şok dalgasının konik ucu nedeniyle oluşan kayma gerilmesi
υ : Şok dalgasının parçacık hızı
V_d : Patlayıcının patlama hızı

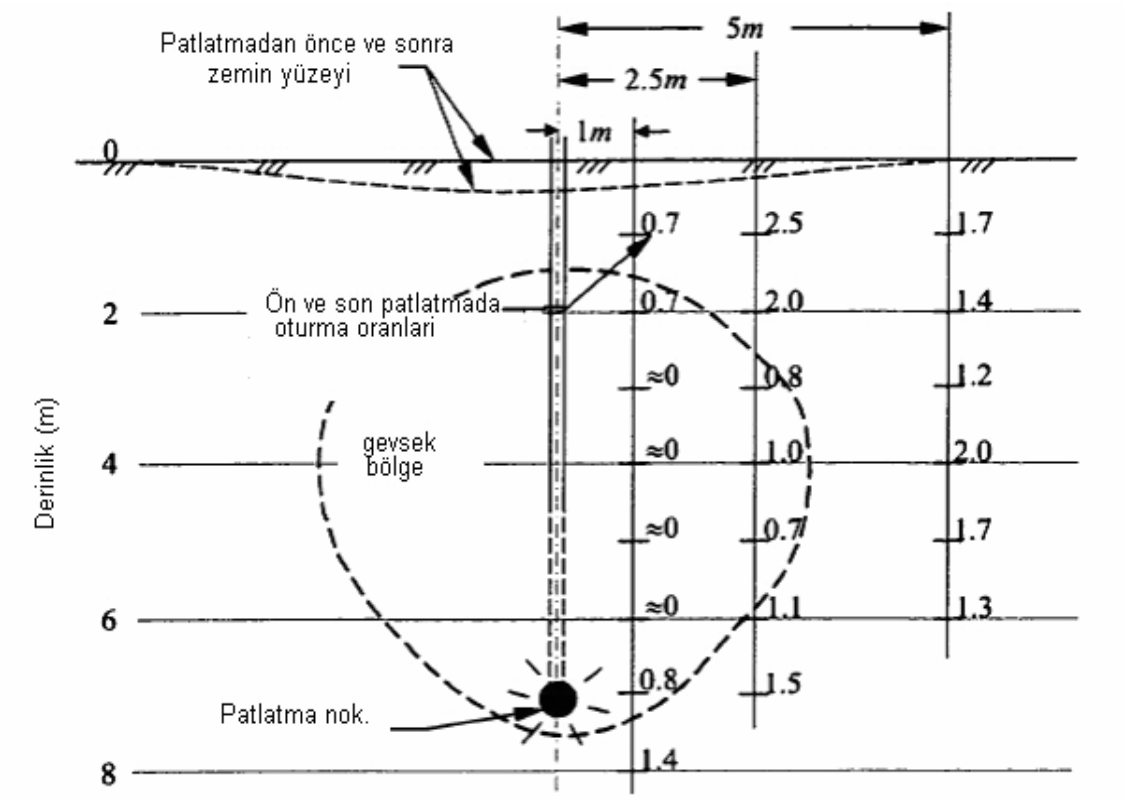
Şuna da dikkat edilmelidir ki, burada bahsedilen kayma gerilmeleri bazı kaynaklarda anlatıldığı gibi Rayleigh dalgalarından değil, sıkışma dalgalarından kaynaklanmaktadır (Green, 2001).

Doğal zemin tabakalarında zeminin sıkışması esnasında sınır koşulları daha farklı mekanizmaların devreye girmesini sağlamaktadır. Bu mekanizmalar zemin yüzeyinden ve sınır tabakalardan yansıyan sıkışma dalgalarının Rayleigh ve kayma dalgaları oluşturmasını da kapsamaktadır. Ayrıca izotrop olmayan gerilme durumları ve değişen zemin sıkılığı dalgaların dağılmasını sağlar.

Bir kıyı bölgesinde gevşek kumda yapılan arazi çalışması Şekil 3.23'de gösterilmiştir (Kummeneje ve Eide, 1961). Şekil 3.23a'da yüzey oturmalarının patlama merkezinden itibaren yatay mesafede değişimi, 3.23b'de ise ön ve son patlamalarla oluşan oturmalar gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.23 a) Farklı derinliklerdeki 7 patlatmanın yüzeyde yarattığı oturmalar,b) Ön ve son patlamalarla oluşan oturmalar (Kummeneje ve Eide, 1961)

Patlatma oldukça ekonomik ve etkili bir sıkılaştırma tekniği olmasına rağmen, çevre yapılarda hasar oluşturabilecek titreşimler yaratması, yüzeyde oturmaya sebep olması, taşıma ve depolamada sorun çıkarabilecek tehlikeli patlayıcıların kullanımını gerektirmesi gibi nedenlerle uygulama alanı kısıtlıdır.

3.5 Sıkılaştırma Tekniklerinin Karşılaştırılması

Sıvılaşmayı önlemede en çok kullanılan yöntem olan sıkılaştırmada amaç, gevşek ve suya doygun zeminlerin deprem sarsıntısı sırasında aşırı boşluk suyu basıncı oluşturma eğilimini azaltmaktır. Sıkılaştırma teknikleri, granüler zeminlerin titreşime maruz kaldığında sıkılaşma eğilimine dayanır. Sıkılaşmayla birlikte aşırı boşluk suyu basıncı oluşmadığı gibi aynı zamanda zemin dayanımı ve rijitliği de artmaktadır. Sıkılaştırma

teknikleri, önemli ölçüde oturmaya sebep olması ve çevre yapılar ile boru hatları için potansiyel hasar oluşturabilen titreşimler yaratması nedeniyle her sahada uygulanamamaktadır.

Sıkılaştırma tekniklerinden dinamik kompaksiyon, vibro sistemler, patlatma ve jet - grout, her bir teknikte zeminin birim hacmini sıkılaştırabilmek için uygulanması gereken mekanik enerji miktarları baz alınarak karşılaştırılabilir. "Mekanik enerji" terimi mekanik işleri yapmak için kullanılabilir olan enerjiyi ifade eder, diğer şekillerde harcanan enerjilerden farklıdır (ısı enerjisi gibi). Bu enerjiler arasındaki fark dinamik kompaksiyon örneği düşünülerek anlaşılabilir. Dinamik kompaksiyon sırasında harcanan toplam enerji, ağırlığı kaldıran kreynin harcadığı yakıt olarak ifade edilebilir. Ancak kreynin yanma motorunun etkinliği gibi şeyler göz önüne alınırsa, zeminin birim hacmini sıkılaştıran mekanik enerji, ağırlığın düşürülme yüksekliğindeki potansiyel enerjisi olarak alınır. Bu bölümde vibro sistemler, dinamik kompaksiyon, patlatma teknikleriyle bir gevşek temiz kum numunesinin birim hacminin sıkılaştırılabilmesi için uygulanması gereken mekanik enerjiler hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır (Green, 2001).

3.5.1 Vibro Sistemler

1977'de Brown'un, 1953'de D'Appolonia'nın tanımladığı gibi vibratörün harcadığı güç kompaksiyon işlemini etkilemektedir. Zemin sıkılaştıkça, harcanan güç artar. Güç pik noktasına ulaştığında, vibratör sonraki yere kaldırılır, bu anda güç düşer ve kompaksiyon yeniden başlar. Şekil 3.24'de bu olay gösterilmiştir (Degen ve Hussin, 2001). Şekilden de görüldüğü gibi, istenilen iyileştirme derinliği olan 8 m için, vibratör 4 m'den sonra aşağı yukarı hareket yaparak zemine penetre edilir. Penetrasyon süresi 1 dk' nın üzerindedir. 8 m'ye ulaştıktan sonra kompaksiyon işlemi başlar, bu nokta şekilde t = 0 olarak gösterilmiştir. Vibratör 0,5 m aralıkla kaldırılır ve her pozisyonda 45 sn tutulur.

Vibratörün ortalama çalışma gücü şu eşitlikle ifade edilir:

$$P = I.E.pf.eff\frac{\sqrt{3}}{1000} \qquad \textbf{(3.10)}$$

Burada,

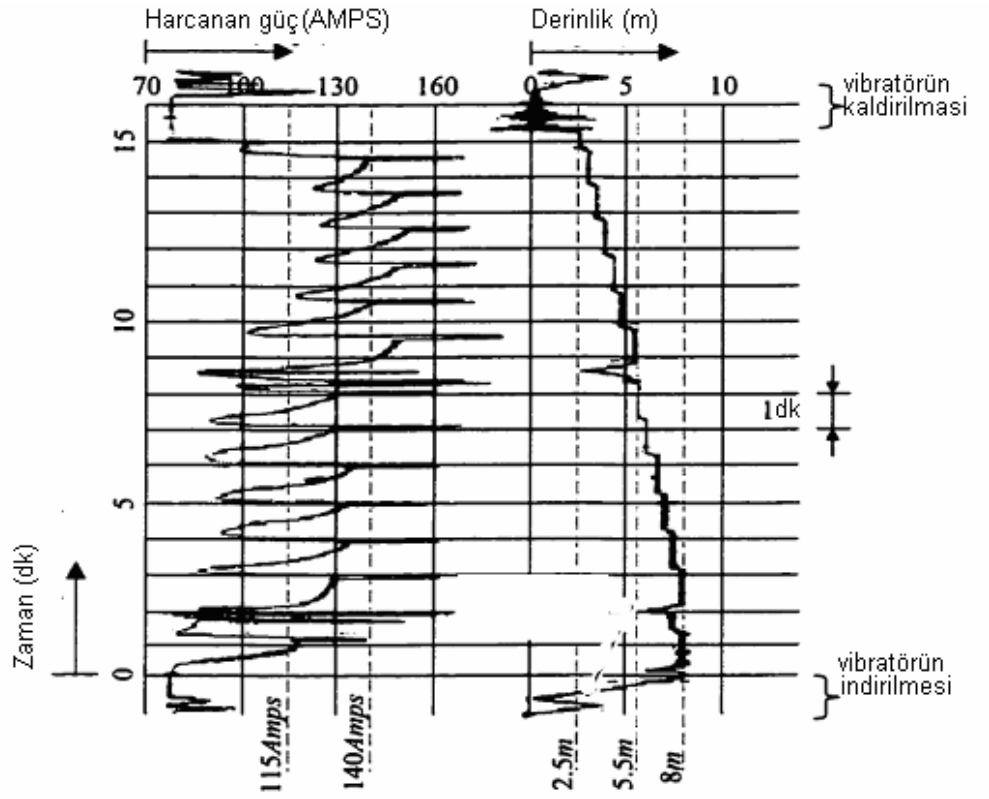
P : Vibratörün gücü (kW, kj/sn)

I : Ortalama harcanan güç (Amps)

E : Vibratörün voltaj ihtiyacı (volt)

pf : Ortalama güç faktörü (0,8)

eff : Elektrik motorunun etkinliği (0,9)



Şekil 3.24 Bir Vibro – kompaksiyon uygulaması sırasında kaydedilen data (Degen ve Hussin, 2001)

Vibratör gücü ve pik noktalarına bağlı olarak zemin profilinin 2,5 – 5,5 m ve 5,5 – 8 m'lik 2 tabakadan oluştuğu kabul edilebilir. Buna göre üst ve alt tabakalar için ortalama güç 140 Amps ve 115 Amps olarak bulunur. Vibro V23 vibratörü için (440 volt) eşitlik 3.10 kullanılarak vibrofloatın üst ve alt tabakada çalışma gücü (P) 77 ve 63 kW bulunur. Kompaksiyon gücü, çalışma gücü ve kompaksiyon noktası etki alanı bilinirse zeminin birim hacmini sıkılaştırmak için gerekli mekanik enerji hesaplanabilir. Şekil 3.24'den kompaksiyon gücü 0,37 m/dk olarak seçilir. Bu değer Mitchell tarafından 1981'de önerilen 0,3 m/dk değerine yakındır. Kompaksiyon noktası etki alanı 7,5 m^2 alınırsa, zemin profilinin sıkılaştırılması için gerekli mekanik enerji aralığı:

$$(63-77kW)\left[\frac{dk}{0,37m}\times\frac{60sn}{dk}\right]\frac{1}{7,5m^2}=1362-1665kj/m^3 \text{ dir.} \qquad \textbf{(3.11)}$$

3.5.2 Dinamik Kompaksiyon

Lukas (1986) tarafından Tablo 3.2'de verilen zemin türlerine göre sıkılaştırma enerjileri incelenirse, 1.Bölge'de bulunan bir iri daneli zemin numunesini sıkılaştırmak için gerekli mekanik enerjinin 200 – 250 kj/m^3 olduğu görülür.

3.5.3 Patlatma

Zeminin birim hacmini sıkılaştırabilmek için gerekli patlayıcı miktarı 1995'de Van İmpe ve Madhav tarafından 15 – 35 g/m^3 olarak verilmiştir. Benzer şekilde 1967'de Ivanov tarafından listelenen vaka analizlerinde de bu aralık 8 – 28 g/m^3 olarak verilmiştir. Kalorimetre ölçümlerinden TNT'nin enerji yoğunluğu 4560 j/g bulunmuştur. Ancak patlatma esnasında bu enerjinin yalnızca % 67'si mekanik enerjiye dönüşür (Kennedy, 1996). Bu verilere göre, patlatma ile zeminin birim hacmini sıkılaştırabilmek için gerekli mekanik enerji 22 – 100 kj/m^3 aralığındadır.

Özet olarak zeminin birim hacmini sıkılaştırmak için gerekli mekanik enerji miktarları çeşitli tekniklerde şöyledir:

Vibro Sistemler : 1362 – 1665 kj/m^3
Dinamik Kompaksiyon : 200 – 250 kj/m^3
Patlatma : 22 – 100 kj/m^3

Bu aralıkların karşılaştırılmasından, *patlatma* en çok etkili, *vibro sistemler* ise en az etkili yöntem olarak görülmektedir (burada patlatma tekniği zeminin birim hacmini minimum enerjiyle sıkılaştırmaktadır). Yöntemlerin etki derecelerini etkileyen olası neden, her teknikte enerjinin zemine transfer şeklinin farklı olmasıdır.

Vibro sistemlerde enerji zemine uzun bir zaman aralığında aktarılır, bu esnada zemin özellikleri sürekli değişir. Vibratörün etrafındaki zeminde sıvılaşma meydana geldiğinde, vibratör etki alanı dışında kalan sıvılaşmamış zemine ise çok az enerji aktarılır. Ayrıca vibro sistemler hem zemini sıkılaştırarak hem de yanal çevre basıncını arttırarak zemini iyileştirir. Asıl iyileşme büyük ölçüde geri dolgunun yanal kompaksiyonundan sağlanır. Buna göre yukarıda sıralanan enerji aralıkları, hem doğal profilde sıvılaşma için gerekli enerjiyi hem de geri dolgu malzemesini yanal sıkılaştırmak için gerekli enerjiyi yansıtır.

Dinamik kompaksiyonda enerji zemine çok hızlı bir biçimde aktarılır. Ancak enerjinin büyük bir kısmı yüzey dalgaları şeklinde taşınır, bunun da derindeki zemin tabakalarını sıkılaştırmada etkisi azdır. Patlatma tekniğinde ise dinamik kompaksiyondan farklı olarak zemine aktarılan enerji gövde dalgaları ile taşınır ve bu dalgalar derindeki zemin tabakalarını sıkılaştırmada yüzey dalgalarından çok daha etkilidir. Ayrıca Ivanov'un 1967'de listelediği vaka analizlerine göre zeminin birim hacmini iyileştirmek için gerekli patlayıcı miktarı yüzeysel patlatmada, derin patlatmaya göre 5 – 10 kat fazladır.

Bu bölümde vibro sistemler, dinamik kompaksiyon ve patlatma teknikleri incelenmiştir. Bu tekniklerin zemini sıkılaştırma mekanizmaları ve her teknikte tasarım esnasında

seçilen parametreler tartışılmıştır. Sonuç olarak, incelenen teknikler zeminin birim hacmini sıkılaştırmada uygulanan mekanik enerjiler yönünden karşılaştırılmıştır. Her ne kadar mekanik enerjiler tekniklerin karşılaştırılmasını sağlasa da, enerjinin zemin içerisinde nasıl yayıldığı konusunda açıklayıcı olamamaktadırlar. Bu bilgi ise sıkılaştırma teknikleri ve depremler sırasında sıvılaşmayı önlemek için gerekli enerjinin bulunması için gereklidir.

4. SIVILAŞMAYI ÖNLEYEN TEKNİKLERİN UYGULANDIĞI VAKA ANALİZLERİ

4.1 Dinamik Kompaksiyon ile Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi

Bu bölümde, Bursa Carrefoursa inşaatı için temel zemininin dinamik kompaksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi vaka analizi şeklinde sunulmaktadır. Söz konusu alan Bursa - İzmir karayolunun 5. km'sinde Orhaneli yolu kavşağında, Nilüfer çayının alüvyonel birikinti konisi içerisinde yer almaktadır (Durgunoğlu, 2002).

İnşaatın yapılacağı alan daha önceden kum çakıl ocağı ve hafriyat döküm sahası olarak kullanıldığından, derinliği mevcut zemin kotlarından 14 m'ye varan çukur alanlar ve kalınlığı 14 m'ye ulaşan kontrolsüz dolgular içermektedir. Zemin profilinde 15 m derinliğe kadar doğal zemin olan alüvyonel kil kum çakıl karışımları, en altta ise Neojen yaşlı killi kum - kumlu kil zeminler bulunmaktadır. Saha birinci derece deprem bölgesindedir (Durgunoğlu, 2002).

Zemin etüdleri kapsamında SPT ve presiyometre deneyleri yapılmıştır. Kontrolsüz dolgu içerisinde bulunan SPT-N değerleri N=10 ila refü değeri arasında değişmiş, bu da dolgu zemin içerisinde iri blokların mevcudiyetine işaret etmiştir. Buna karşın elek analizi sonuçlarına göre kontrolsüz dolgudan alınan numunelerde 200 no'lu elekten geçen yüzde değerleri % 8 ila % 98 arasında değişmekte olup, sahada karşılaşılan dolgu zeminin çok değişken yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Zemin iyileştirilmesinin izlenmesi amacıyla, iyileştirme öncesi saha içerisindeki farklı zeminleri temsil eden altı farklı noktada temel alt kotlarından 15 m derinliğe kadar 1.0 m ara ile presiyometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, limit basınç değerlerinin % 70'inin 5 bar'ın altında olduğunu göstermektedir. Ayrıca presiyometre deney sonuçları zeminin heterojen yapısını ve tabakasız değişken yapıya sahip olduğunu göstermekte olup, doğal zeminde yapılan deney sonuçlarının

diğer alanlarda yapılanlara nazaran daha yüksek limit basınç değerine sahip olduğu görülmüştür.

Başlangıçta, saha içerisindeki çukur alanlar dolgu malzemesi ile doldurularak tesviye edilmiştir. Çukur alanların geri dolgu öncesi görünüşü Şekil 4.1'de verilmektedir. Hipermarket ve ticaret merkezi yapılarının üzerine inşa edileceği kontrolsüz dolgu zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi ve oturmaların azaltılması amacıyla dinamik kompaksiyon ve Yüksek Enerji Kolonları yöntemleri birlikte uygulanmıştır (Durgunoğlu, 2002).

.



Şekil 4.1 Çukur alanların ıslah öncesi görünüşü (Durgunoğlu, 2002)

Dinamik kompaksiyon yöntemi suya doygun olmayan zeminler veya yer altı su seviyesi altındaki granüler zeminlerde uygulanabilmektedir. Bu yöntemde temel prensip başlangıçta sıkışabilen ve düşük taşıma gücüne sahip zemine yüksek enerji darbelerinin iletilmesi ile sıkıştırılmasıdır. Suya doygun olmayan zemin koşullarında, dinamik kompaksiyon, darbe sonucu boşluk oranının süratle düşmesine ve zemin yüzeyinde ani bir oturmaya yol açmaktadır. Dinamik kompaksiyonun etki derinliği darbe başına verilen enerji ile doğru orantılı olup aşağıdaki ifade ile belirlenebilmektedir.

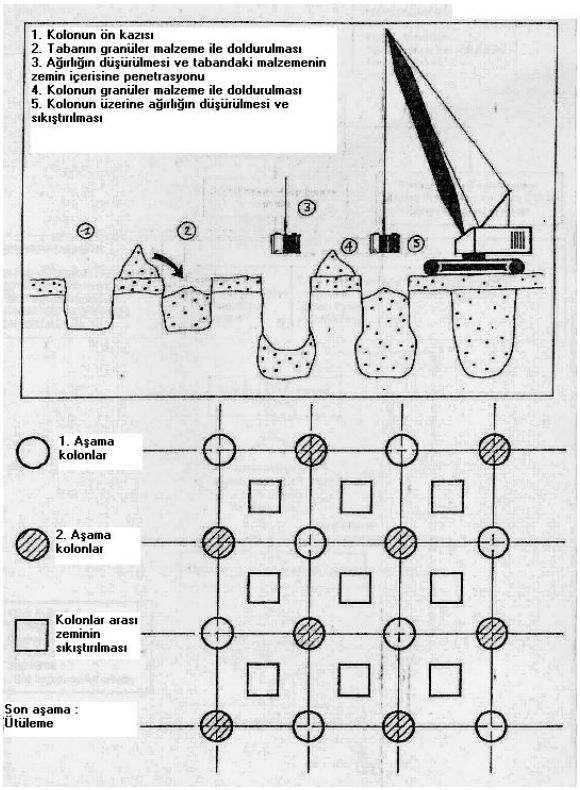
$$0.5 \times (W \times H)^{1/2} < D < 0.8 \times (W \times H)^{1/2} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Buna göre sahada 20 ton ağırlığında bir ağırlık 20 m yükseklikten düşürülmüş, 400 tm enerji ve 10 m < D < 16 m mertebesinde bir etki derinliği elde edilmiştir.

Bu tür bir zemin iyileştirmesi sonucunda, dinamik kompaksiyon ile sıkılaştırılan zemin yüzeyinin ortalama düşey deplasmanı zeminin yoğunluğunun arttığını (genellikle % 5 oranında) göstermektedir. Yoğunluktaki bu artış relatif sıkılıkta çok daha fazla bir artışa (% 20 veya daha fazla) tekabül etmektedir.

Zemin iyileştirmesinin başlangıcında, sahanın farklı noktalarında ve farklı zemin koşullarında ağırlığı 18 ton ila 25 ton olan ağırlıklar serbest düşüş ile 15 m ila 25 m arasında değişen yüksekliklerden zemin yüzeyine düşürülmüş, ve oluşan kraterlerden şişme ve penetrasyon değerlendirmeleri yapılmıştır. Planda daha önceden belirlenen aralıklarla ağırlığın düşmesi sonucu zemin yüzeyinde oluşan kraterler çalışma platformu teşkilinde kullanılan zemin ile doldurulmuş ve böylelikle zeminin sıkışması sonucu oluşan çalışma platformunun ortalama oturması gerçekleşmiştir.

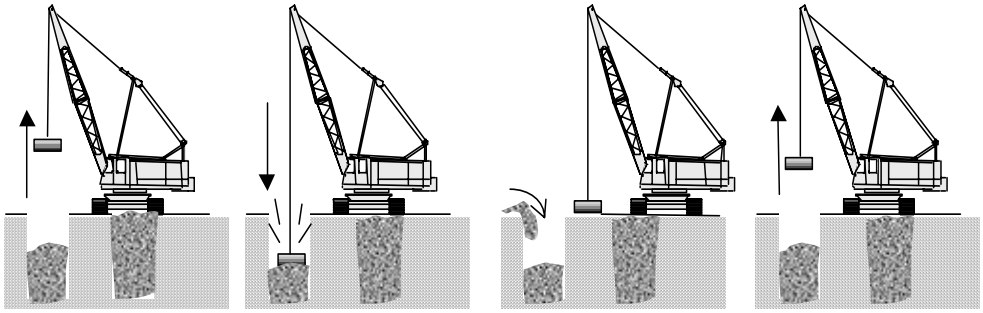
İki farklı zemin koşullarına sahip test alanında zemin iyileştirme özellikleri presiyometre deneyleri ile tahkik edilmiş ve sonuçta proje kriterlerine göre uygulanacak darbe sayısı ve planda düşüm ara mesafeleri ve karelajı belirlenmiştir. Şekil 4.2'de kare ile gösterilen dinamik kompaksiyon izleri zemine oturan döşemeler altında uygulanmıştır (Durgunoğlu, 2002).



Şekil 4.2 Test bölgesi dinamik kompaksiyon karelajı (Durgunoğlu, 2002)

Yüksek Enerji Kolonu olarak da adlandırılan dinamik yerdeğiştirme yöntemi ise dinamik kompaksiyon yöntemine benzer bir yöntem olup, bu yöntemde granüler malzeme üzerine ağırlık düşürmek suretiyle, daha alt seviyelerde yeralan taşıyıcı tabakaya kadar killi zeminler içerisine geniş çaplı sıkıştırılmış granüler kolonların teşkil edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem dinamik kompaksiyonun avantajlarının taş kolon yönteminin avantajları ile birleştirmektedir.

Yüksek Enerji Kolonu yönteminde de dinamik kompaksiyon ile aynı ekipman kullanılmıştır. Bu yöntemde kolonlar, yumuşak zemine ağırlığın tekrarlı olarak aynı noktaya düşürülmesi şeklinde teşkil edilmiştir. Böylelikle yüksek modül değerine sahip geniş çaplı (D~4 m) taş kolon teşkil edilerek, kolonun üst noktasından verilen düşüm enerjisinin sıkıştırılmış granüler kolon vasıtasıyla derindeki seviyelere intikal etmesi ve Yüksek Enerji Kolonu altında yeralan bu derin seviyelerin de sıkıştırılması sağlanmıştır. Yöntem şematik olarak Şekil 4.3'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Yüksek Enerji Kolonu teşkili (Durgunoğlu, 2002)

Yukarıda açıklandığı şekilde, Yüksek Enerji Kolonu uygulaması seçme granüler malzeme kullanılarak yapının temelleri altında uygulanmıştır. Yüksek Enerji Kolonu içerisinde kullanılan malzeme kalibre edilerek, sonuçta homojen bir kolon teşkil edilmesi sağlanmıştır. Dinamik kompaksiyonun son aşaması olan ütülemede daha hafif ağırlıkların sık bir karelaj ile zemin yüzeyine düşürülmesi sonucu yüzeyde homojen sıkışmış bir tabaka teşkili sağlanmıştır.

Yapılan inşaat için temel zeminin ve sahadaki zemin koşullarının iyileştirilmesi amacıyla dinamik kompaksiyon ve yüksek enerji kolonları yöntemleri birlikte uygulanmıştır. Söz konusu sahada uygulanan dinamik kompaksiyon ile zemin ıslahı yönteminin proje ve inşaat aşamaları özetlenmiş olup, ıslahın proje kriterlerine göre yeterliliği uygulama esnasında yapılan kalite kontrol deneyleri verileri ışığında incelenmiştir. Kalite kontrol deneyleri sonucunda gerçekleştirilen zemin ıslahının proje kriterlerini sağladığı görülmüştür.

4.2 Kompaksiyon Enjeksiyonu Yöntemi İle Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi

Bu bölümde İzmir / Tire Organize Sanayi Bölgesi'nde inşa edilen sigara fabrikası sahasının sıvılaşma riskini ortadan kaldırmak amacına yönelik olarak kompaksiyon enjeksiyonu yöntemi ile iyileştirilmesi vaka analizi şeklinde sunulmaktadır. Söz konusu alan 1. derece deprem bölgesi içerisinde olup, bölgenin jeolojisi ana kaya üzerinde kolüvyon, alüvyon formasyonları ve dolgu zeminden oluşmaktadır (Durgunoğlu, 2002).

Bölgenin jeolojisi metamorfik ana kaya üzerine yer alan alüvyonel katmanlardan oluşmaktadır. Ana kaya üzerinde aşağıdan yukarıya doğru, katı kumlu kilden oluşan kolüvyon, kumlu çakıl-kil ara tabakalı mikalı siltlerden oluşan alüvyon formasyonları ile kumlu siltli bir matrise sahip bloklar içeren dolgu zemin mevcuttur. Saha içerisindeki alüvyon tabaka kalınlığı 12 m'ye ulaşmaktadır. Yeraltı su seviyesi dolgu tabanından itibaren 4.7 m derinliktedir. Saha 1. derece deprem bölgesi içerisinde yer almaktadır.

Sahada zemin etüdleri yedi adet sondaj ve on dokuz adet araştırma çukurundan oluşmuştur. Sondajlar maksimum 25 m derinlikte ve rotari metoduyla yapılmıştır. Tesis içerisindeki ana binaların taban zemin profili Tablo 4.1'de özetlenmektedir. Alüvyon formasyonun dane boyu dağılımı analizleri neticesinde, ince dane yüzdesi siltlerde minimum % 35, kumlarda minimum % 25, killerde ise minimum % 50 olarak belirlenmiştir. Plastisite indisi değerleri % 10 ila % 20 arasında değişmekte, drenajsız kayma mukavemeti değerleri 50 kN/m^2 mertebesindedir.

Tablo 4.1 Sahanın zemin profili (Durgunoğlu, 2002)

Tabaka	Kalınlık (m)	Tabaka tabanına olan derinlik	Ana Zemin Tipi
Dolgu	0 -1.5 m	0 - 1.5 m	Orta çakıllı ve bloklu, kumlu SİLT
Alüvyon	3 - 8 m	3 - 10 m	Gevşek siltli KUM ve yumuşak (mikalı) KİL ile aratabakalı gevşek kumlu SİLT
Kolüvyon (rezidüel zemin)	2 - 5 m	7 - 14 m	Orta-katı KİL
Tabankaya	-		Çok zayıf çatlaklı mikaşist

Mevcut zemin verileri ile gerçekleştirilen zemin sıvılaşması analizleri neticesinde, proje deprem ivmesi altında sahada mevcut alüvyon zeminlerin sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü değerlerinin 0.4 mertebesinde belirlenmiş olup, sıvılaşmayı başlatacak deprem ivmesinin ise 0.17 g mertebesinde olduğu tahmin edilmektedir. Fabrikanın kuzeydoğu köşesi altında sıvılaşma sonrası 300 mm mertebesinde bir oturmanın, 500 mm mertebesinde ise bir yatay deplasmanın oluşması beklenmektedir. Sonuç olarak sahada inşa edilecek temeller açısından, sahada

mevcut alüvyon zeminlerde proje deprem yüklemesi altında oluşacak yumuşama etkisini minimize etmek ve yükleri alt seviyelerde yer alan daha sert kolüvyon zeminlere transfer edebilmek açısından zemin iyileştirmesi yapılması önerilmiştir (Durgunoğlu, 2002).

Sahada tespit edilen sıvılaşma riskini ortadan kaldırmaya ve yüzeysel temellerin oturduğu temel zeminini güçlendirmeye yönelik olarak uygulanabilecek zemin iyileştirme metodları arasında dinamik kompaksiyon, ön yükleme, vibro-kazık, kompaksiyon enjeksiyonu, derin zemin karıştırması, kazı-yerdeğiştirme metodları uygulanabilirlik, zemin koşulları, bütçe ve uygulamaya ilişkin yerel tecrübenin varlığı dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kompaksiyon enjeksiyonu zeminin içerdiği mika oranına en az hassas olan metod olması dolayısıyla en uygun zemin iyileştirme metodu olarak belirlenmiştir (Durgunoğlu, 2002).

Deneme bölgesindeki testler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada kompaksiyon enjeksiyonu farklı jeting parametreleri kullanılarak imal edilmiş olup daha sonra nihai uygulama parametrelerini belirlemek açısından kazılarak kesit boyut kontrolü yapılmıştır. İkinci aşamada ise bu belirlenen parametreler kullanılarak imal edilen kolonların kalite kontrolü için yükleme deneyleri yapılmış, çap kontrolü için kolonların ilk üst 3 - 6 metresi kazılarak kontrol edilmiş ve mukavemet deneyleri için kolonlardan karot alınmıştır.

Yapılan inşaat için temel zeminin iyileştirilmesi amacıyla kompaksiyon enjeksiyonu yöntemi uygulanmıştır. Uygulama öncesinde kapsamlı ön deneme bölgesi testleri yapılmış, uygulama projesi parametreleri belirlenmiştir. Sonuç olarak inşaat sahasında uygulanan detaylı parametre seçim yöntemi ve kapsamlı kalite kontrol / kalite tayini uygulamaları ile zemin iyileştirmesinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır (Durgunoğlu, 2002).

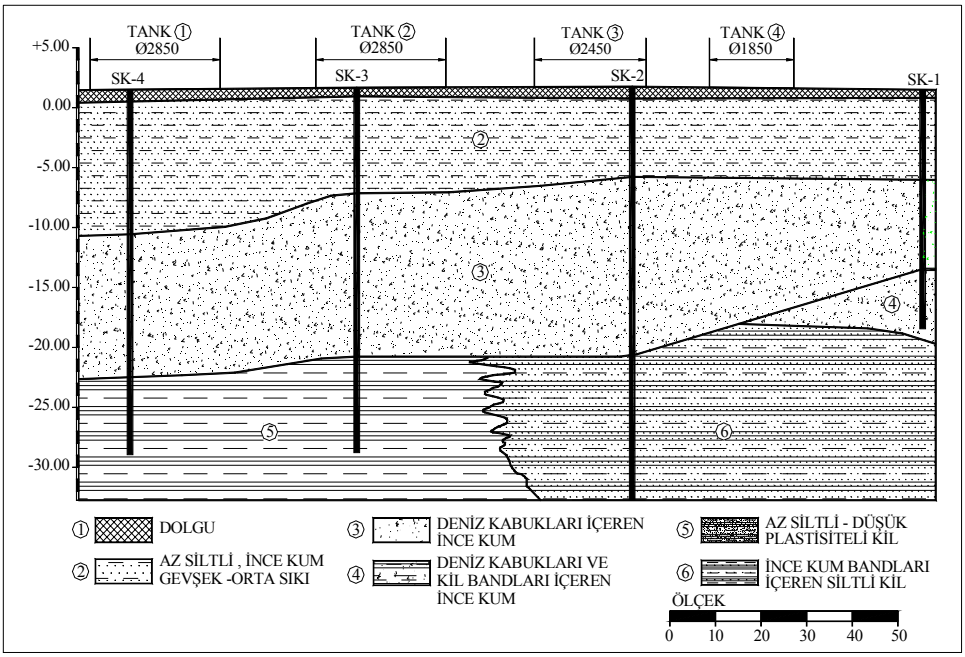
4.3 Vibro - Yerdeğiştirme (Taş Kolon) Yöntemi İle Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi

Bu bölümde Gürcistan'da bulunan Poti Limanı Akaryakıt Terminali projesi kapsamındaki çelik akaryakıt tanklarının zemininin, sıvılaşmanın önlenmesi, farklı oturmaların azaltılması ve taşıma gücünün arttırılması amacına yönelik olarak vibro - yerdeğiştirme (taş kolon) yöntemi ile iyileştirilmesi vaka analizi şeklinde sunulmaktadır. Temel zemini 20 m kalınlığındaki gevşek - orta sıkı kumla, bu tabakanın altında yer alan 15 m kalınlığındaki orta katı – katı kilden oluşmaktadır (Düzceer ve Gökalp, 2002).

Proje sahasında zemin profilini ve zemin tabakalarının mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla iki aşamada sondajlar yapılmıştır. Birinci aşama zemin araştırmaları kapsamında her tankın altında toplam 16 adet sondaj yapılmıştır. Bu sondajlardan alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuar deneyleri yapılmıştır. İkinci aşama sondaj çalışmaları kapsamında her tankın altında 35 m derinliğe kader inen 4 adet sondaj yapılmış; bu sondajlarda 1.50 m ara ile standart penetrasyon deneyleri (SPT) gerçekleştirilmiştir.

Akaryakıt tanklarının inşa edileceği bölge bir akarsu deltasının içerisinde yer almaktadır. Zemin profilini, SPT N darbe sayıları 2-18 arasında değişen, 1 – 1.5 m kalınlığındaki dolgu tabakasını takiben 7.5 – 12 m derinliğe kadar devam eden gevşek – orta sıkı siltli ince kum tabakaları; bu tabakanın altında SPT N değerleri 5-25 arasında değişen, 22.5 m derinliğe kadar gevşek – orta sıkı denizel kavkılar içeren kil bantlı ince kum tabakaları oluşturmaktadır. Yeraltı su seviyesi 1.50 m derinlikte yer almaktadır. Zemin profili Şekil 4.4'de verilmektedir.

Poti Limanı'nın yer aldığı bölge için beklenen depremin büyüklüğü Richter ölçeğine göre 6.2 olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak hesaplarda deprem tasarım ivmesi a_{max}= 0.2 g kullanılmıştır. Seed ve İdriss (1971) tarafından önerilen yönteme göre zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Yapılan sıvılaşma analizleri, zeminin 15 m derinliğe kadar sıvılaşabileceğini göstermiştir.

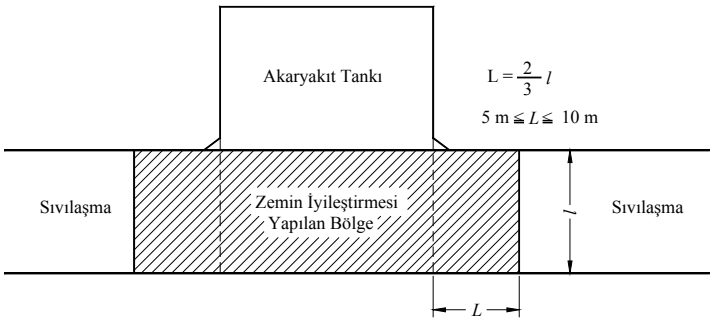


Şekil 4.4 Zemin profili (Düzceer ve Gökalp, 2002)

Sıvılaşma, oturma ve taşıma gücü analizleri neticesinde söz konusu sahada, temel zemininde iyileştirme yapılmadan tankları inşa etmenin mümkün olmadığı sonucuna varılmıştır. Temel zemininde uygulanabilecek iyileştirme yöntemleri kapsamlı olarak incelenmiştir (Güler ve Çetin, 2000). Yapılan değerlendirmeler neticesinde uygulamanın yapılacağı bölgedeki yerel olanaklar da göz önüne alınarak vibro – yerdeğiştirme (taş kolon) yöntemi ile zeminin iyileştirilmesine karar verilmiştir.

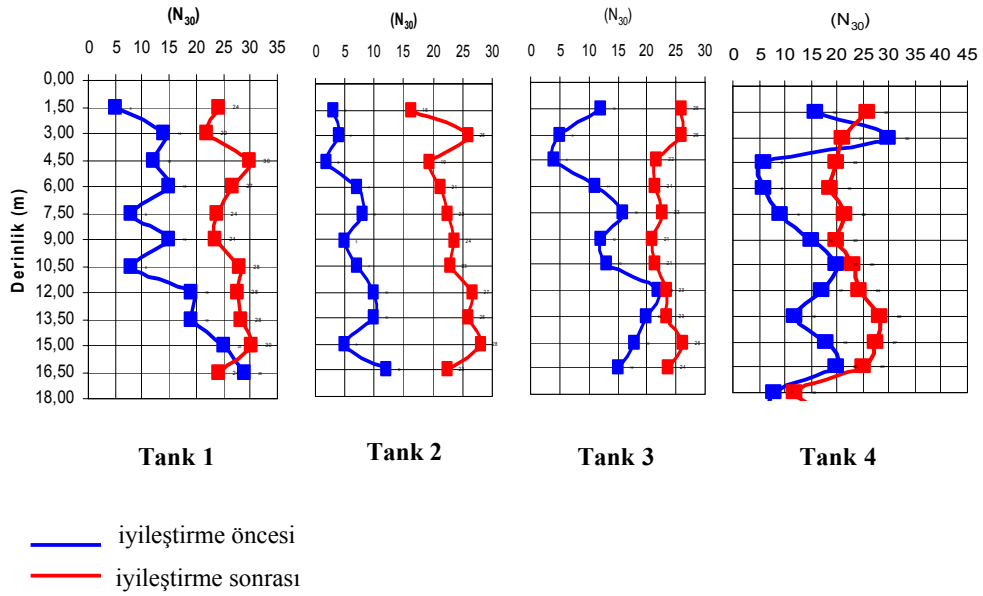
Analizler neticesinde tank temelleri altında sıvılaşmanın etkin olduğu 15 m derinliğe kadar, D = 1 m çapında taş kolonların imal edilmesine karar verilmiştir. Taş kolonlar ile sıvılaşmayı önlemeye yönelik olarak yapılan zemin iyileştirmesi tasarımlarında A.B.D'de sadece kolonlar arasındaki zeminin izafi sıkılığı dikkate alınmaktadır. Priebe yönteminde ise taş kolonların rijitliği ve drenaj özellikleri de dikkate alınmaktadır (Elias ve diğerleri, 1999). Mitchell ve diğerleri (1995) tarafından yapılan incelemelerde sıvılaşmaya karşı yapılan zemin iyileştirme uygulamalarında, zemin iyileştirmesinin temel sınırından itibaren belirli bir mesafeye kadar devam etmediği durumlarda yapıların hasar gördüğüne dikkat çekerek, bu mesafenin zemin iyileştirmesi yapılacak derinliğe eşit olması gerektiğini belirtmişlerdir. Diğer yandan, Japonya'da (Japanese Geotechnical Society, 1998), akaryakıt tank temellerinin

sıvılaşmaya karşı ıslah edilmesinde Şekil 4.5'de verilen kriterin uygulanması önerilmektedir. Bu projede taş kolonlar tank temeli sınırından itibaren planda 7 m mesafeye kadar yerleştirilmiştir.



Şekil 4.5 Akaryakıt tankları için zemin iyileştirme bölgesi
(Japanese Geotechnical Society 1998)

Zeminin sıkışma derecesini kontrol etmek amacıyla her tank altında taş kolon imalatından önce ve imalatlar tamamlandıktan sonra SPT deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.6'da SPT'lerin sonuçları gösterilmiştir. İyileştirme öncesi ortalama SPT N değerleri 2-20, iyileştirme sonrası ise 18-30 arasında değişmekte, başka bir deyişle ortalama 10 mertebesinde artmaktadır.



Şekil 4.6 Taş Kolon imalatı öncesi ve sonrası yapılan SPT'lerin sonuçları
(Düzceer ve Gökalp, 2002)

Yapılan inşaat için temel zeminin iyileştirilmesi vibro - yerdeğiştirme yöntemi ile imal edilen taş kolonlarla gerçekleştirilmiştir. Temel problemlerinin çözümünde vibro - yer değiştirme yöntemiyle imal edilen taş kolonlar zeminlerde taşıma gücünün arttırılması, sıvılaşmanın önlenmesi ve oturmanın azaltılması için etkin ve ekonomik bir yöntemdir. Söz konusu yöntemle suya doygun gevşek siltli kum tabakalarının iyileştirilmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir.

5. 17 AĞUSTOS 1999 KOCAELİ DEPREMİ VE 13 EYLÜL 1999 ARTÇI DEPREMİ'NİN ANALİZİ İLE SIVILAŞMAYI ÖNLEYEN TEKNİKLERİN ETKİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ

5.1 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin Genel Özellikleri

17 Ağustos 1999'da Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Adapazarı, Kocaeli, Gölcük bölümü üzerinde meydana gelen 7.4 büyüklüğündeki Kocaeli Depremi, Marmara Bölgesi'nin tamamında batıda Tekirdağ'dan doğuda Düzce'ye kadar çok geniş bir alanda etkili olmuştur. Kocaeli Depremi, Marmara'nın batısından Erzincan'a kadar uzanan 1000 km uzunluğundaki Kuzey Anadolu Fayı'nın Gölyaka – Yalova arasında kalan yaklaşık 120 km'lik kısmının yırtılması sonucunda meydana gelmiştir. Fay kırılması, tek parça değil üç parça şeklinde meydana geldiğinden sarsıntının şiddeti beklenenden az ancak süresi uzun olmuştur (Sucuoğlu, 2000).

Deprem sırasında Marmara Bölgesi'nin çeşitli yerlerinde bulunan yer hareketi kayıt istasyonlarında ölçülen yer ivmelerinin maksimum değerleri, yerçekimi ivmesinin %40'ını aşmamakta ve birinci derece deprem bölgeleri için 1998 Deprem Yönetmeliği'nde öngörülen değerlerin de altında kalmaktadır (Sucuoğlu, 2000). Yer ivmeleri yumuşak alüvyal zeminlerin olduğu bölgelerde en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu bölgeler İzmit – Yalova sahil şeridi, aynı bölgedeki dere yatakları, Düzce ovası, Sakarya nehrinin alüvyonu üzerine kurulmuş Adapazarı kenti ve İstanbul'un Avcılar bölgesidir. Bu depremden en çok etkilenen bölgelerden Gölcük ve Değirmendere'de kıyılar üstündeki yapılarla birlikte su altında kalmış, Adapazarı'nda sıvılaşma sonucunda birçok binanın temeli zeminin içine gömülmüş veya aşırı dönerek binaların devrilmesine sebep olmuştur.

5.2 Kocaeli – Adapazarı Bölgesinin Zemin Özellikleri

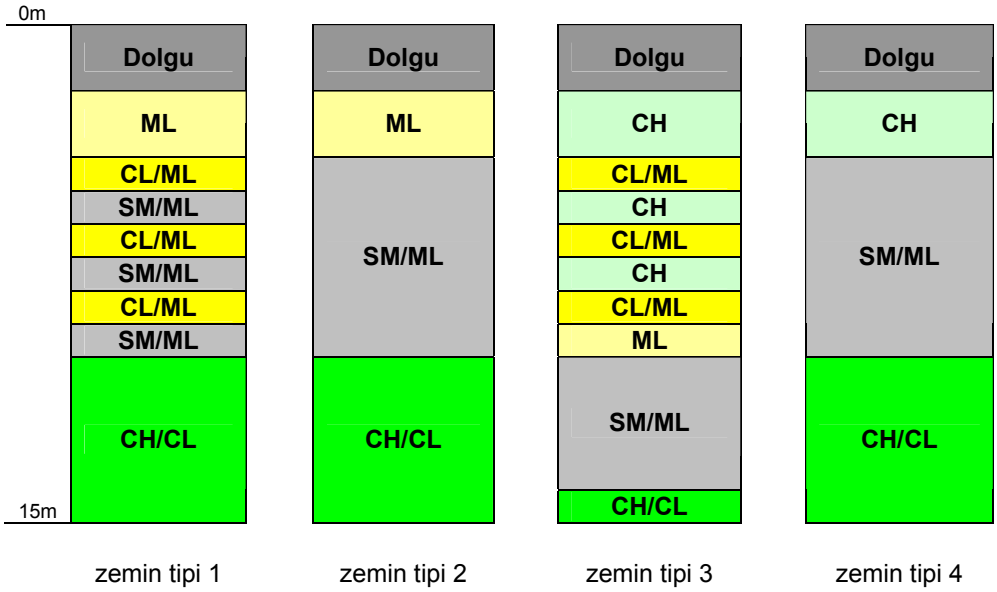
Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Marmara Denizi'nin güneyi boyunca uzandığı Kocaeli – Adapazarı Bölgesinde hem sismik aktivite çok yüksek, hem de zemin koşulları son derece elverişsizdir. Bölgede zemin profili genelde çok kalın, yumuşak - orta katı kil veya gevşek kum tabakalarından oluşmaktadır. Adapazarı Ovası ve Sapanca Gölü – İzmit Körfezi arası tamamen alüvyal malzeme ile örtülüdür.

Adapazarı Ovası'nı teşkil eden alüvyonun yüzeyi yataya yakın bir düzlüktedir. Alüvyonun kalınlığı değişik araştırmacılar tarafından tartışılmıştır. Bu konuda Komazawa ve diğ. (2001) yaptıkları çalışmada alüvyonun kalınlığını yaklaşık 1000 metre olarak açıklamışlardır. Alüvyonun kaynağını büyük oranda Geyve boğazından Adapazarı ovasına ulaşan Sakarya Nehri ile Sapanca Gölü' nün fazla yükünü boşaltan Çark Suyu oluşturmaktadır. Ayrıca daha doğuda Mudurnu vadisinden Adapazarı ovasına ulaşan yüksek debili Mudurnu suyu da etkilidir. Sakarya Nehri Adapazarı şehrinin doğu sınırını çizmektedir. Dolayısıyla bu nehir Adapazarı merkezinin alüvyal yapısını oluşturmakta büyük önem taşır.

Adapazarı'nda yapılan çok sayıda sondajda hesaplanan SPT N değerlerinin neredeyse tümü üst 5 m derinlikte 10'un altında kalmıştır. Bu düşük değerlerin alındığı katmanlar son 1000 yıl içinde kenti yaklaşık iki yıllık aralıklarla etkileyen taşkınların biriktirdiği ince kum, silt ve kısmen de killeri yansıtmaktadır (Sancio, 2003). Taşkınlarda ve bataklık ortamlarında çökelen bu ince malzemeler mühendislik yapıları için problemli alanlar yaratmaktadır. Bu bölgeler yüksek plastisiteye, yüksek büzülmelere, yüksek sıkışabilirlik, düşük hidrolik iletkenlik ve düşük dayanıma neden olacak oranda organik malzeme ihtiva etmektedir. Yapılan sondajlarda 5 m derinliğin altında diğer katmanlara ek olarak belirli eksenlerde SPT N okumaları 30'u aşmış, yani sıkı kum ve çakıllı kumlara rastlanmıştır. Bu bölgelerin sıkça yatak değiştiren Sakarya Nehri, Çark Suyu veya bunların yan kollarının kalıntıları olduğu düşünülmektedir. Koridor biçiminde ve çoğu güney-kuzey doğrultusunda uzanan bu bölgeler, diğer bölgelere nazaran daha sağlam temel zemini teşkil etmektedir.

Sancio ve diğerleri (2003), Adapazarı şehrinde zemin problemlerinin görüldüğü değişik yerlerde sürdürdükleri çalışmalarında, birçok SPT ve CPT yapmışlardır. Tüm

araştırma boyunca yapılan 46 SPT ve 135 CPT'ye dayanarak yapmış oldukları zemin sınıflamalarında çalıştıkları alanlar için 4 ayrı tipte zemin profili sunmuşlardır. Şekil 5.1'de verilen bu profiller Adapazarı şehir merkezinin genel profilini yansıtmaktadır.



Şekil 5.1 Adapazarı şehir merkezinin idealleştirilmiş zemin profilleri (Sancio, 2003)

Bölgede deprem sırasında meydana gelen titreşimler bu zeminlerin içerdiği suya doygun kumlu – siltli tabakalarda sıvılaşma meydana gelmesine neden olmuştur. Yeraltı suyu seviyesinin 1 – 2 m gibi derinliklerde yer alması da bu süreci hızlandırmıştır. Titreşim sırasında boşluk suyu basıncı yükselerek zeminin taşıma gücünü kaybetmesine neden olmuş, bu da yapıların dönmesine, oturmasına veya zemine gömülmesine sebep olmuştur.

5.3 1999 Kocaeli Depremi Sonrası Adapazarı'nda Sıvılaşmanın İzleri

17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nde Adapazarı'nın birçok yerinde değişik türlerde hasar meydana gelmiştir. İlk başta yapılan zemin incelemelerinde hasarın tamamının sıvılaşma nedeniyle oluştuğu düşünülmüş, ancak daha sonra yapılan araştırmalar, sondaj/deneyler gerçekte sıvılaşmanın bu denli yaygın olmadığını, olayın diğer zemin yenilmesi tipleri ile karıştırıldığını göstermektedir. Önalp ve diğerleri (2001)

yaptıkları çalışmalarda farklı zemin tipleri ve temel türlerine göre oluşan hasarları, bina boyu/temel genişliği oranı 2.5'tan büyük olan yapılarda devrilme, deprem gibi ani yükleme esnasında drenajsız şartlarda yumuşak silt ve killerde görülen direnç azalımı, radye temel kullanılmayan durumlarda taban kalkması, zeminin direncinin zayıf olduğu durumlarda taşıma gücü aşılması ve sıvılaşma şeklinde sınıflandırmışlardır.

Adapazarı'nın genel yapı profilini ortalama 1 m derinliğe sahip sığ radye temeller üzerine oturmuş az katlı binalar oluşturmaktadır. Temel derinliklerinin az olmasının sebebi yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olması ve yüzey zeminlerinin yüksek geçirgenliğidir. Deprem öncesinde Adapazarı'nda temel tasarımında sıvılaşma faktörünün göz ardı edildiği anlaşılmaktadır (Köleoğlu, 2002).

Adapazarı'nda sıvılaşmaya bağlı olarak gelişen yapısal hasarın büyük kısmı, şehir merkezinde, İzmit Caddesi civarından başlayarak Çark Caddesi'nin kuzeyine uzanan bir alanda görülmektedir. Sığ temelli binalar büyük ölçüde sıvılaşmadan etkilenmesine rağmen kazıklı temeller üzerine inşa edilmiş yapılarda hasar oluşmamıştır. Deprem sonrasında bina temellerinde meydana gelen deformasyonlara ilişkin gözlemler, bu bölgede yer alan sıvılaşabilir nitelikteki suya doygun yüzey zeminlerinin kuvvetli yer hareketine bağlı olarak önemli miktarlarda dayanım kaybettiklerini göstermektedir (Bakır ve Yılmaz, 2000).

Adapazarı'nda sıvılaşma nedeniyle betonarme yapıların büyük kısmı bir tarafa yatarak, devrilerek, oturarak ve zemin içine gömülerek hasara uğramış veya yıkılmıştır. Şekil 5.2'deki fotoğrafta, dayanım kaybına uğrayan zeminler üzerinde yer alan binaların temellerinde deprem sonrasında gözlenen deformasyonların boyutları görülmektedir. Ancak, bu fotoğrafta da görüldüğü gibi dönen, devrilen veya oturan binalarda genel olarak taşıyıcı sistemde yapısal hasar oluşmamıştır. Bu olay, sıvılaşan zeminlerin yapısal hasara neden olan kayma dalgalarını sönümlediklerini ve bir ölçüde can kaybını azalttığını ortaya koymaktadır (Bakır ve Yılmaz, 2002).

Bölgede sıvılaşma, yapılarda neden olduğu deformasyonun yanı sıra, yapıların ve yolların kenarlarında, açık alanlarda gözlenen kum kaynamaları şeklinde kendini

göstermiştir. Ayrıca çoğu yerde taşıma gücü kaybından dolayı binaların zemine gömülmesi nedeniyle sıkışan temel zemini yanlara doğru harekete geçerek bina kenarlarındaki kaldırım ve yollarda kabarmalara neden olmuştur.



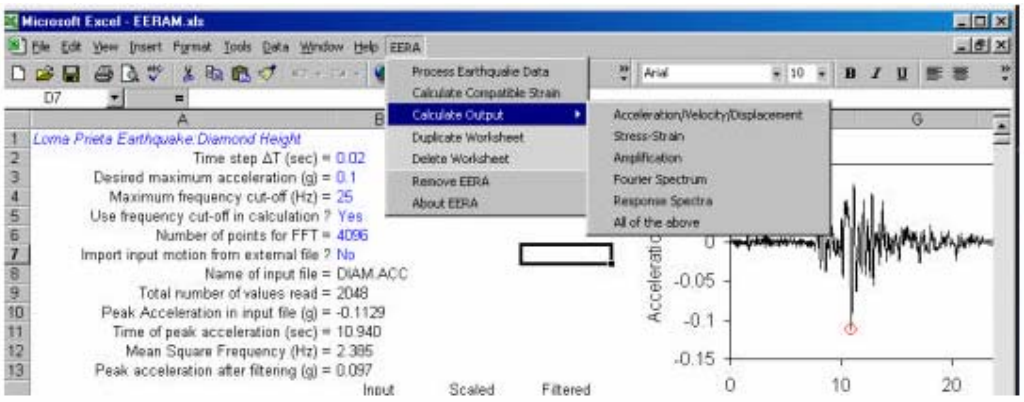
Şekil 5.2 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nde sıvılaşma sonucu dönen ve oturan binalar (Sancio, 2003)

5.4 Eşdeğer-lineer Deprem Tepki Analizi (EERA) Programı ile 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin Analizi

5.4.1 EERA Programının Çalışma Prensibi

Geçmişte yaşanan depremlerde, yer ivmelerinin yerel zemin koşullarına bağlı olarak gevşek zeminlerde kaya zeminlere oranla daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu tür zemin davranışlarının simülasyonu için SHAKE programı başta olmak üzere birçok program geliştirilmiştir (Schnabel ve diğ., 1972). SHAKE, 25 yılı aşkın süredir geoteknik deprem mühendisliğinde referans program olarak kullanılmaktadır. SHAKE, düşey hareket eden kayma dalgalarına maruz kalmış yatay tabakalanmış zemin-kaya sisteminin davranışını hesaplamaktadır. 1998'de EERA programı, SHAKE'in temel prensiplerinden yola çıkılarak FORTRAN 90'da geliştirilmiştir. EERA'yı diğer programlardan ayıran en önemli özelliği ise veri girdi ve çıktılarının tamamen Microsoft Excel uyumlu olmasıdır. EERA, Şekil 5.3'de görüldüğü gibi menüsünde üç komut içermektedir, bunlar sırasıyla;

Process earthquake data: girilen deprem verilerine göre deprem dalgasını oluşturur.
Calculate compatible strain: girilen zemin profili ve malzeme özelliklerine göre hesaplamaları yapar.
Calculate output: seçilen zemin tabakasında ivme, hız, yer değiştirme, spektral ivme, gerilme ve genlik grafiklerini çizer.



Şekil 5.3 EERA programı menüsü

EERA programında depremin ve zeminin tanımlandığı, verilerin girildiği ve buna göre analiz grafiklerinin çizildiği toplam altı excel çalışma alanı bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla; deprem verisi, zemin profili, iterasyon, ivme, şekil değiştirme, spektra olarak adlandırılmıştır. Bu bölümler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Deprem Verisi

Bu bölümde deprem dalgası tanımlanır. Bu amaçla, deprem istasyonundan alınan kayıtlar, depremin zaman aralığı, istenilen maksimum ivme ve frekans, spektral analizde kullanılacak veri sayısı gibi değerler programa girilir.

Zemin Profili

Bu bölümde zemin profilinin özellikleri tanımlanır. Zemin tabakalarının sayısı ve kalınlıkları, kayma dalgası hızları, birim hacim ağırlıkları, yer altı su seviyesinin derinliği ve deprem dalgasının yeri programa girilir.

İterasyon

Bu bölümde gerekli hesaplamalar yapılır. İterasyon sayısı, maksimum kayma deformasyonunun efektif kayma deformasyonuna oranı programa girilir (bu değer depremin şiddetine göre 0,4 – 0,75 arasında değişmektedir).

İvme

Bu bölümde seçilen zemin tabakası için ivme, relatif hız ve yer değiştirmenin zamana göre değişimi grafiksel olarak tanımlanır.

Şekil Değiştirme

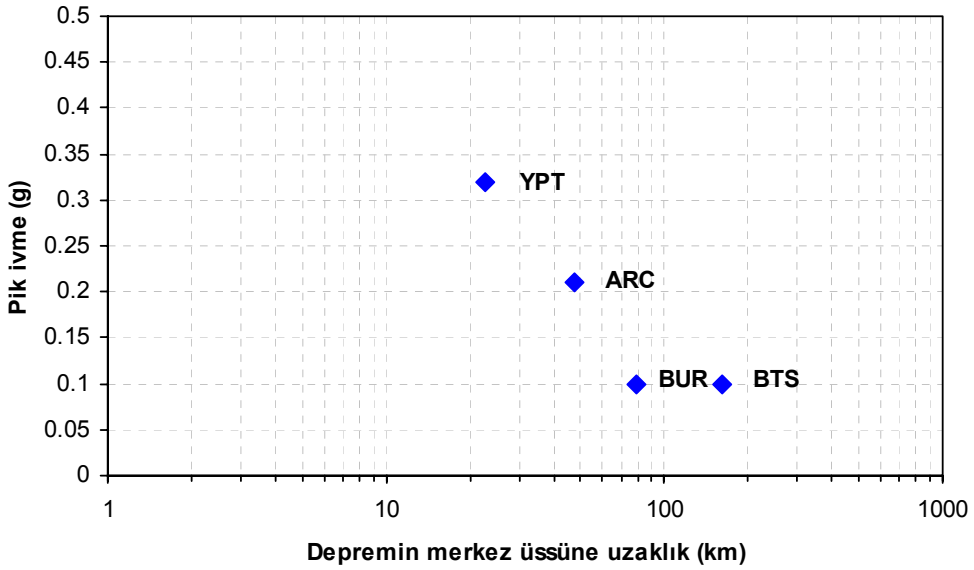
Bu bölümde seçilen zemin tabakası için gerilme, şekil değiştirme ve açığa çıkan enerjinin zamana göre değişimi grafiksel olarak tanımlanır.

Spektra

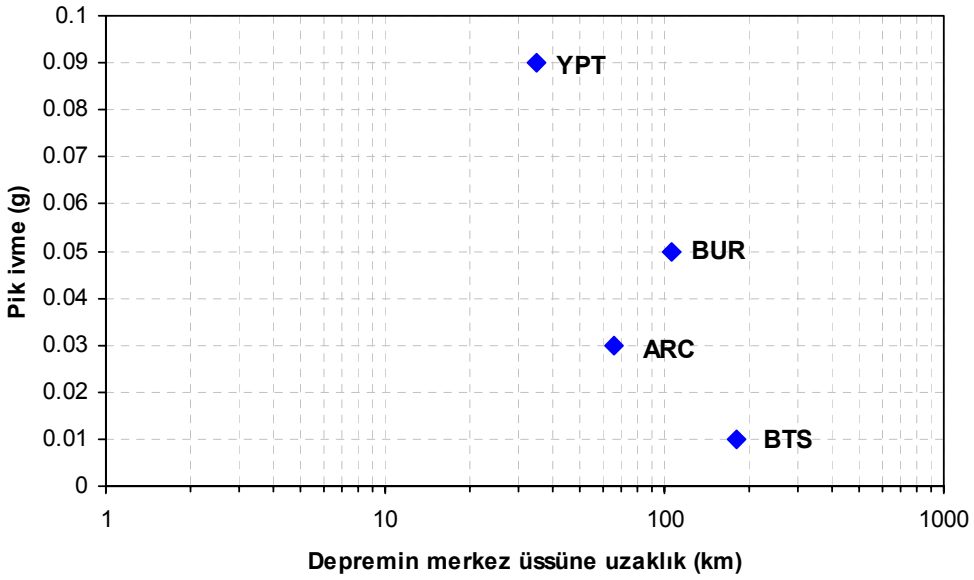
Bu bölümde seçilen zemin tabakası ve sönüm oranı için spektral ivmelerin zamana göre değişimi grafiksel olarak tanımlanır.

5.4.2 Analizler Öncesi Yapılan Kabuller

7,4 şiddetindeki 17 Ağustos Kocaeli Depremi ve 5,8 şiddetindeki 13 Eylül Artçı Depremi sırasında, kırılma hattı üzerinde bulunan, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi'ne ait çok sayıda deprem istasyonu, yer hareketi verilerini kaydetmiştir. Bu tez konusu çerçevesinde yapılan analizlerde depremin merkez üssüne yakından uzağa değişik mesafelerde bulunan Yarımca Petkim (YPT), Darıca Arçelik (ARC), Bursa Tofaş Fabrikası (BUR) ve Marmara Ereğlisi Botaş (BTS) olmak üzere toplam dört istasyonun ivme – zaman verileri kullanılmıştır. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne ait bu istasyonlardan Yarımca Petkim ve Darıca Arçelik hem depremin merkez üssüne hem de kırılma hattına en yakın mesafede bulunan istasyonlar olduğundan, Bursa Tofaş Fabrikası depremde büyük hasar gören bölgelerden biri olan Yalova'ya komşu olduğundan, Marmara Ereğlisi Botaş ise depremin merkez üssüne ve kırılma hattına en uzak mesafede bulunan istasyon olduğundan seçilmişlerdir. Seçilen istasyonların 17 Ağustos Kocaeli ve 13 Eylül Artçı depremlerinde merkez üssüne uzaklıkları ve kaydettikleri pik ivmeler Şekil 5.4'de verilmiştir. Zemin profili seçiminde Sancio (2003)'nun Adapazarı'nda yaptığı SPT deneyleri sonucu elde ettiği profillerden faydalanılmış, bunlardan sıvılaşma potansiyeli en yüksek olan üçü analizlere alınmıştır. İdealleştirilmiş zemin profilleri Şekil 5.5'de gösterilmektedir.

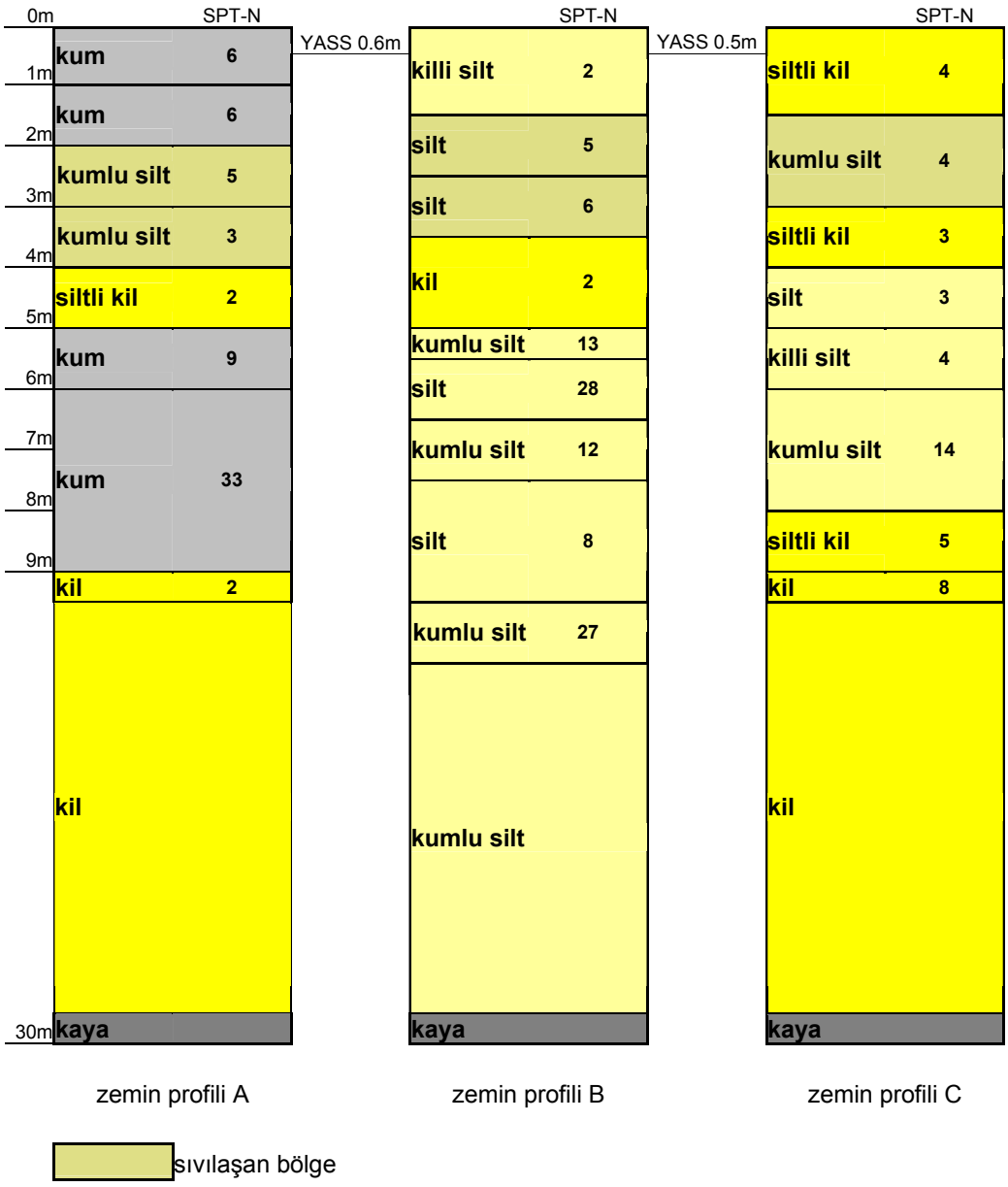


(a) 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi



(b) 13 Eylül 1999 Artçı Depremi

Şekil 5.4 Analiz için seçilen istasyonların depremin merkez üssüne uzaklıkları ve kaydettikleri pik ivmeler



Şekil 5.5 Analizlerde kullanılan idealleştirilmiş zemin profilleri (Sancio, 2003)

Zemin profili A, doğal zemin koşulları için, SPT-N sayılarından yola çıkılarak 2006 ABYYHY Tablo 6.1'e göre 0 – 2 m arası gevşek kum, 2 – 4 m arası gevşek silt, 4 – 5 m arası yumuşak siltli kil, 5 – 6 m arası gevşek kum, 6 – 9 m arası sıkı kum, 9 – 10 m arası yumuşak kil, 10 – 28 m arası yumuşak kil, 28 m'den sonra kaya olarak tanımlanmıştır. Bu zeminin 10 m'ye kadar sıkılaştırma ile iyileştirildiği varsayıldığında, SPT-N sayıları gevşek tabakalar için 10, sıkı tabakalar için 5 mertebesinde artırılmıştır. Bu artış Bölüm 4.3'de anlatılan, Vibro - Yerdeğiştirme

(Taş Kolon) yöntemi ile iyileştirilmiş vaka analizi sonucuna göre kabul edilmiştir. Buna göre profil 0 – 2 m arası orta sıkı kum, 2 – 4 m arası orta sıkı silt, 4 – 5 m arası katı siltli kil, 5 – 6 m arası orta sıkı kum, 6 – 9 m arası sıkı kum, 9 – 10 m arası katı kil olarak tanımlanmıştır. Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için değişen kayma dalgası hızları da, SPT-N sayılarına göre 2006 ABYYHY Tablo 6.1'den alınmıştır. Profil karakteristikleri analizlerde tanımlandığı şekliyle Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için tanımlanan profil A

			Normal Zemin					Sıkılaştırılmış Zemin				
Tabaka No	Tabaka Kalınlığı (m)	YASS ve Deprem Dalgası Yeri	Zemin Tipi	Birim hac. Ağırlık (kN/m3)	SPT N	Kayma Dalgası Hızı (m/sn)	Maks. Kayma Modulu Gmax (MPa)	Zemin Tipi	Birim hac. Ağırlık (kN/m3)	SPT N	Kayma Dalgası Hızı (m/sn)	Maks. Kayma Modulu Gmax (MPa)
1	1,0	YASS	2	18,00	6	*120*	26,42	5	19,00	16	*260*	130,93
2	1,0		2	20,50	6	*120*	30,09	5	21,50	16	*260*	148,15
3	1,0		2	19,00	5	*100*	19,37	5	20,00	15	*250*	127,42
4	1,0		2	17,00	3	*60*	6,24	5	18,00	13	*230*	97,06
5	1,0		1	17,00	2	*50*	4,33	6	18,00	12	*250*	114,68
6	1,0		2	19,00	9	*180*	62,75	5	20,00	19	*290*	171,46
7	3,0		2	21,00	33	*445*	423,91	5	22,00	38	*520*	606,40
8	1,0		1	19,00	2	*50*	4,84	6	20,00	12	*250*	127,42
9	2,0		1	19,00		*100*	19,37	1	19,00		*100*	19,37
10	2,0		1	19,00		*150*	43,58	1	19,00		*150*	43,58
11	2,0		1	19,00		*200*	77,47	1	19,00		*200*	77,47
12	2,0		1	19,00		*250*	121,05	1	19,00		*250*	121,05
13	2,0		1	19,00		*300*	174,31	1	19,00		*300*	174,31
14	2,0		1	19,00		*350*	237,26	1	19,00		*350*	237,26
15	2,0		1	19,00		*400*	309,89	1	19,00		*400*	309,89
16	2,0		1	19,00		*450*	392,20	1	19,00		*450*	392,20
17	2,0		1	19,00		*500*	484,20	1	19,00		*500*	484,20
18	2,0		1	19,00		*550*	585,88	1	19,00		*550*	585,88
19	2,0		1	19,00		*600*	697,25	1	19,00		*600*	697,25
20		D	3	22,00		*700*	1098,88	3	22,00		*700*	1098,88

Not: zemin tipi no:1 ve 6 kil, zemin tipi no:2 ve 5 kum veya silt, zemin tipi no:3 kaya

Zemin profili B, doğal zemin koşulları için, SPT-N sayılarından yola çıkılarak 2006 ABYYHY Tablo 6.1'e göre 0 – 1.5 m arası gevşek killi silt, 1.5 – 2.5 m arası gevşek silt, 2.5 – 3.5 m arası gevşek silt, 3.5 – 5 m arası yumuşak kil, 5 – 5.5 m arası orta sıkı silt, 5.5 – 6.5 m arası orta sıkı silt, 6.5 – 7.5 m arası orta sıkı silt, 7.5 – 9.5 m arası gevşek silt, 9.5 – 10.5 m arası orta sıkı silt, 10.5 – 28 m arası orta sıkı silt, 28 m'den sonra kaya olarak tanımlanmıştır. Bu zeminin 10 m'ye kadar sıkılaştırma ile

iyileştirildiği varsayıldığında, SPT-N sayıları gevşek tabakalar için 10, sıkı tabakalar için 5 mertebesinde arttırılarak profil 0 – 1.5 m arası orta sıkı killi silt, 1.5 – 2.5 m arası orta sıkı silt, 2.5 – 3.5 m arası orta sıkı silt, 3.5 – 5 m arası katı kil, 5 – 5.5 m arası orta sıkı silt, 5.5 – 6.5 m arası sıkı silt, 6.5 – 7.5 m arası orta sıkı silt, 7.5 – 9.5 m arası orta sıkı silt, 9.5 – 10.5 m arası sıkı silt olarak tanımlanmıştır. Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için değişen kayma dalgası hızları da, SPT-N sayılarına göre 2006 ABYYHY Tablo 6.1'den alınmıştır. Profil karakteristikleri analizlerde tanımlandığı şekliyle Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için tanımlanan profil B

			Normal Zemin					Sıkılaştırılmış Zemin				
Tabaka No	Tabaka Kalınlığı (m)	YASS ve Deprem Dalgası Yeri	Zemin Tipi	Birim hac. Ağırlık (kN/m3)	SPT N	Kayma Dalgası Hızı (m/sn)	Maks. Kayma Modulu Gmax (MPa)	Zemin Tipi	Birim hac. Ağırlık (kN/m3)	SPT N	Kayma Dalgası Hızı (m/sn)	Maks. Kayma Modulu Gmax (MPa)
1	1,5	YASS	2	18,75	2	*40*	3,06	5	19,75	12	*220*	97,44
2	1,0		2	18,75	5	*100*	19,11	5	19,75	15	*250*	125,83
3	1,0		2	18,75	6	*120*	27,52	5	19,75	16	*260*	136,10
4	1,5		1	18,00	2	*50*	4,59	6	19,00	12	*250*	121,05
5	0,5		2	20,50	13	*230*	110,55	5	21,50	23	*330*	238,67
6	1,0		2	20,50	28	*380*	301,75	5	21,50	33	*445*	434,00
7	1,0		2	18,75	12	*220*	92,51	5	19,75	22	*320*	206,16
8	2,0		2	19,00	8	*160*	49,58	5	20,00	18	*280*	159,84
9	1,0		2	20,50	27	*370*	286,08	5	21,50	32	*430*	405,23
10	3,0		2	20,50		*400*	334,35	2	20,50		*400*	334,35
11	3,0		2	20,50		*450*	423,17	2	20,50		*450*	423,17
12	3,0		2	20,50		*500*	522,43	2	20,50		*500*	522,43
13	3,0		2	20,50		*550*	632,14	2	20,50		*550*	632,14
14	3,0		2	20,50		*600*	752,29	2	20,50		*600*	752,29
15	3,0		2	20,50		*650*	882,90	2	20,50		*650*	882,90
16		D	3	22,00		*700*	1098,88	3	22,00		*700*	1098,88

Not: zemin tipi no:1 ve 6 kil, zemin tipi no:2 ve 5 kum veya silt, zemin tipi no:3 kaya

Zemin profili C, doğal zemin koşulları için, SPT-N sayılarından yola çıkılarak 2006 ABYYHY Tablo 6.1'e göre 0 – 1.5 m arası yumuşak siltli kil, 1.5 – 3 m arası gevşek silt, 3 – 4 m arası yumuşak siltli kil, 4 – 5 m arası gevşek silt, 5 – 6 m arası gevşek silt, 6 – 8 m arası orta sıkı silt, 8 – 9 m arası yumuşak siltli kil, 9 – 9.5 m arası yumuşak kil, 9.5 – 28 m arası yumuşak kil, 28 m'den sonra kaya olarak tanımlanmıştır. Bu zeminin 10 m'ye kadar sıkılaştırma ile iyileştirildiği varsayıldığında, SPT-N sayıları gevşek tabakalar için 10, sıkı tabakalar için 5

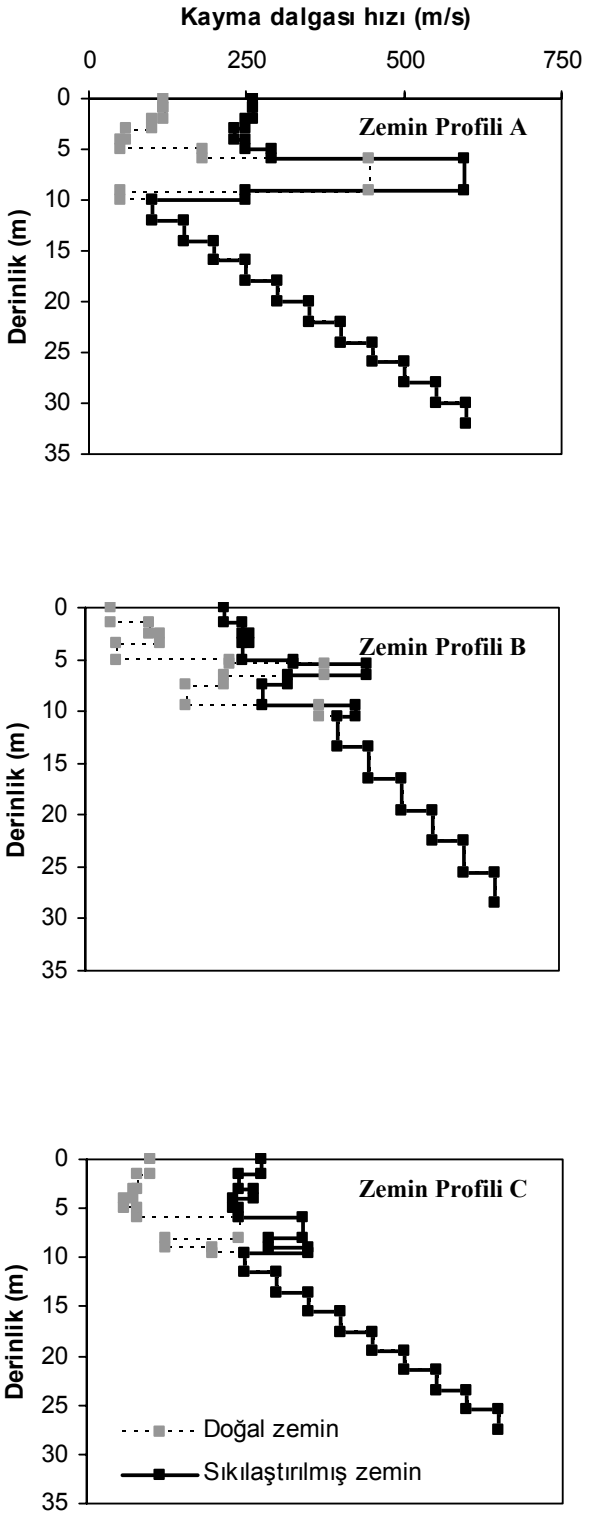
mertebesinde arttırılarak profil 0 – 1.5 m arası katı siltli kil, 1.5 – 3 m arası orta sıkı silt, 3 – 4 m arası katı siltli kil, 4 – 5 m arası orta sıkı silt, 5 – 6 m arası orta sıkı silt, 6 – 8 m arası orta sıkı silt, 8 – 9 m arası katı siltli kil, 9 – 9.5 m arası katı kil olarak tanımlanmıştır. Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için değişen kayma dalgası hızları da, SPT-N sayılarına göre 2006 ABYYHY Tablo 6.1'den alınmıştır. Profil karakteristikleri analizlerde tanımlandığı şekliyle Tablo 5.3'de gösterilmiştir.

Tablo 5.3 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için tanımlanan profil C

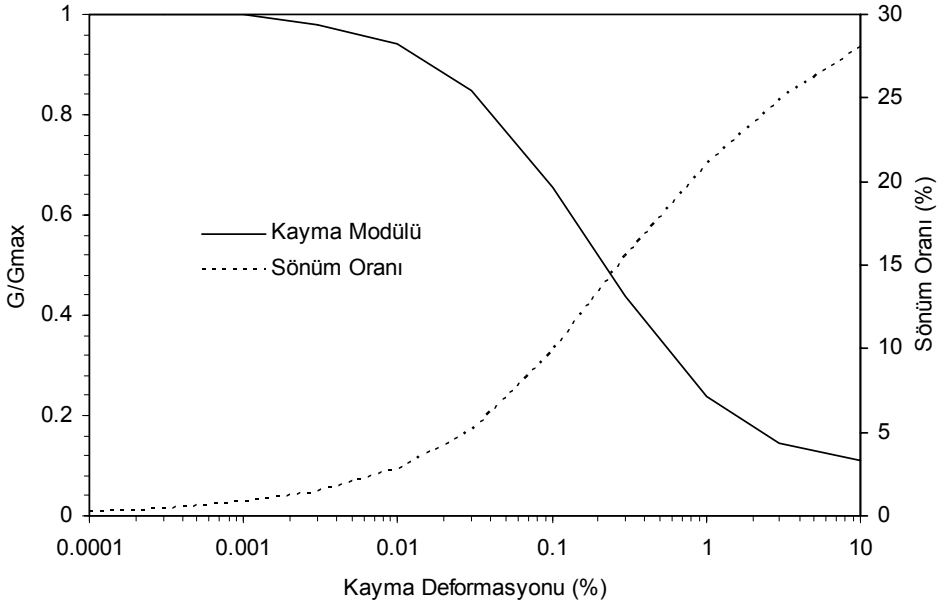
			Normal Zemin					Sıkılaştırılmış Zemin				
Tabaka No	Tabaka Kalınlığı (m)	YASS ve Deprem Dalgası Yeri	Zemin Tipi	Birim hac. Ağırlık (kN/m3)	SPT N	Kayma Dalgası Hızı (m/sn)	Maks. Kayma Modulu Gmax (MPa)	Zemin Tipi	Birim hac. Ağırlık (kN/m3)	SPT N	Kayma Dalgası Hızı (m/sn)	Maks. Kayma Modulu Gmax (MPa)
1	1,5	YASS	1	18,00	4	*100*	18,35	6	19,00	14	*275*	146,47
2	1,5		2	19,00	4	*80*	12,40	5	20,00	14	*240*	117,43
3	1,0		1	18,00	3	*75*	10,32	6	19,00	13	*262*	133,46
4	1,0		2	18,50	3	*60*	6,79	5	19,50	13	*230*	105,15
5	1,0		2	19,00	4	*80*	12,40	5	20,00	14	*240*	117,43
6	2,0		2	19,00	14	*240*	111,56	5	20,00	24	*340*	235,68
7	1,0		1	18,00	5	*125*	28,67	6	19,00	15	*287*	160,09
8	0,5		1	17,50	8	*200*	71,36	6	18,50	18	*350*	231,01
9	2,0		1	17,50		*250*	111,49	1	17,50		*250*	111,49
10	2,0		1	17,50		*300*	160,55	1	17,50		*300*	160,55
11	2,0		1	17,50		*350*	218,53	1	17,50		*350*	218,53
12	2,0		1	17,50		*400*	285,42	1	17,50		*400*	285,42
13	2,0		1	17,50		*450*	361,24	1	17,50		*450*	361,24
14	2,0		1	17,50		*500*	445,97	1	17,50		*500*	445,97
15	2,0		1	17,50		*550*	539,63	1	17,50		*550*	539,63
16	2,0		1	17,50		*600*	642,20	1	17,50		*600*	642,20
17	2,0		1	17,50		*650*	753,70	1	17,50		*650*	753,70
18		D	3	22,00		*700*	1098,88	3	22,00		*700*	1098,88

Not: zemin tipi no:1 ve 6 kil, zemin tipi no:2 ve 5 kum veya silt, zemin tipi no:3 kaya

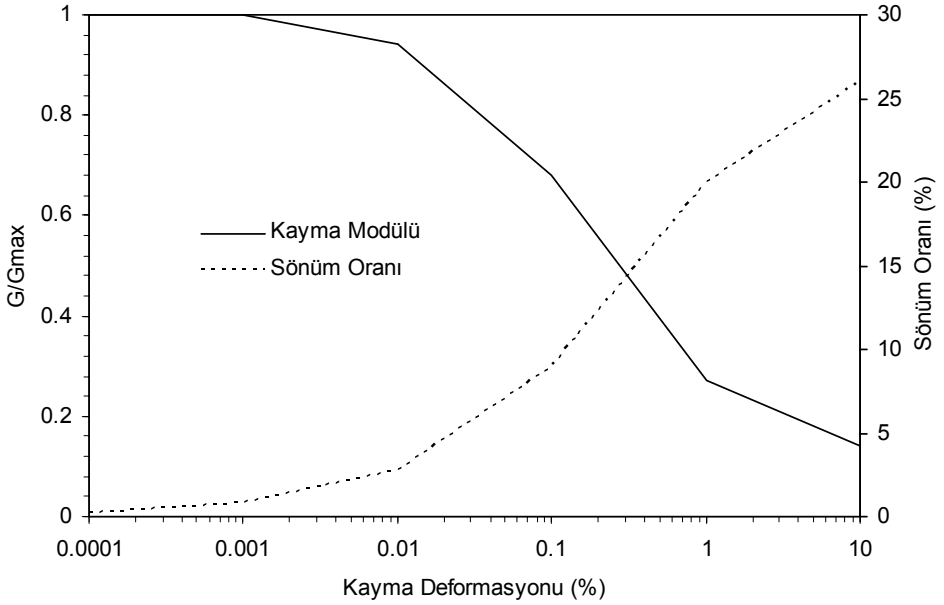
Kayma dalgası hızlarının derinlik ile değişimi Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Zemin tipinin doğal ve sıkılaştırılmış zemin koşulları için değişimi, sıkılaştırma sonucunda relatif sıkılığın standart Japonya kumu olan "Toyoura kumu"nun davranışında olduğu gibi %30'dan %75'e yükseldiği kabulü yapılarak tanımlanmıştır (Altun ve Ansal, 2003). Doğal ve sıkılaştırılmış zemin koşulları için tanımlanan zemin tipleri Şekil 5.7 ve 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma dalgası hızlarının derinlikle değişimi

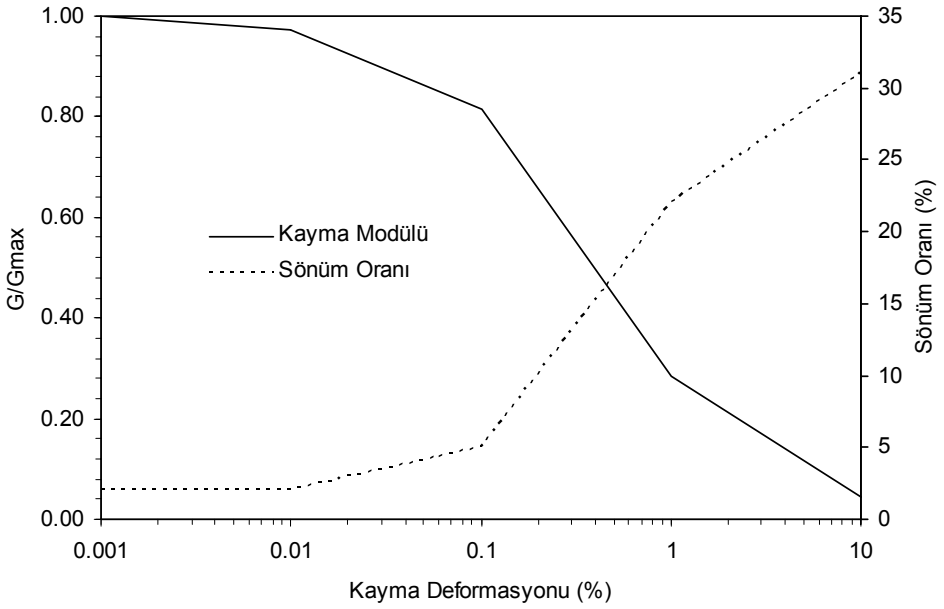


(a)

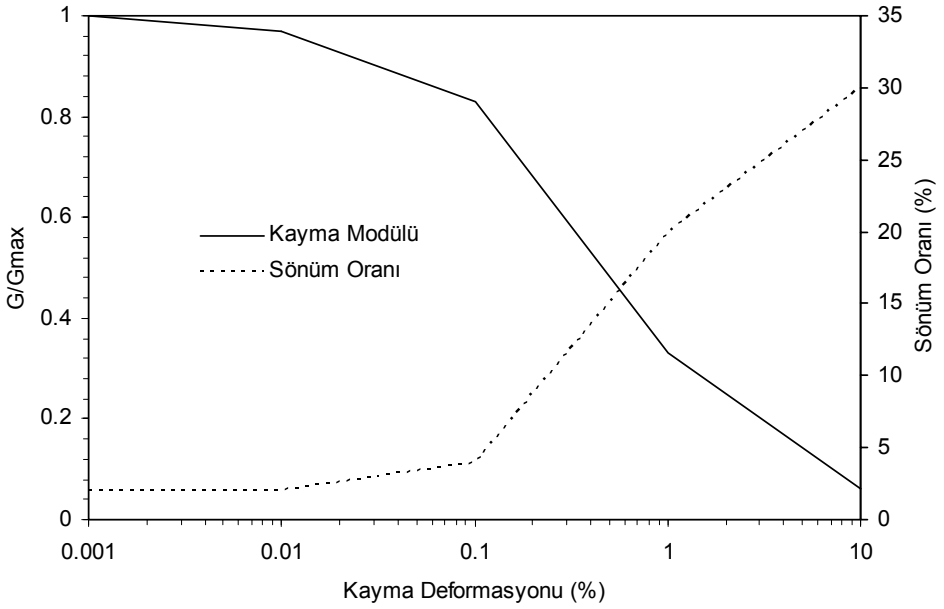


(b)

Şekil 5.7 a) Doğal zemin koşulları için tanımlanan zemin tipi kil (1), b) Sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tanımlanan zemin tipi kil (6)



(a)



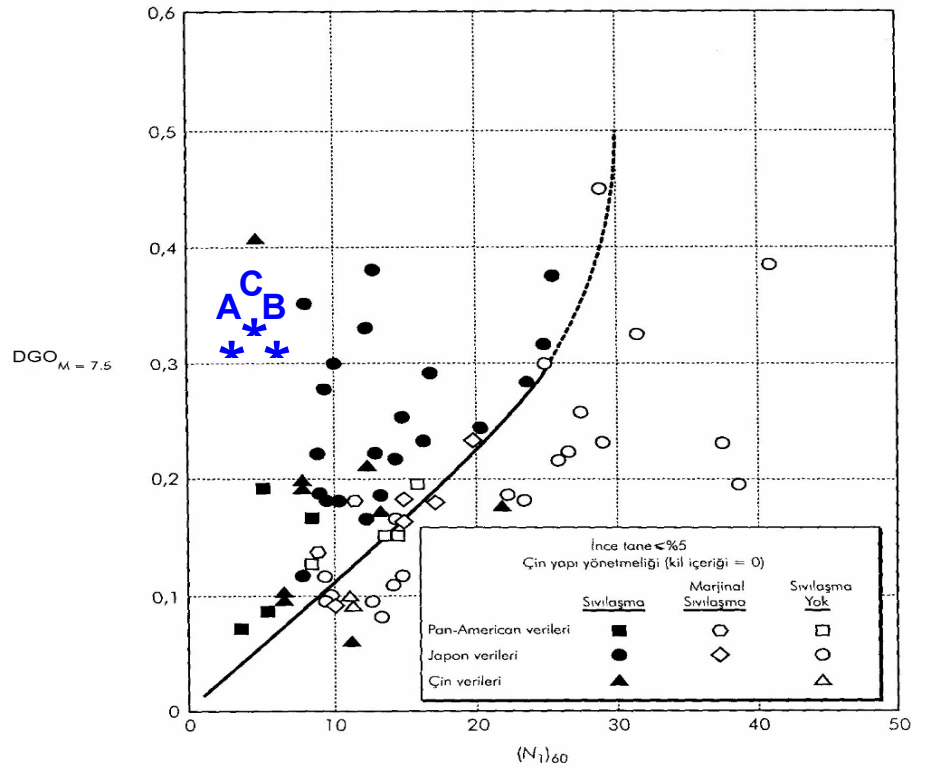
(b)

Şekil 5.8 a) Doğal zemin koşulları için tanımlanan zemin tipi kum (2), b) Sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tanımlanan zemin tipi kum (5)

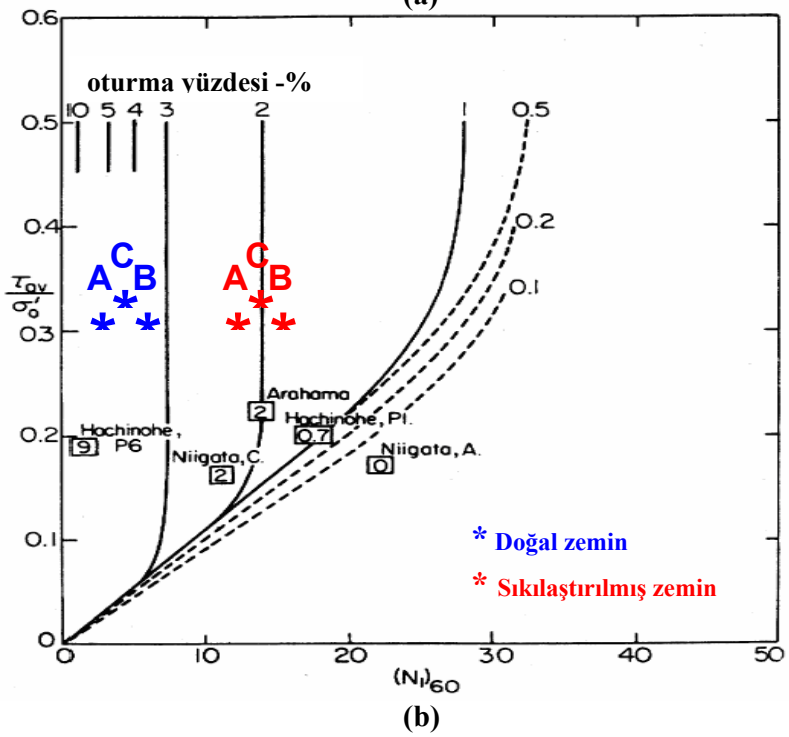
Seçilen zemin profillerinin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı Seed ve diğ. (1983) tarafından tanımlanan devirsel gerilme oranı (DGO) ile SPT dirençlerinin karşılaştırılması yöntemiyle değerlendirilmiştir. DGO'nun hesabında Denklem 2.1'den faydalanılmıştır. Yer altı su seviyesinin 0.7 m'de olduğu Profil A'da düşük SPT-N dirençlerine sahip 2 – 4 m arasındaki bölgenin sıvılaşabilirliği düşünülmüş, bu tabakanın ortasında r_d; Denklem 2.4'den 0.98 olarak hesaplanmış, yüzey ivmesi a_{mak}; 0.3 g olarak alınmış, buna göre maksimum kayma gerilmesi τ_{mak}; Denklem 2.2'den 17.23 kN/m^2 olarak bulunmuştur. Bulunan değerler Denklem 2.1'de yerine konulduğunda DGO 0.32 olarak hesaplanmıştır. Yer altı su seviyesinin 0.6 m'de olduğu Profil B'de düşük SPT-N dirençlerine sahip 1.5 – 3.5 m arasındaki bölgenin sıvılaşabilirliği düşünülmüş, bu tabakanın ortasında r_d; Denklem 2.4'den 0.98 olarak hesaplanmış, yüzey ivmesi a_{mak}; 0.3 g olarak alınmış, buna göre maksimum kayma gerilmesi τ_{mak}; Denklem 2.2'den 14.05 kN/m^2 olarak bulunmuştur. Bulunan değerler Denklem 2.1'de yerine konulduğunda DGO 0.32 olarak hesaplanmıştır. Yer altı su seviyesinin 0.5 m'de olduğu Profil C'de düşük SPT-N dirençlerine sahip 1.5 – 3 m arasındaki bölgenin sıvılaşabilirliği düşünülmüş, bu tabakanın ortasında r_d; Denklem 2.4'den 0.98 olarak hesaplanmış, yüzey ivmesi a_{mak}; 0.3 g olarak alınmış, buna göre maksimum kayma gerilmesi τ_{mak}; Denklem 2.2'den 12.3 kN/m^2 olarak bulunmuştur. Bulunan değerler Denklem 2.1'de yerine konulduğunda DGO 0.34 olarak hesaplanmıştır. Üç zemin profilinde de sıvılaşabilirliği düşünülen tabakalar için hesaplanan devirsel gerilme oranları aynı tabakalara ait SPT–N değerlerine göre Şekil 5.9a'da gösterildiği gibi işaretlenmiştir. Grafiğin incelenmesinden seçilen zemin profillerinin sıvılaşmaya duyarlı bölgede yer aldıkları görülmektedir.

Seçilen zemin profillerinde sıvılaşabilirliği düşünülen tabakaların sıkılaştırmadan önce ve sıkılaştırmadan sonra yapacakları oturmaların hesabı için Tokimatsu ve Seed (1987) tarafından önerilen, DGO ve SPT-N dirençlerine göre birim hacim deformasyonu korelasyonu grafiğinden yararlanılmıştır. Buna göre Şekil 5.9b'de gösterildiği gibi doğal zemin ve sıkılaştırılmış zemin koşulları için hesaplanan devirsel gerilme oranları, aynı tabakalara ait SPT-N dirençlerine göre işaretlenerek birim hacim deformasyonları (oturma yüzdeleri) bulunmuştur. Grafiğin incelenmesinden Profil A için oturma yüzdesinin, sıkılaştırma öncesinde % 7, sıkılaştırma sonrasında % 2.4 olduğu, Profil B için oturma yüzdesinin, sıkılaştırma öncesinde % 3.5, sıkılaştırma sonrasında % 1.8 olduğu, Profil C için oturma

yüzdesinin, sıkılaştırma öncesinde % 4.5, sıkılaştırma sonrasında % 2 olduğu görülmektedir.



(a)



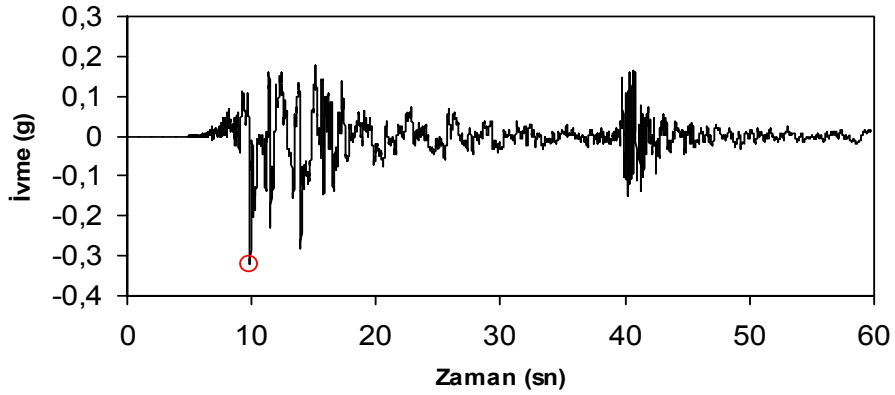
(b)

Şekil 5.9 a) Seçilen zemin profillerinin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı (Seed ve diğ., 1975), b) Seçilen zemin profillerinin doğal durumda ve sıkılaştırmadan sonra oturma yüzdeleri (Tokimatsu ve Seed, 1987)

5.4.3 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin Analizi

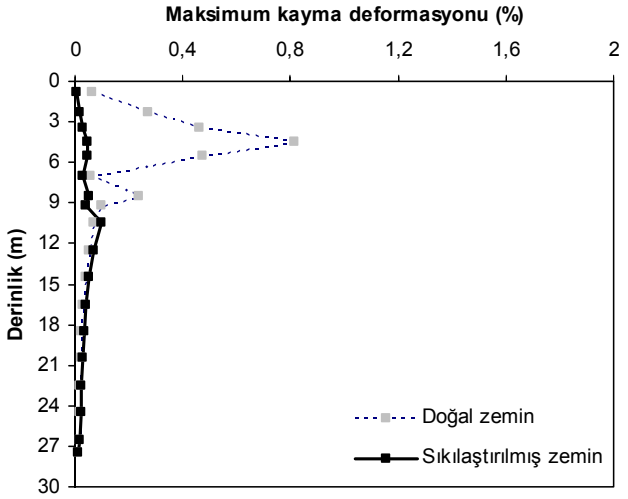
5.4.3.1 Yarımca Petkim Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

Depremin merkez üssüne 22.7 km mesafede bulunan bu istasyonda 17 Ağustos 1999'da 135 saniye boyunca kayıt tutulmuş, kuzey-güney doğrultusunda pik ivme 0.32 g, doğu-batı doğrultusunda pik ivme 0.23 g olarak kaydedilmiştir. Programda kuzey-güney doğrultusunda oluşan maksimum ivme, girdi ivmesi olarak kullanılmış ve bu değerlere göre Şekil 5.10'da görüldüğü gibi depremin ivme – zaman grafiği çizilmiştir.

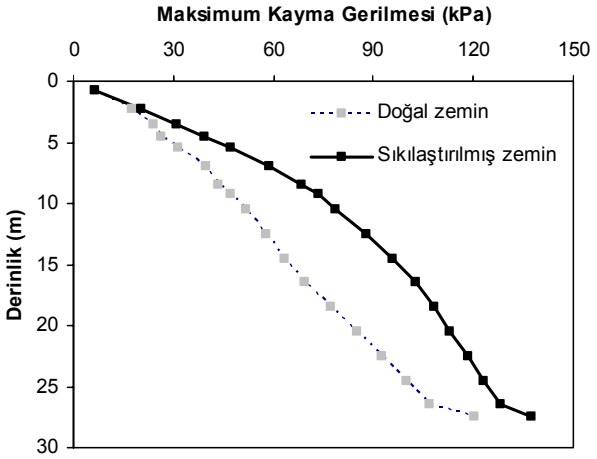


Şekil 5.10 Yarımca Petkim İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği

Zemin profili A, B ve C'nin doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için karakteristik özellikleri tanımlanarak doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için maksimum kayma deformasyonu – derinlik ve maksimum kayma gerilmesi – derinlik grafikleri profil C için Şekil 5.11'de, profil A için Ek A Şekil 1'de ve profil B için Ek B Şekil 1'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.11a'nın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma deformasyonunun azaldığı görülmektedir. Deformasyonun azalması sıvılaşmayı önleme doğrultusunda zemin iyileştirmesinin temel amacı ve beklenen sonucudur. Şekil 5.11b'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma gerilmesinin arttığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin artması şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı artışını sınırlandıracağından, sıvılaşma riski azalacaktır.



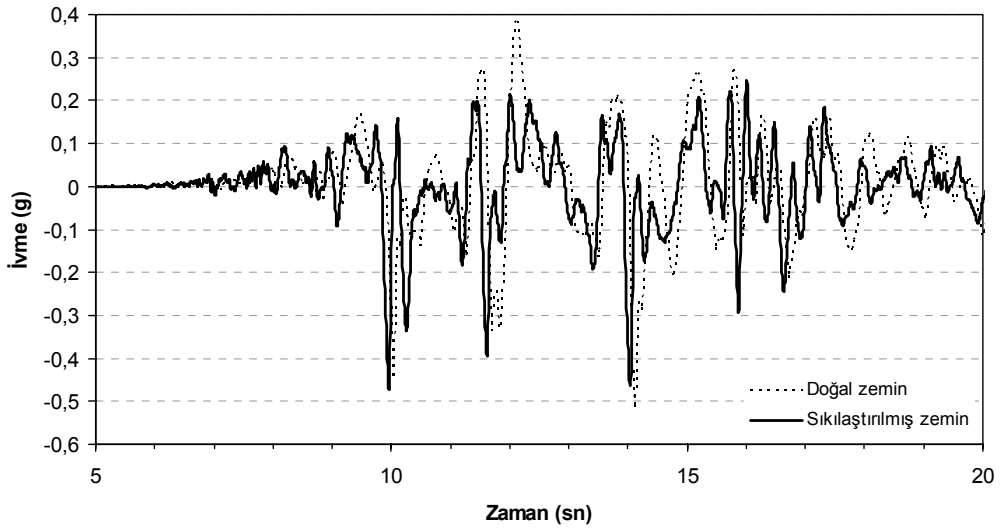
(a)



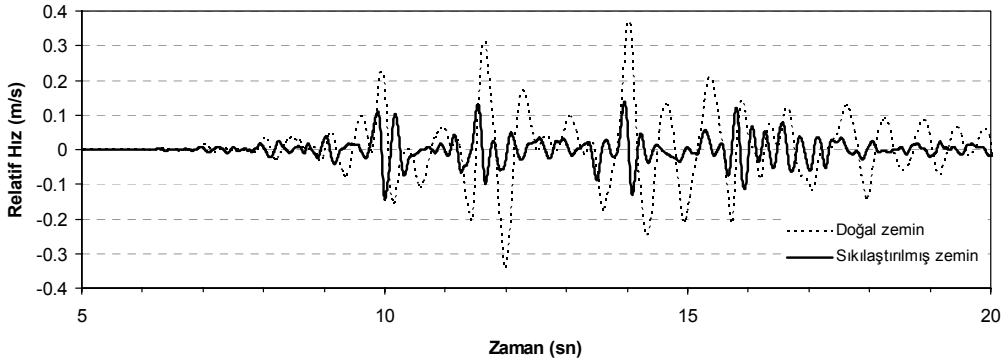
(b)

Şekil 5.11 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi

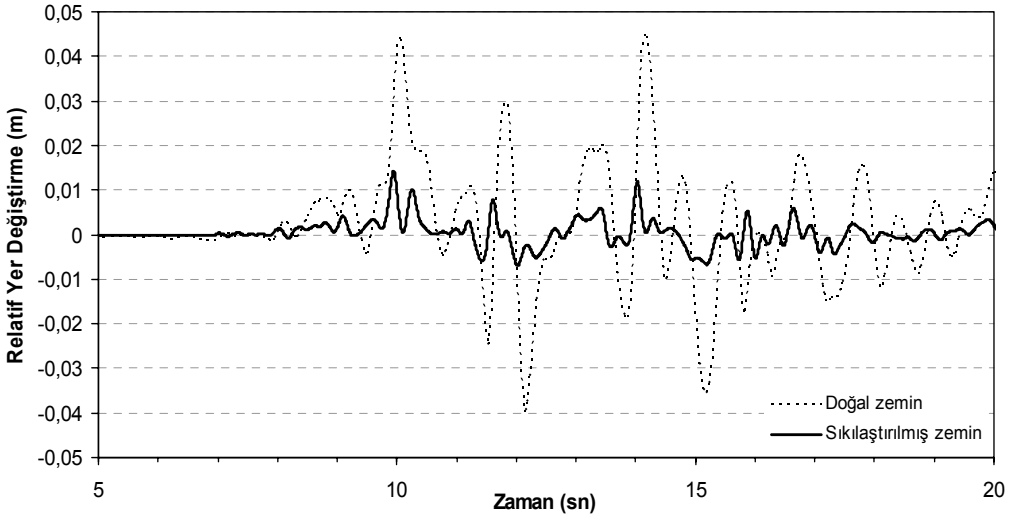
Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için ivme – zaman, relatif hız – zaman ve relatif yerdeğiştirme – zaman grafikleri profil C için Şekil 5.12'de, profil A için Ek A Şekil 2'de ve profil B için Ek B Şekil 2'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.12'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik ivmenin, pik relatif hızın, pik relatif yer değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Şiddetli yer hareketi sırasında kaydedilen ivme, relatif hız ve relatif yer değiştirme sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmalar olup, bunların her üç profilde de sıkılaştırma sonrasında önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır.



(a)



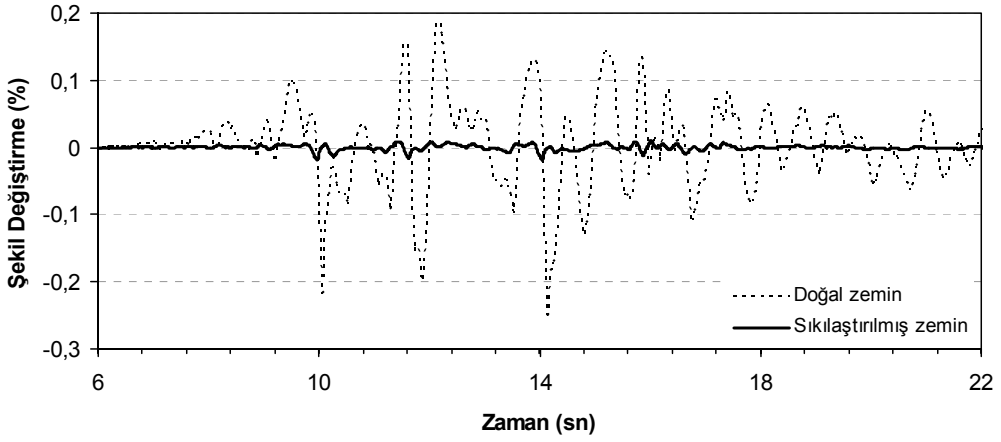
(b)



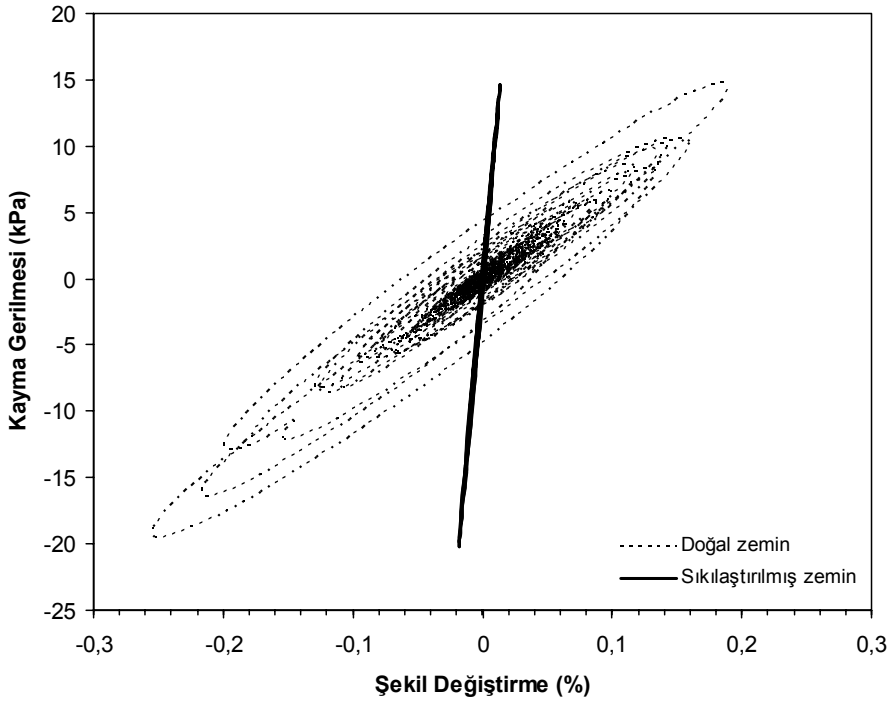
(c)

Şekil 5.12 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için şekil değiştirme – zaman ve kayma gerilmesi – şekil değiştirme grafikleri profil C için Şekil 5.13 ve 5.14'de, profil A için Ek A Şekil 3 ve 4'de ve profil B için Ek B Şekil 3 ve 4'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.13'ün incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Sıkılaştırma sonucunda zemin daneleri arasındaki boşluk hacmi azaldığından, şiddetli yer hareketi sırasında ortaya çıkacak şekil değiştirmeler sınırlı olacaktır, bu da sıvılaşma riskinin azalması anlamına gelmektedir. Şekil değiştirme yüzdesinin sıkılaştırma sonucunda önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır. Şekil 5.14'ün incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda gerilme - şekil değiştirme oranının azaldığı ve histerisis eğrisinin eğiminin arttığı görülmektedir. Eğimin artmasının nedeni sıkılaştırma sonucunda kayma modülünün artmasıdır, çünkü histerisis eğrisinin eğimi kayma modülünü vermektedir.



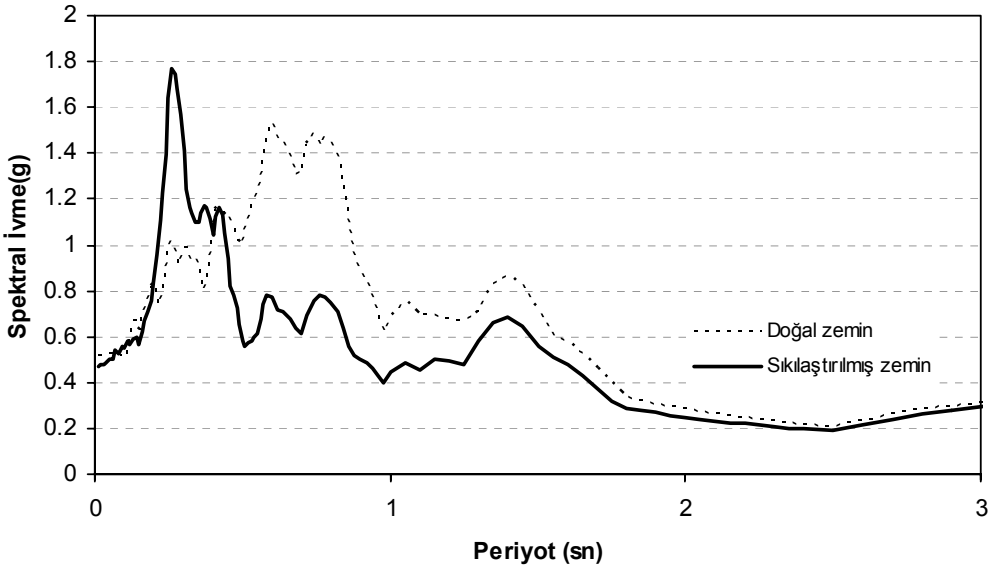
Şekil 5.13 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



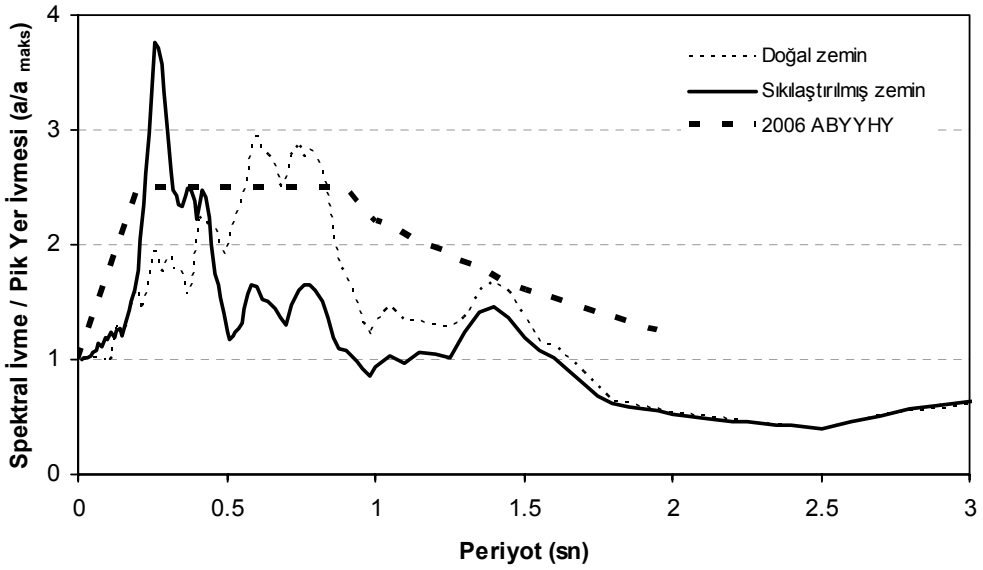
Şekil 5.14 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için % 5 sönüm oranında spektral ivmelerin periyot ile değişimi profil C için Şekil 5.15'deki gibi aynı grafik üzerinde çizilmiştir. Spektral ivmelerin pik yer ivmesine oranlanması ile tepki spektrumları elde edilmiş ve Şekil 5.16'daki gibi 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.15'in incelenmesinden, sıkılaştırma sonucunda pik spektral ivmenin arttığı, ancak sola kayarak periyodunun azaldığı görülmektedir. Şekil 5.16'nın incelenmesinden tepki spektrumlarının da aynı şekilde değiştiği ve 2006 ABYYHY'de öngörülen tasarım spektrumunu karakteristik periyotlar 0.2-0.9 aralığında aştığı gözlenmektedir. Sıkılaştırma sonucunda kayma dalgası hızı ve kayma modülünün artmasına bağlı olarak zeminin rijitliği artacağından, ivmelerin büyümesi, buna karşın zemin periyodunun ve yer değiştirme genliklerinin ise azalması beklenen sonuçtur. Zemin periyodunun yapı periyoduna yakın olması olası bir deprem sırasında rezonans durumu yaratacağından yapıya ağır hasar verecektir. Bu nedenle sıkılaştırma sonucunda her ne kadar ivmeler artsa da zemin periyodunun azalması hasar riskinin azalması anlamına gelmektedir. Profil A

ve B için çizilen spektral ivme ve tepki spektrumu grafikleri Ek A Şekil 5 ve 6, Ek B Şekil 5 ve 6'da gösterilmektedir.



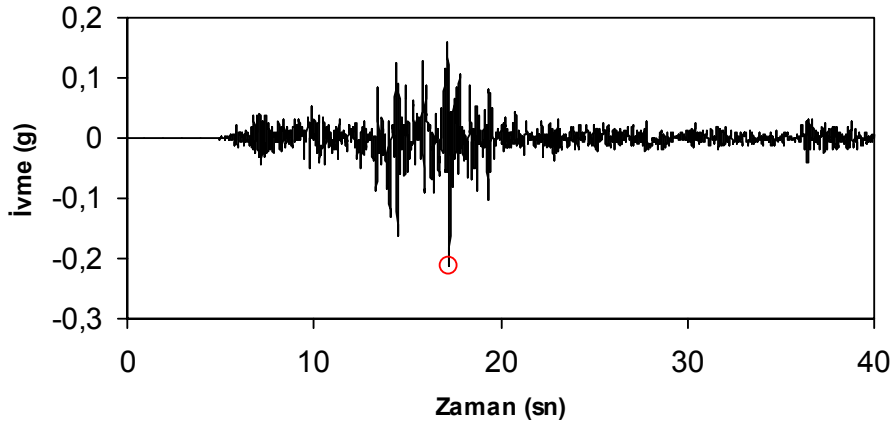
Şekil 5.15 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 5.16 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

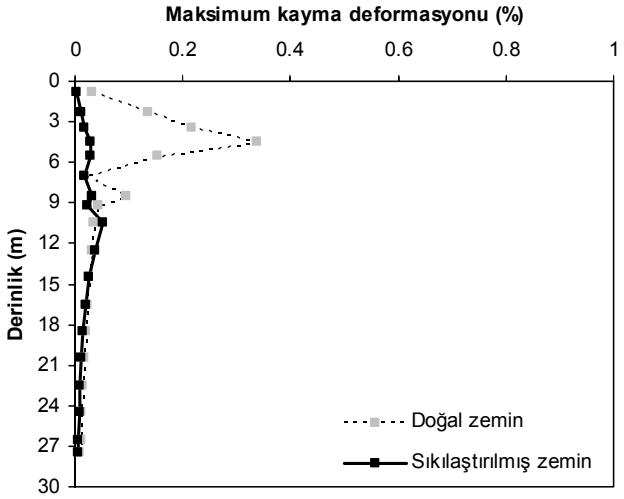
5.4.3.2 Darıca Arçelik Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

Depremin merkez üssüne 47.6 km mesafede bulunan bu istasyonda 17 Ağustos 1999'da 112 saniye boyunca kayıt tutulmuş, kuzey-güney doğrultusunda pik ivme 0.21 g, doğu-batı doğrultusunda pik ivme 0.13 g olarak kaydedilmiştir. Programda kuzey-güney doğrultusunda oluşan maksimum ivme, girdi ivmesi olarak kullanılmış ve bu değerlere göre Şekil 5.17'de görüldüğü gibi depremin ivme – zaman grafiği çizilmiştir.

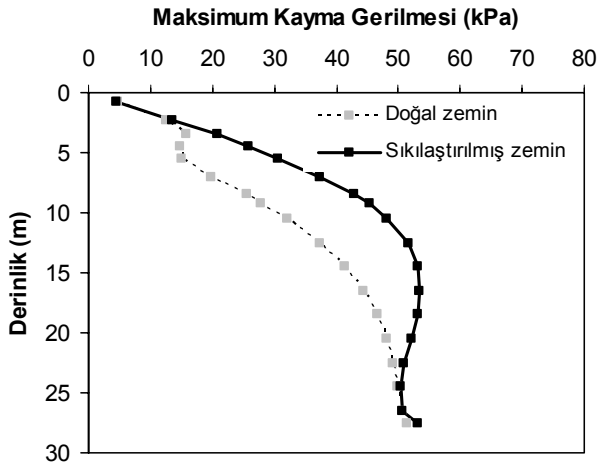


Şekil 5.17 Darıca Arçelik İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği

Zemin profili A, B ve C'nin doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için karakteristik özellikleri tanımlanarak doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için maksimum kayma deformasyonu – derinlik ve maksimum kayma gerilmesi – derinlik grafikleri profil C için Şekil 5.18'de, profil A için Ek A Şekil 7'de ve profil B için Ek B Şekil 7'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.18a'nın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma deformasyonunun azaldığı görülmektedir. Deformasyonun azalması sıvılaşmayı önleme doğrultusunda zemin iyileştirmesinin temel amacı ve beklenen sonucudur. Şekil 5.18b'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma gerilmesinin arttığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin artması şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı artışını sınırlandıracağından, sıvılaşma riski azalacaktır.



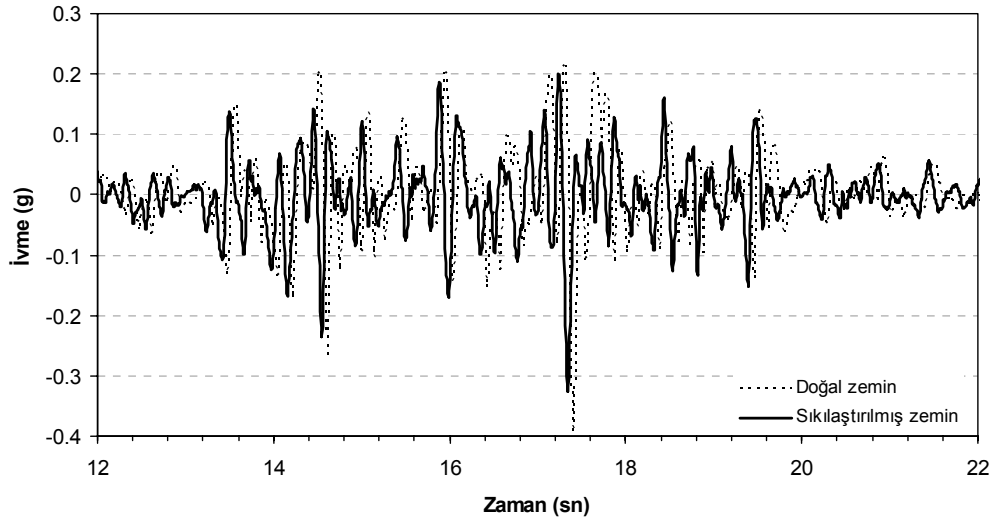
(a)



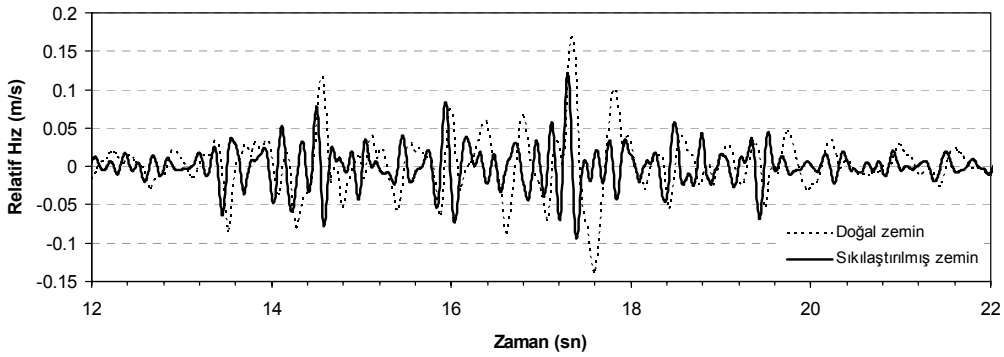
(b)

Şekil 5.18 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi

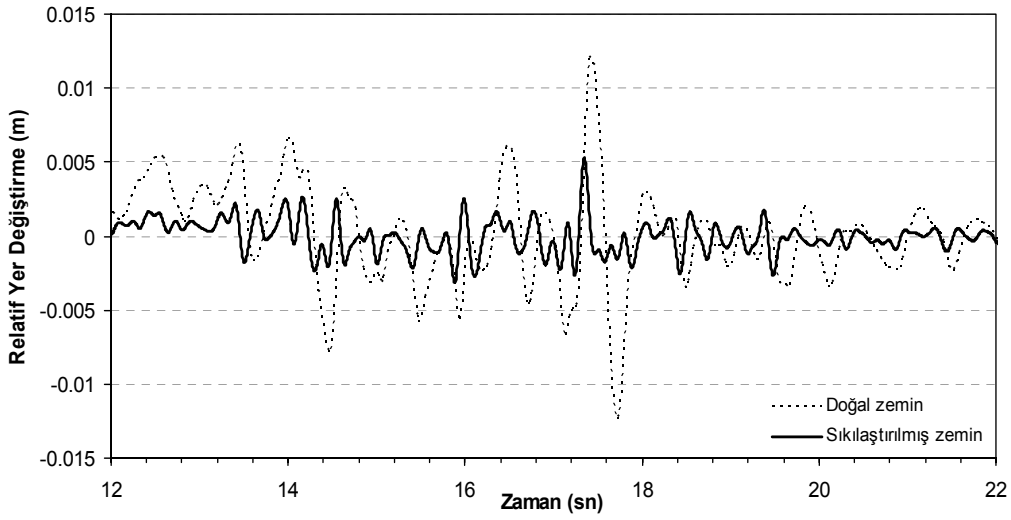
Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için ivme – zaman, relatif hız – zaman ve relatif yerdeğiştirme – zaman grafikleri profil C için Şekil 5.19'da, profil A için Ek A Şekil 8'de ve profil B için Ek B Şekil 8'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.19'un incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik ivmenin, pik relatif hızın, pik relatif yer değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Şiddetli yer hareketi sırasında kaydedilen ivme, relatif hız ve relatif yer değiştirme sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmalar olup, bunların her üç profilde de sıkılaştırma sonrasında önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır.



(a)



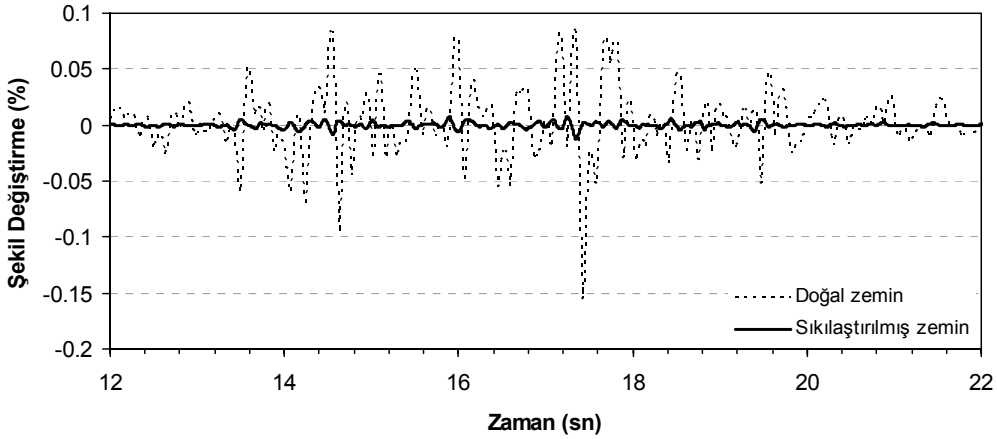
(b)



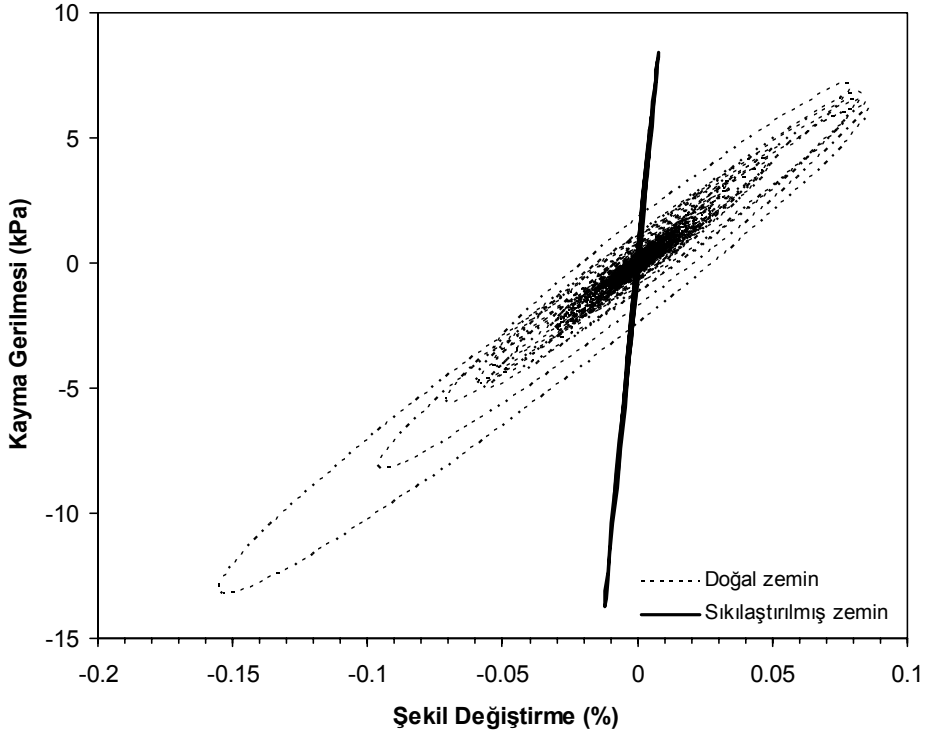
(c)

Şekil 5.19 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için şekil değiştirme – zaman ve kayma gerilmesi – şekil değiştirme grafikleri profil C için Şekil 5.20 ve 5.21'de, profil A için Ek A Şekil 9 ve 10'da ve profil B için Ek B Şekil 9 ve 10'da gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.20'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Sıkılaştırma sonucunda zemin daneleri arasındaki boşluk hacmi azaldığından, şiddetli yer hareketi sırasında ortaya çıkacak şekil değiştirmeler sınırlı olacaktır, bu da sıvılaşma riskinin azalması anlamına gelmektedir. Şekil değiştirme yüzdesinin sıkılaştırma sonucunda önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır. Şekil 5.21'in incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda gerilme - şekil değiştirme oranının azaldığı ve histerisis eğrisinin eğiminin arttığı görülmektedir. Eğimin artmasının nedeni sıkılaştırma sonucunda kayma modülünün artmasıdır, çünkü histerisis eğrisinin eğimi kayma modülünü vermektedir.



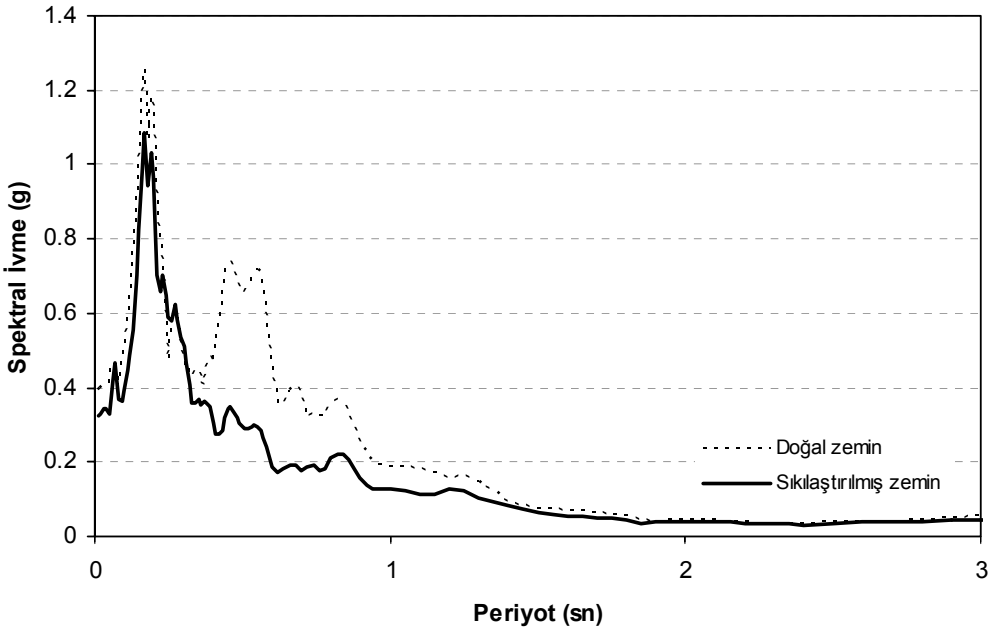
Şekil 5.20 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



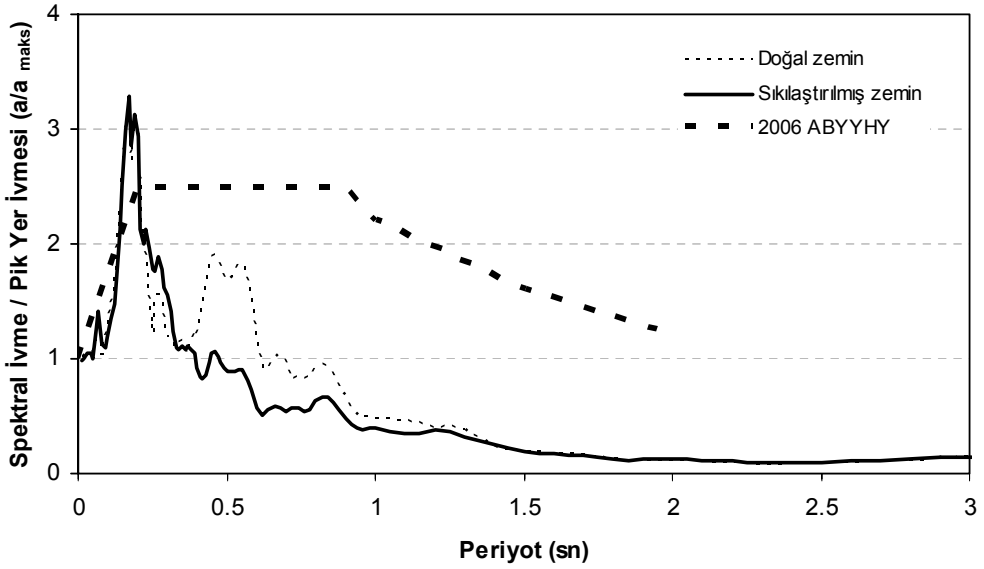
Şekil 5.21 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için % 5 sönüm oranında spektral ivmelerin periyot ile değişimi profil C için Şekil 5.22'deki gibi aynı grafik üzerinde çizilmiştir. Spektral ivmelerin pik yer ivmesine oranlanması ile tepki spektrumları elde edilmiş ve Şekil 5.23'deki gibi 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.22'nin incelenmesinden, sıkılaştırma sonucunda pik spektral ivmenin ve periyodunun sola kayarak azaldığı görülmektedir. Şekil 5.23'ün incelenmesinden tepki spektrumlarının da aynı şekilde değiştiği ve 2006 ABYYHY'de öngörülen tasarım spektrumunu karakteristik periyotlar 0.2-0.9 aralığında aştığı gözlenmektedir. Sıkılaştırma sonucunda kayma dalgası hızı ve kayma modülünün artmasına bağlı olarak zeminin rijitliği artacağından, ivmelerin büyümesi, buna karşın zemin periyodunun ve yer değiştirme genliklerinin ise azalması beklenen sonuçtur. Burada beklenenin aksine ivmelerin azalması olası bir depremde yapılarda oluşacak hasarı ve sıvılaşma riskini azaltacak, beklendiği gibi periyodun azalması da yine hasarın minimum düzeyde kalmasını

sağlayacaktır. Profil A ve B için çizilen spektral ivme ve tepki spektrumu grafikleri Ek A Şekil 11 ve 12, Ek B Şekil 11 ve 12'de gösterilmektedir.



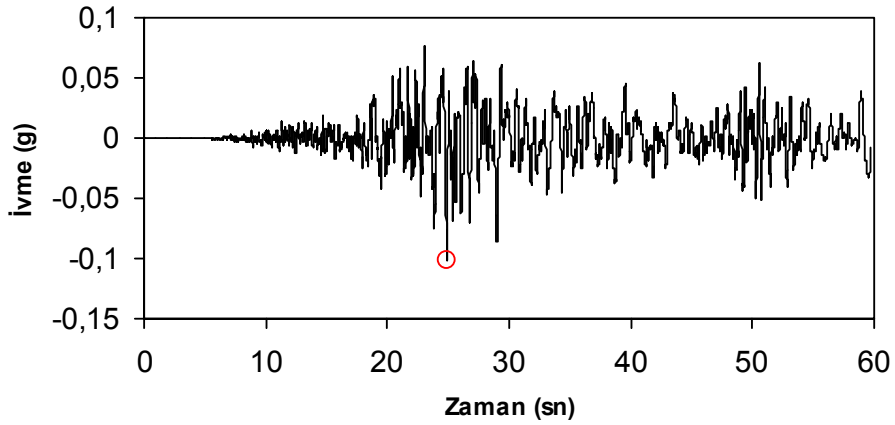
Şekil 5.22 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 5.23 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

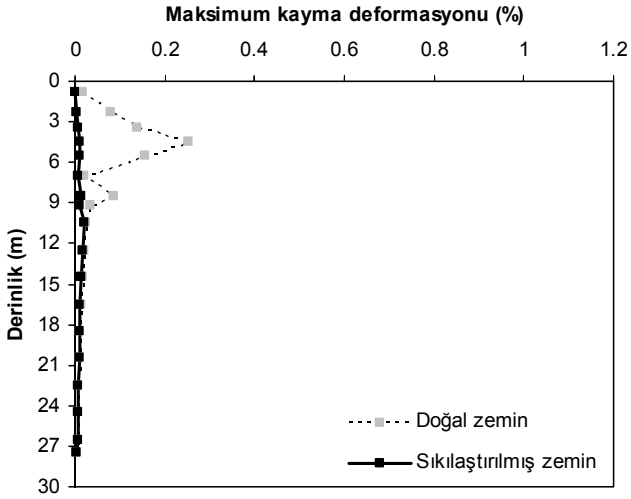
5.4.3.3 Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

Depremin merkez üssüne 78.8 km mesafede bulunan bu istasyonda 17 Ağustos 1999'da 138 saniye boyunca kayıt tutulmuş, kuzey-güney doğrultusunda pik ivme 0.1 g, doğu-batı doğrultusunda pik ivme 0.1 g olarak kaydedilmiştir. Programda kuzey-güney doğrultusunda oluşan maksimum ivme, girdi ivmesi olarak kullanılmış ve bu değerlere göre Şekil 5.24'de görüldüğü gibi depremin ivme – zaman grafiği çizilmiştir.

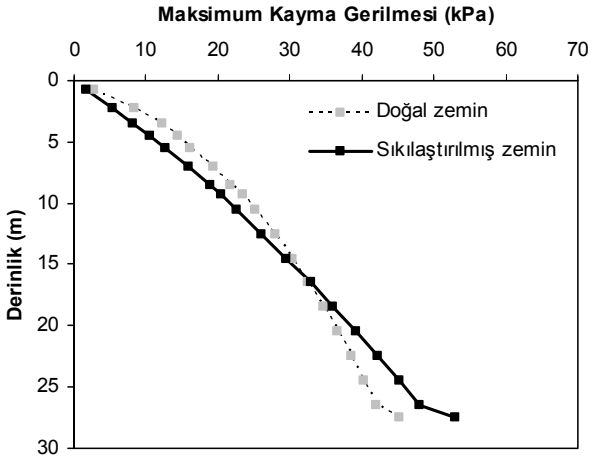


Şekil 5.24 Bursa Tofaş Fabrikası İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği

Zemin profili A, B ve C'nin doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için karakteristik özellikleri tanımlanarak doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için maksimum kayma deformasyonu – derinlik ve maksimum kayma gerilmesi – derinlik grafikleri profil C için Şekil 5.25'de, profil A için Ek A Şekil 13'de ve profil B için Ek B Şekil 13'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.25a'nın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma deformasyonunun azaldığı görülmektedir. Deformasyonun azalması sıvılaşmayı önleme doğrultusunda zemin iyileştirmesinin temel amacı ve beklenen sonucudur. Şekil 5.25b'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma gerilmesinin arttığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin artması şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı artışını sınırlandıracağından, sıvılaşma riski azalacaktır.



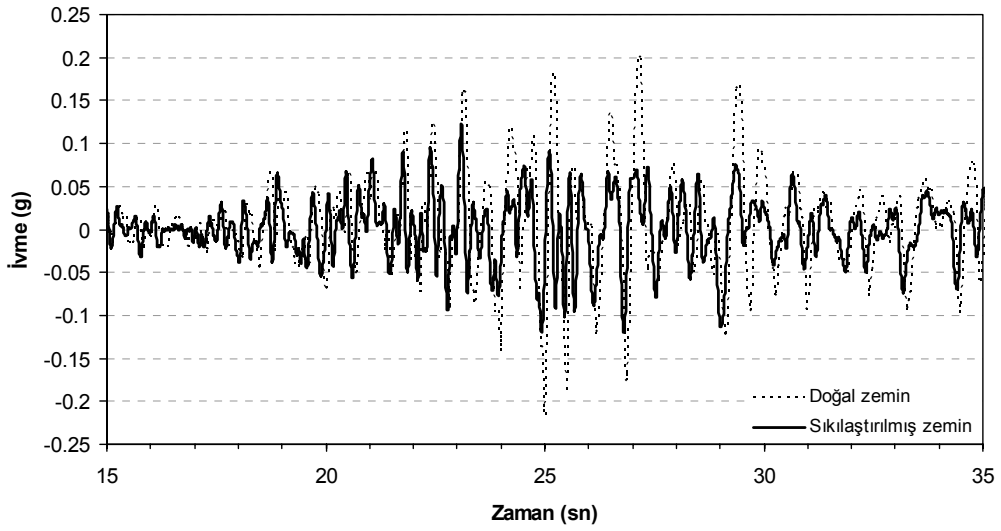
(a)



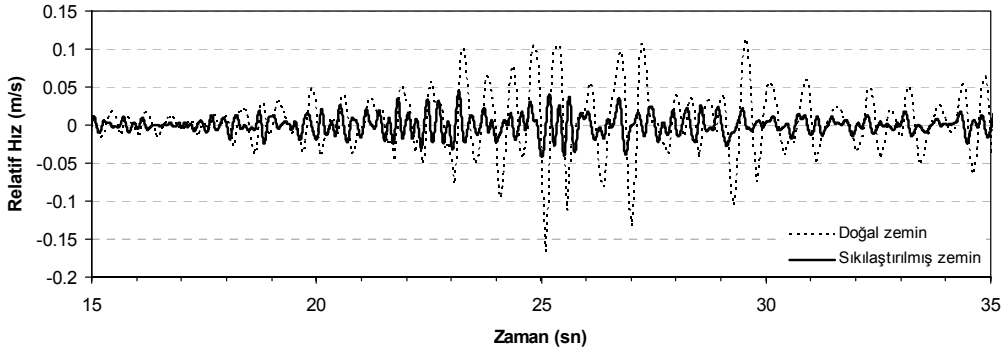
(b)

Şekil 5.25 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi

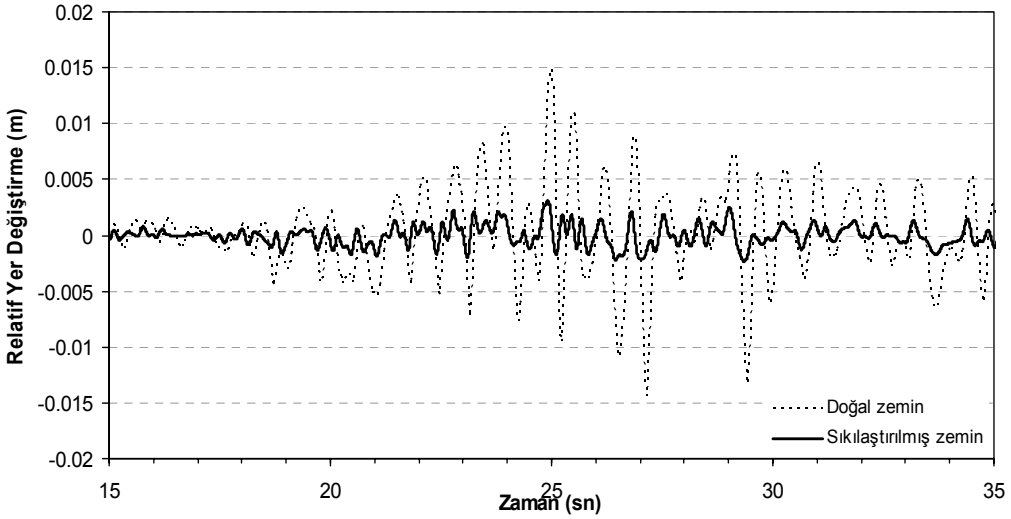
Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için ivme – zaman, relatif hız – zaman ve relatif yerdeğiştirme – zaman grafikleri profil C için Şekil 5.26'da, profil A için Ek A Şekil 14'de ve profil B için Ek B Şekil 14'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.26'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik ivmenin, pik relatif hızın, pik relatif yer değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Şiddetli yer hareketi sırasında kaydedilen ivme, relatif hız ve relatif yer değiştirme sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmalar olup, bunların her üç profilde de sıkılaştırma sonrasında önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır.



(a)



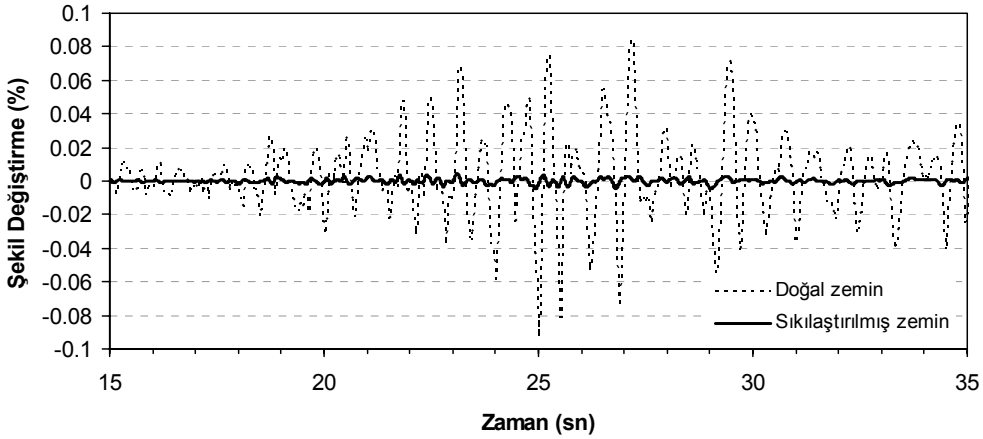
(b)



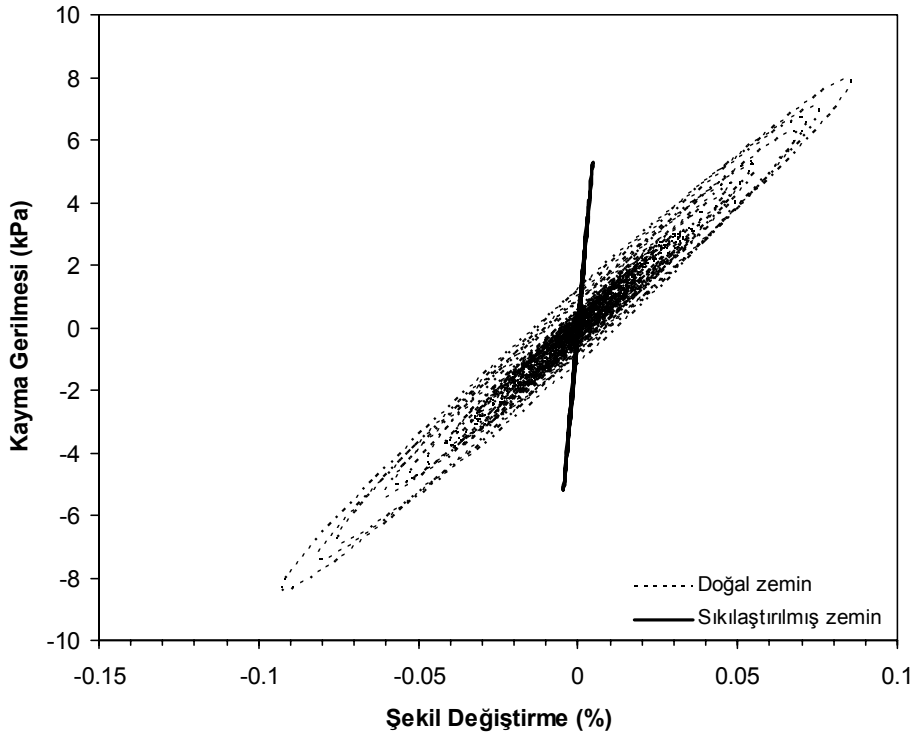
(c)

Şekil 5.26 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için şekil değiştirme – zaman ve kayma gerilmesi – şekil değiştirme grafikleri profil C için Şekil 5.27 ve 5.28'de, profil A için Ek A Şekil 15 ve 16'da ve profil B için Ek B Şekil 15 ve 16'da gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.27'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Sıkılaştırma sonucunda zemin daneleri arasındaki boşluk hacmi azaldığından, şiddetli yer hareketi sırasında ortaya çıkacak şekil değiştirmeler sınırlı olacaktır, bu da sıvılaşma riskinin azalması anlamına gelmektedir. Şekil değiştirme yüzdesinin sıkılaştırma sonucunda önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır. Şekil 5.28'in incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda gerilme - şekil değiştirme oranının azaldığı ve histerisis eğrisinin eğiminin arttığı görülmektedir. Eğimin artmasının nedeni sıkılaştırma sonucunda kayma modülünün artmasıdır, çünkü histerisis eğrisinin eğimi kayma modülünü vermektedir.



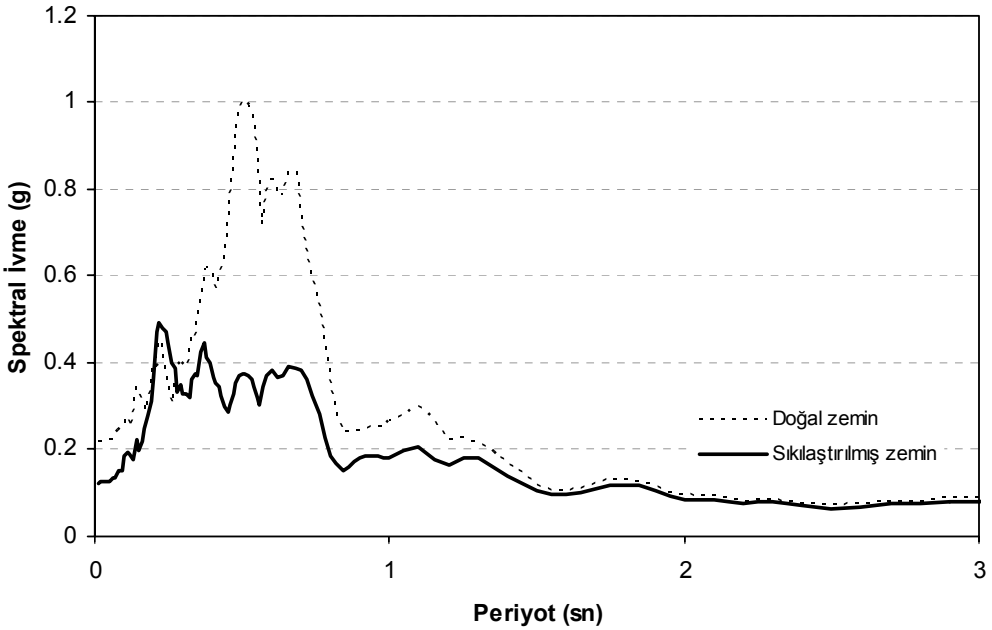
Şekil 5.27 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



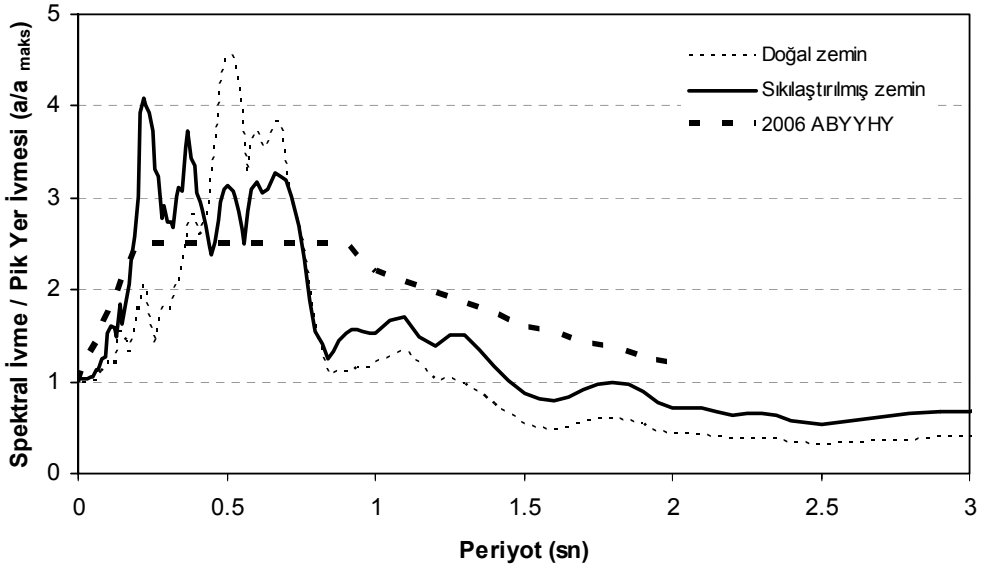
Şekil 5.28 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için % 5 sönüm oranında spektral ivmelerin periyot ile değişimi profil C için Şekil 5.29'daki gibi aynı grafik üzerinde çizilmiştir. Spektral ivmelerin pik yer ivmesine oranlanması ile tepki spektrumları elde edilmiş ve Şekil 5.30'daki gibi 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.29'un incelenmesinden, sıkılaştırma sonucunda pik spektral ivmenin ve periyodunun sola kayarak azaldığı görülmektedir. Şekil 5.30'un incelenmesinden tepki spektrumlarının da aynı şekilde değiştiği ve 2006 ABYYHY'de öngörülen tasarım spektrumunu karakteristik periyotlar 0.2-0.9 aralığında aştığı gözlenmektedir. Sıkılaştırma sonucunda kayma dalgası hızı ve kayma modülünün artmasına bağlı olarak zeminin rijitliği artacağından, ivmelerin büyümesi, buna karşın zemin periyodunun ve yer değiştirme genliklerinin ise azalması beklenen sonuçtur. Burada beklenenin aksine ivmelerin azalması olası bir depremde yapılarda oluşacak hasarı ve sıvılaşma riskini azaltacak, beklendiği gibi periyodun azalması da yine hasarın minimum düzeyde kalmasını

sağlayacaktır. Profil A ve B için çizilen spektral ivme ve tepki spektrumu grafikleri Ek A Şekil 17 ve 18, Ek B Şekil 17 ve 18'de gösterilmektedir.



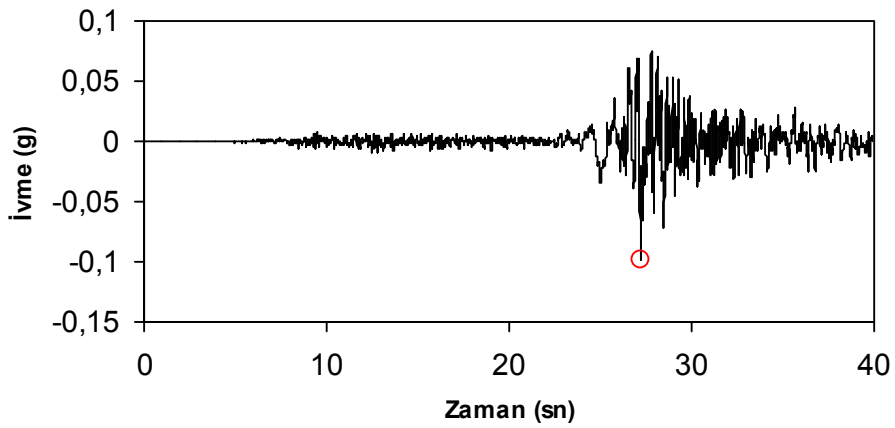
Şekil 5.29 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 5.30 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

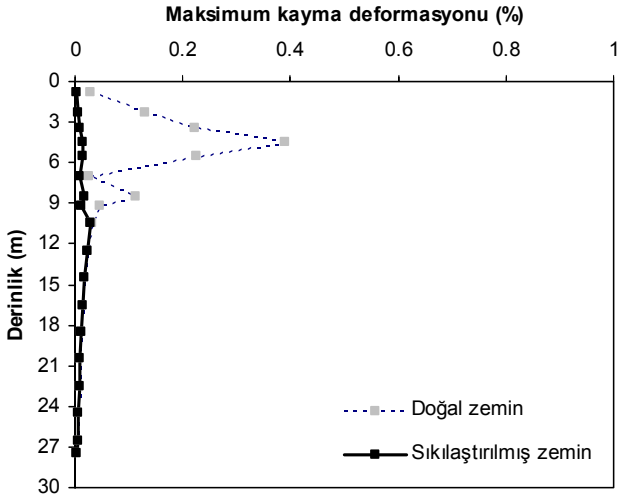
5.4.3.4 Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

Depremin merkez üssüne 160.9 km mesafede bulunan bu istasyonda 17 Ağustos 1999'da 138 saniye boyunca kayıt tutulmuş, kuzey-güney doğrultusunda pik ivme 0.09 g, doğrultusunda pik ivme 0.1 g olarak kaydedilmiştir. Programda doğu-batı doğrultusunda oluşan maksimum ivme, girdi ivmesi olarak kullanılmış ve bu değerlere göre Şekil 5.31'de görüldüğü gibi depremin ivme – zaman grafiği çizilmiştir.

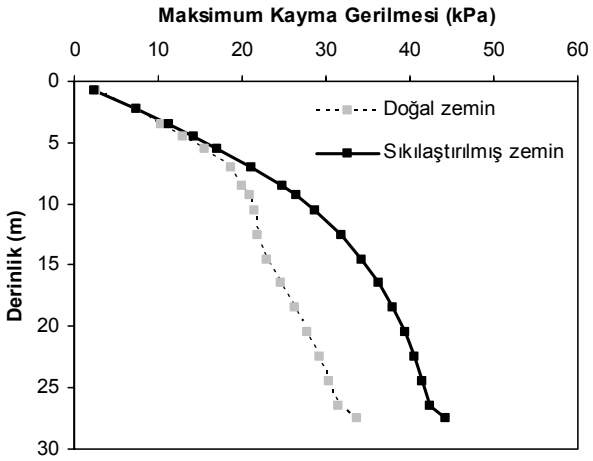


Şekil 5.31 Marmara Ereğlisi Botaş İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği

Zemin profili A, B ve C'nin doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için karakteristik özellikleri tanımlanarak doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için maksimum kayma deformasyonu – derinlik ve maksimum kayma gerilmesi – derinlik grafikleri profil C için Şekil 5.32'de, profil A için Ek A Şekil 19'da ve profil B için Ek B Şekil 19'da gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.32a'nın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma deformasyonunun azaldığı görülmektedir. Deformasyonun azalması sıvılaşmayı önleme doğrultusunda zemin iyileştirmesinin temel amacı ve beklenen sonucudur. Şekil 5.32b'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma gerilmesinin arttığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin artması şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı artışını sınırlandıracağından, sıvılaşma riski azalacaktır.



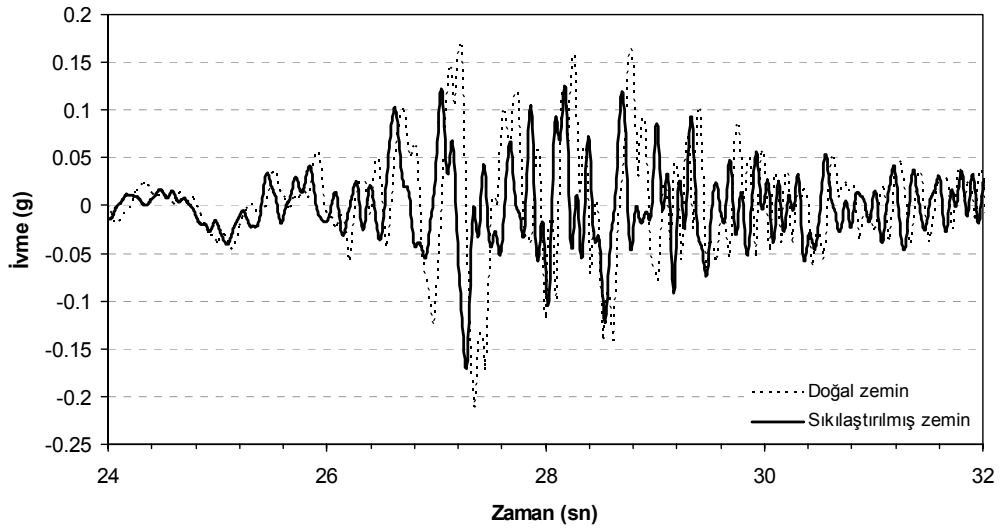
(a)



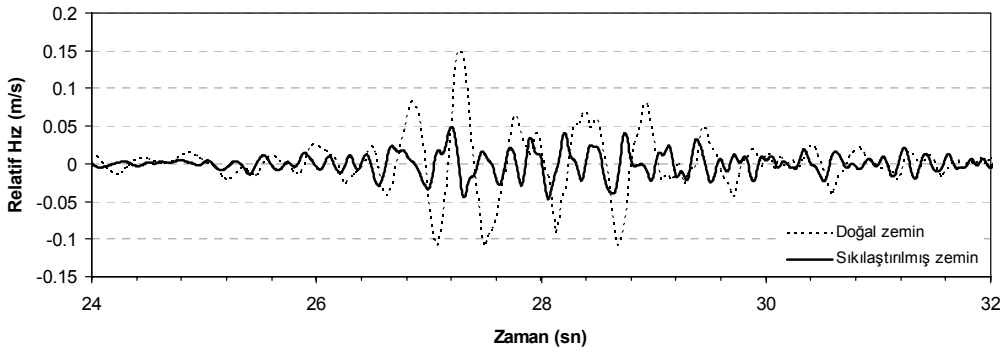
(b)

Şekil 5.32 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi

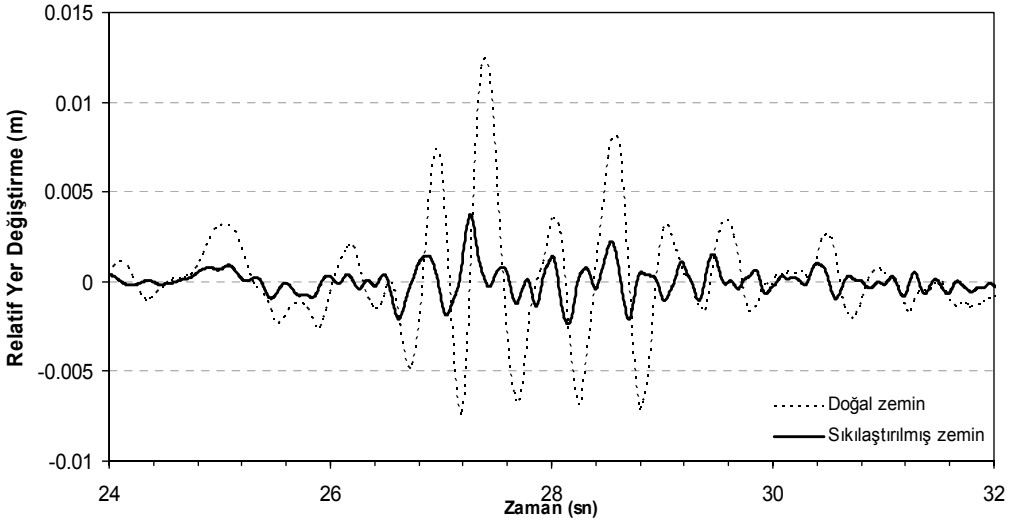
Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için ivme – zaman, relatif hız – zaman ve relatif yerdeğiştirme – zaman grafikleri profil C için Şekil 5.33'de, profil A için Ek A Şekil 20'de ve profil B için Ek B Şekil 20'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.33'ün incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik ivmenin, pik relatif hızın, pik relatif yer değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Şiddetli yer hareketi sırasında kaydedilen ivme, relatif hız ve relatif yer değiştirme sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmalar olup, bunların her üç profilde de sıkılaştırma sonrasında önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır.



(a)



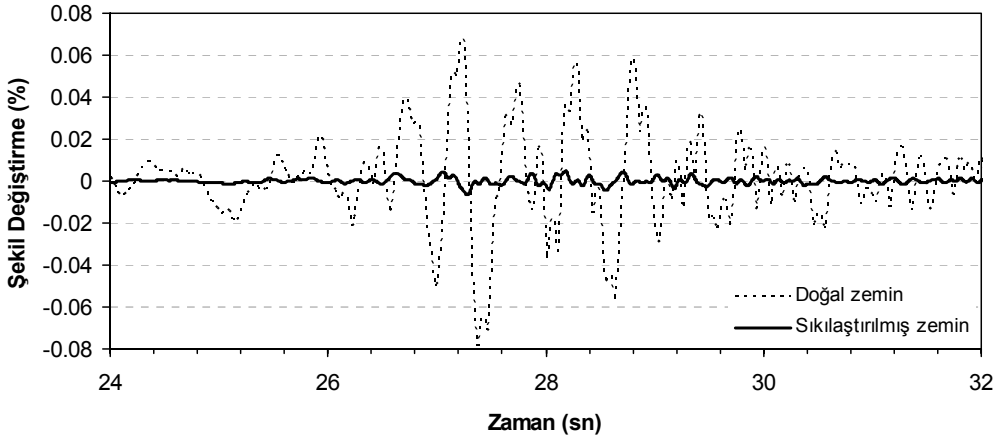
(b)



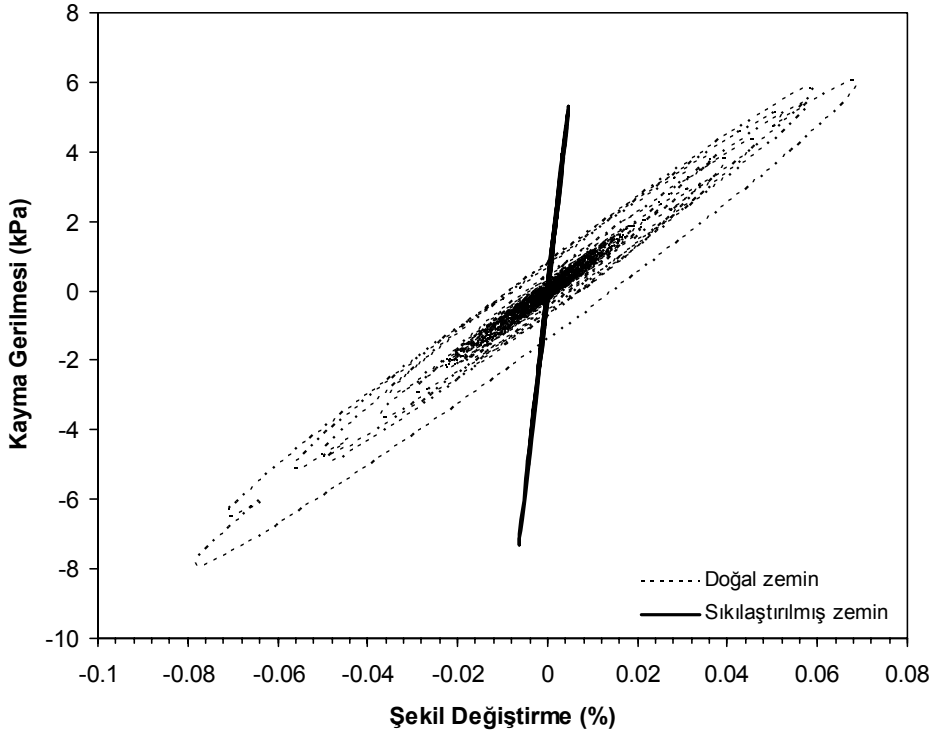
(c)

Şekil 5.33 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için şekil değiştirme – zaman ve kayma gerilmesi – şekil değiştirme grafikleri profil C için Şekil 5.34 ve 5.35'de, profil A için Ek A Şekil 21 ve 22'de ve profil B için Ek B Şekil 21 ve 22'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.34'ün incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Sıkılaştırma sonucunda zemin daneleri arasındaki boşluk hacmi azaldığından, şiddetli yer hareketi sırasında ortaya çıkacak şekil değiştirmeler sınırlı olacaktır, bu da sıvılaşma riskinin azalması anlamına gelmektedir. Şekil değiştirme yüzdesinin sıkılaştırma sonucunda önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır. Şekil 5.35'in incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda gerilme - şekil değiştirme oranının azaldığı ve histerisis eğrisinin eğiminin arttığı görülmektedir. Eğimin artmasının nedeni sıkılaştırma sonucunda kayma modülünün artmasıdır, çünkü histerisis eğrisinin eğimi kayma modülünü vermektedir.



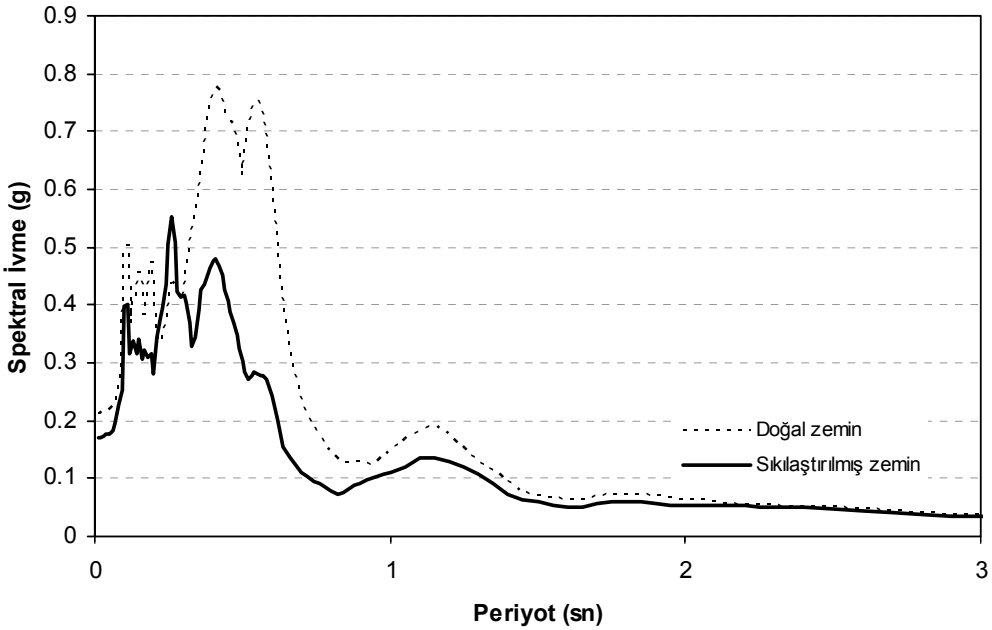
Şekil 5.34 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



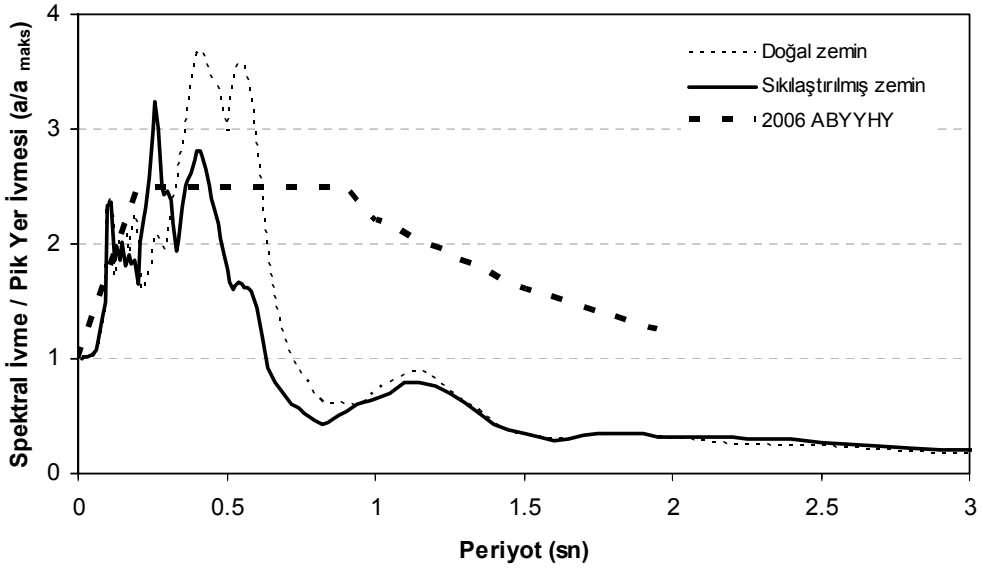
Şekil 5.35 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için % 5 sönüm oranında spektral ivmelerin periyot ile değişimi profil C için Şekil 5.36'daki gibi aynı grafik üzerinde çizilmiştir. Spektral ivmelerin pik yer ivmesine oranlanması ile tepki spektrumları elde edilmiş ve Şekil 5.37'deki gibi 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.36'nın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik spektral ivmenin ve periyodunun sola kayarak azaldığı görülmektedir. Şekil 5.37'nin incelenmesinden tepki spektrumlarının da aynı şekilde değiştiği ve 2006 ABYYHY'de öngörülen tasarım spektrumunu karakteristik periyotlar 0.2-0.9 aralığında aştığı gözlenmektedir. Sıkılaştırma sonucunda kayma dalgası hızı ve kayma modülünün artmasına bağlı olarak zeminin rijitliği artacağından, ivmelerin büyümesi, buna karşın zemin periyodunun ve yer değiştirme genliklerinin ise azalması beklenen sonuçtur. Burada beklenenin aksine ivmelerin azalması olası bir depremde yapılarda oluşacak hasarı ve sıvılaşma riskini azaltacak, beklendiği gibi periyodun azalması da yine hasarın minimum düzeyde kalmasını

sağlayacaktır. Profil A ve B için çizilen spektral ivme ve tepki spektrumu grafikleri Ek A Şekil 23 ve 24, Ek B Şekil 23 ve 24'de gösterilmektedir.



Şekil 5.36 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



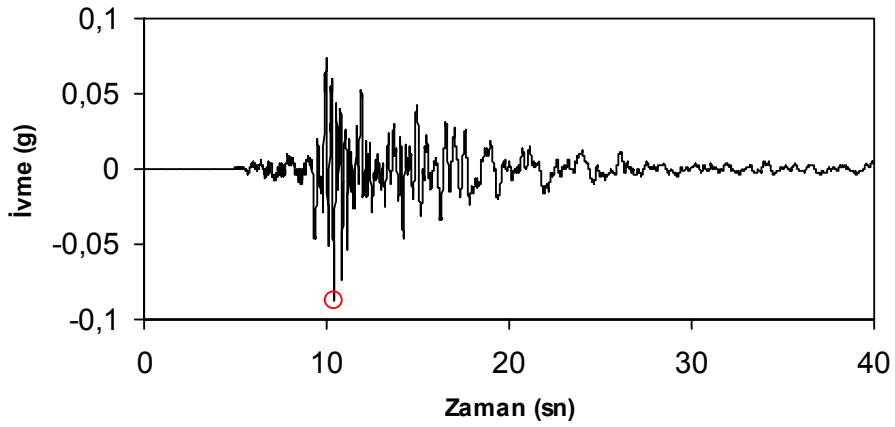
Şekil 5.37 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

5.4.4 13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin Analizi

13 Eylül 1999'da Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Adapazarı, Kocaeli, Gölcük bölümü üzerinde meydana gelen 5.8 büyüklüğündeki deprem, 17 Ağustos 1999'dan sonra yaşanan en büyük artçı deprem olarak kayıtlara geçmiştir.

5.4.4.1 Yarımca Petkim Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

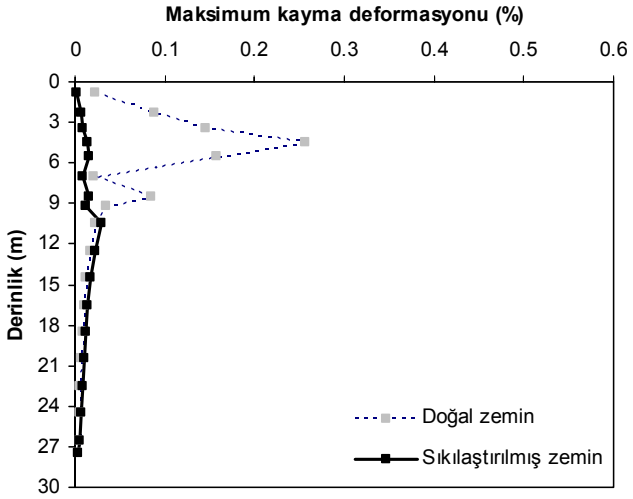
Depremin merkez üssüne 34.6 km mesafede bulunan bu istasyonda 13 Eylül 1999'da 58 saniye boyunca kayıt tutulmuş, kuzey-güney doğrultusunda pik ivme 0.093 g, doğu-batı doğrultusunda pik ivme 0.086 g olarak kaydedilmiştir. Programda kuzey-güney doğrultusunda oluşan maksimum ivme, girdi ivmesi olarak kullanılmış ve bu değerlere göre Şekil 5.38'de görüldüğü gibi depremin ivme – zaman grafiği çizilmiştir.



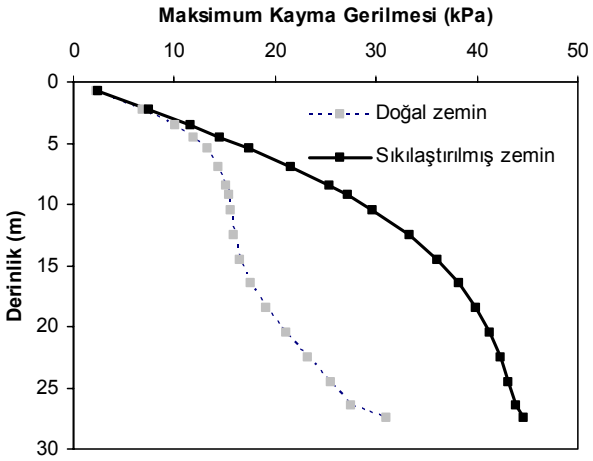
Şekil 5.38 Yarımca Petkim İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği

Zemin profili A, B ve C'nin doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için karakteristik özellikleri tanımlanarak doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için maksimum kayma deformasyonu – derinlik ve maksimum kayma gerilmesi – derinlik grafikleri profil C için Şekil 5.39'da, profil A için Ek A Şekil 25'de ve profil B için Ek B Şekil 25'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.39a'nın incelenmesinden sıkılaştırma

sonucunda maksimum kayma deformasyonunun azaldığı görülmektedir. Deformasyonun azalması sıvılaşmayı önleme doğrultusunda zemin iyileştirmesinin temel amacı ve beklenen sonucudur. Şekil 5.39b'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma gerilmesinin arttığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin artması şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı artışını sınırlandıracağından, sıvılaşma riski azalacaktır.



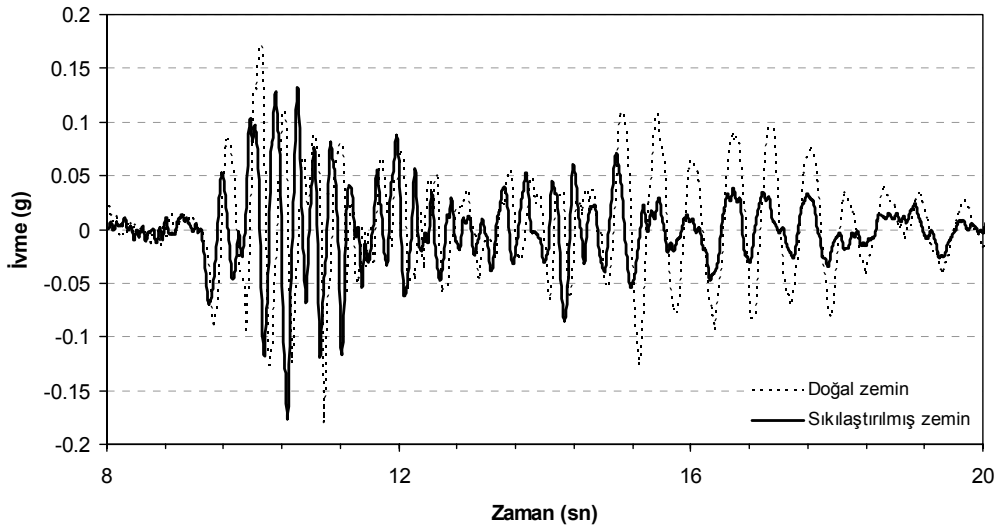
(a)



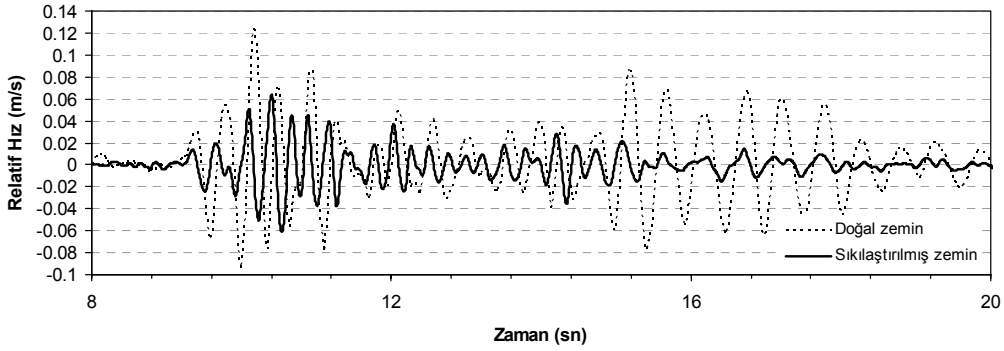
(b)

Şekil 5.39 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi

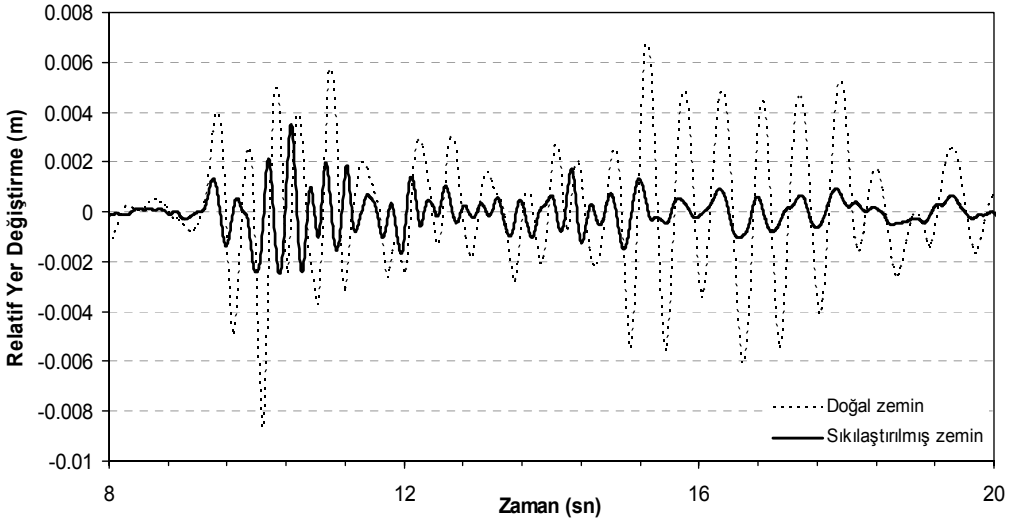
Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için ivme – zaman, relatif hız – zaman ve relatif yerdeğiştirme – zaman grafikleri profil C için Şekil 5.40'da, profil A için Ek A Şekil 26'da ve profil B için Ek B Şekil 26'da gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.40'ın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik ivmenin, pik relatif hızın, pik relatif yer değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Şiddetli yer hareketi sırasında kaydedilen ivme, relatif hız ve relatif yer değiştirme sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmalar olup, bunların her üç profilde de sıkılaştırma sonrasında önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır.



(a)



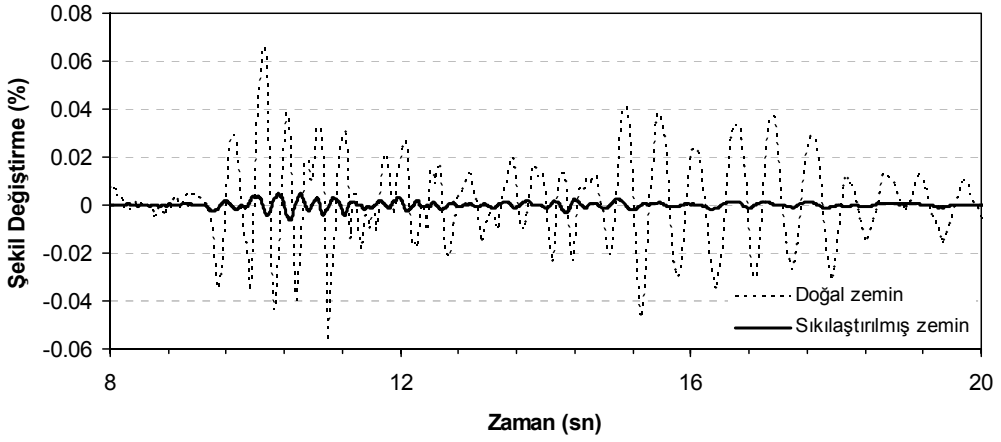
(b)



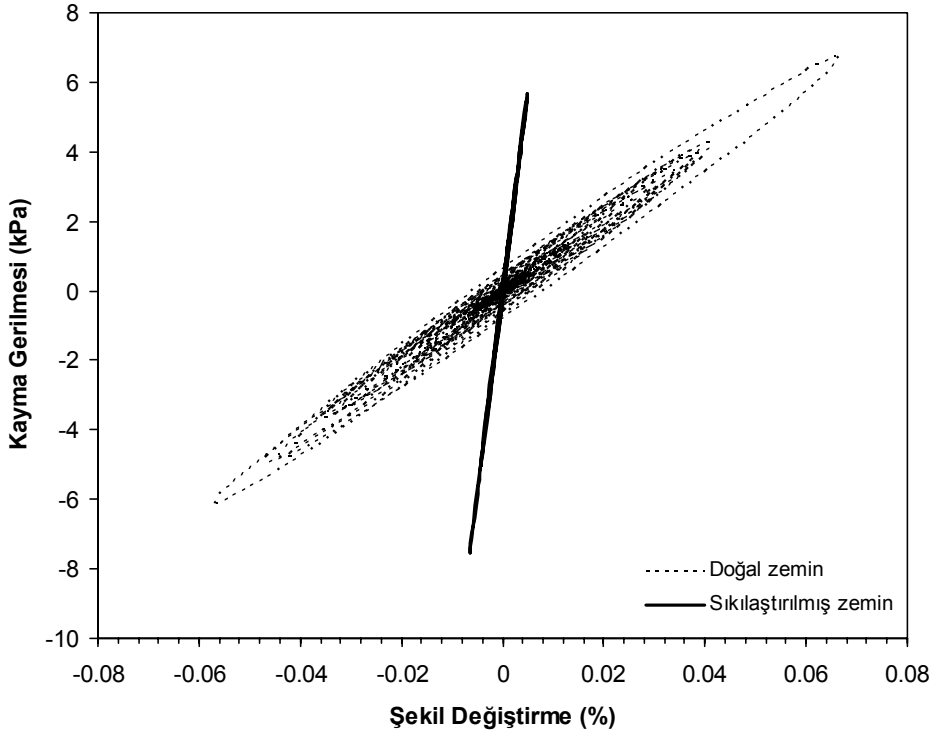
(c)

Şekil 5.40 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için şekil değiştirme – zaman ve kayma gerilmesi – şekil değiştirme grafikleri profil C için Şekil 5.41 ve 5.42'de, profil A için Ek A Şekil 27 ve 28'de ve profil B için Ek B Şekil 27 ve 28'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.41'in incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Sıkılaştırma sonucunda zemin daneleri arasındaki boşluk hacmi azaldığından, şiddetli yer hareketi sırasında ortaya çıkacak şekil değiştirmeler sınırlı olacaktır, bu da sıvılaşma riskinin azalması anlamına gelmektedir. Şekil değiştirme yüzdesinin sıkılaştırma sonucunda önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır. Şekil 5.42'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda gerilme - şekil değiştirme oranının azaldığı ve histerisis eğrisinin eğiminin arttığı görülmektedir. Eğimin artmasının nedeni sıkılaştırma sonucunda kayma modülünün artmasıdır, çünkü histerisis eğrisinin eğimi kayma modülünü vermektedir.



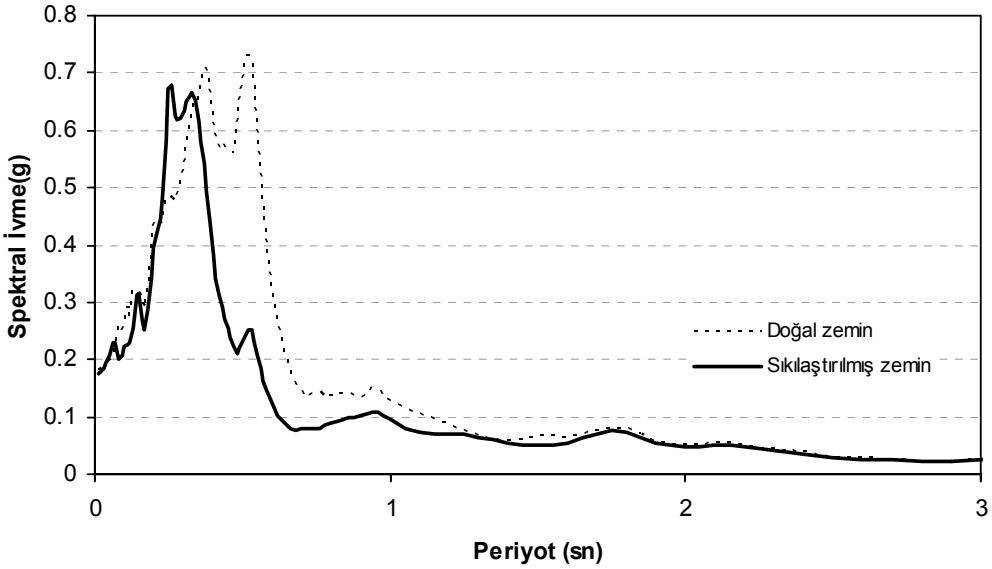
Şekil 5.41 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



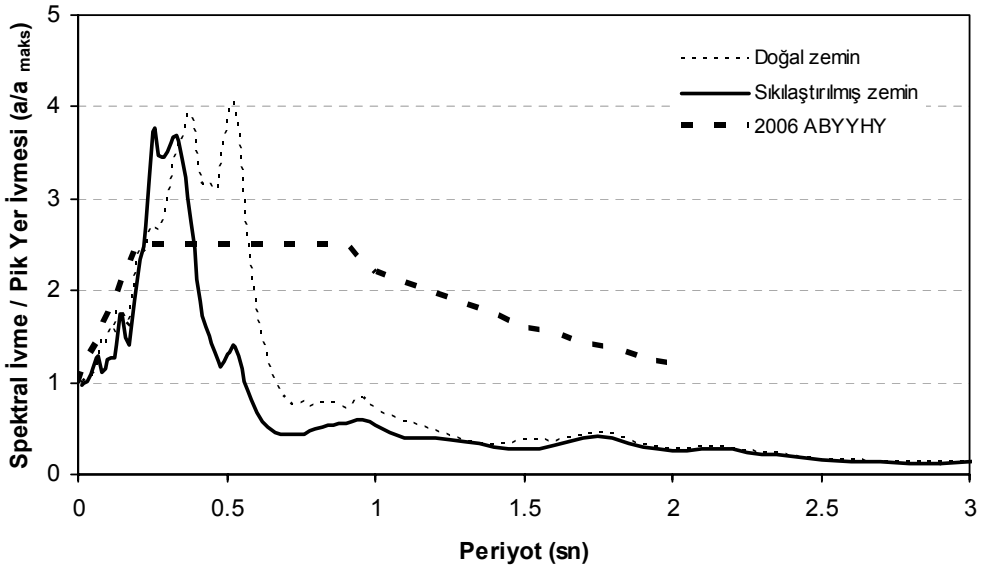
Şekil 5.42 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için % 5 sönüm oranında spektral ivmelerin periyot ile değişimi profil C için Şekil 5.43'deki gibi aynı grafik üzerinde çizilmiştir. Spektral ivmelerin pik yer ivmesine oranlanması ile tepki spektrumları elde edilmiş ve Şekil 5.44'deki gibi 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.43'ün incelenmesinden, sıkılaştırma sonucunda pik spektral ivmenin ve periyodunun sola kayarak azaldığı görülmektedir. Şekil 5.44'ün incelenmesinden tepki spektrumlarının da aynı şekilde değiştiği ve 2006 ABYYHY'de öngörülen tasarım spektrumunu karakteristik periyotlar 0.2-0.9 aralığında aştığı gözlenmektedir. Sıkılaştırma sonucunda kayma dalgası hızı ve kayma modülünün artmasına bağlı olarak zeminin rijitliği artacağından, ivmelerin büyümesi, buna karşın zemin periyodunun ve yer değiştirme genliklerinin ise azalması beklenen sonuçtur. Burada beklenenin aksine ivmelerin azalması olası bir depremde yapılarda oluşacak hasarı ve sıvılaşma riskini azaltacak, beklendiği gibi periyodun azalması da yine hasarın minimum düzeyde kalmasını

sağlayacaktır. Profil A ve B için çizilen spektral ivme ve tepki spektrumu grafikleri Ek A Şekil 29 ve 30, Ek B Şekil 29 ve 30'da gösterilmektedir.



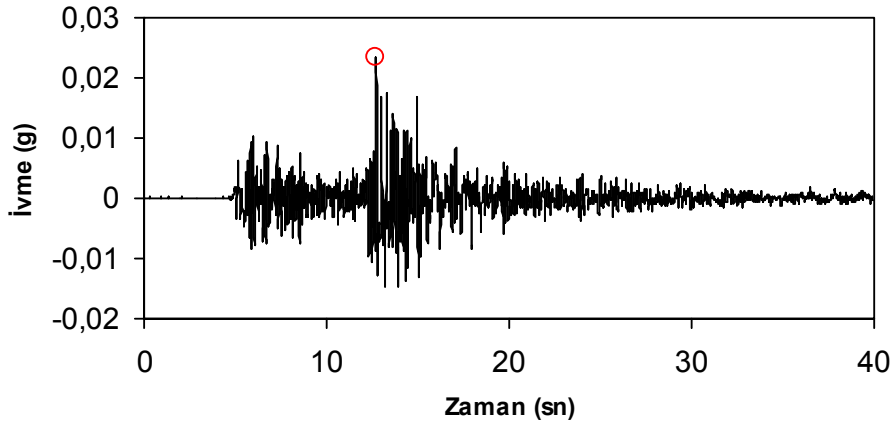
Şekil 5.43 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 5.44 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

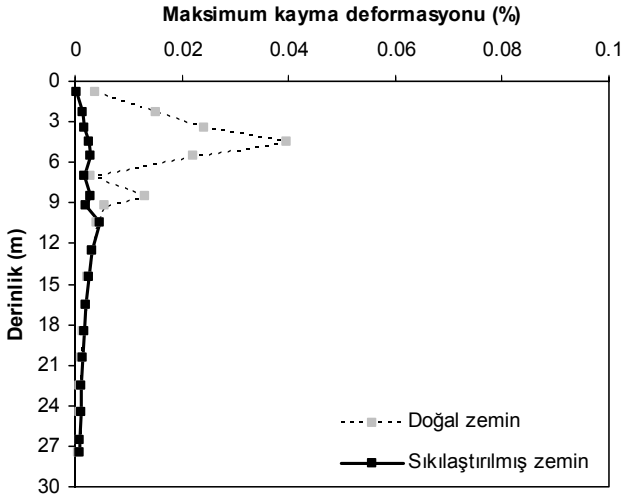
5.4.4.2 Darıca Arçelik Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

Depremin merkez üssüne 65.5 km mesafede bulunan bu istasyonda 13 Eylül 1999'da 43 saniye boyunca kayıt tutulmuş, kuzey-güney doğrultusunda pik ivme 0.026 g, doğu-batı doğrultusunda pik ivme 0.023 g olarak kaydedilmiştir. Programda kuzey-güney doğrultusunda oluşan maksimum ivme, girdi ivmesi olarak kullanılmış ve bu değerlere göre Şekil 5.45'de görüldüğü gibi depremin ivme – zaman grafiği çizilmiştir.

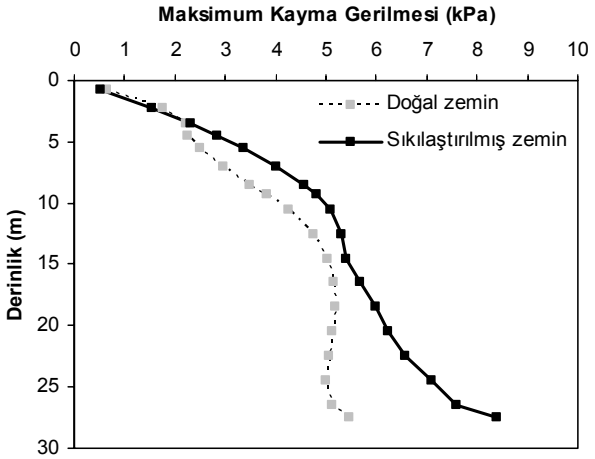


Şekil 5.45 Darıca Arçelik İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği

Zemin profili A, B ve C'nin doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için karakteristik özellikleri tanımlanarak doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için maksimum kayma deformasyonu – derinlik ve maksimum kayma gerilmesi – derinlik grafikleri profil C için Şekil 5.46'da, profil A için Ek A Şekil 31'de ve profil B için Ek B Şekil 31'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.46a'nın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma deformasyonunun azaldığı görülmektedir. Deformasyonun azalması sıvılaşmayı önleme doğrultusunda zemin iyileştirmesinin temel amacı ve beklenen sonucudur. Şekil 5.46b'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma gerilmesinin arttığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin artması şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı artışını sınırlandıracağından, sıvılaşma riski azalacaktır.



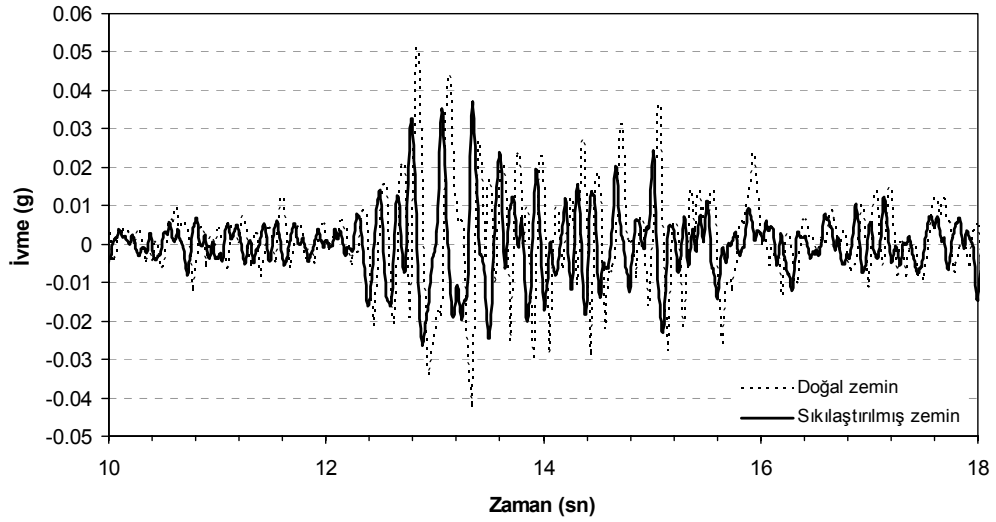
(a)



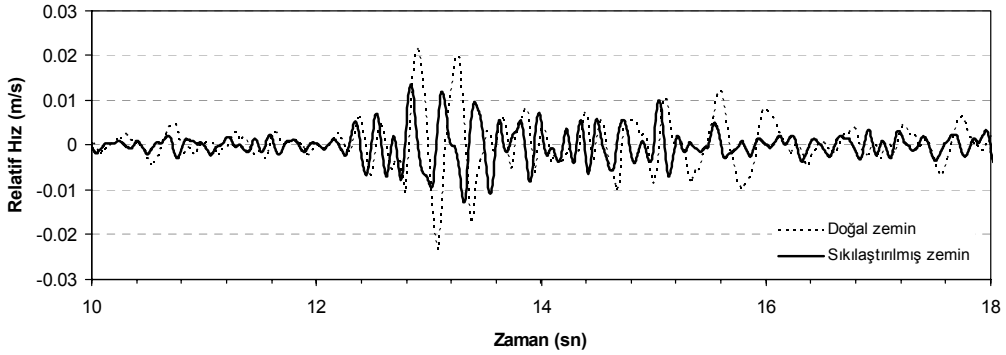
(b)

Şekil 5.46 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi

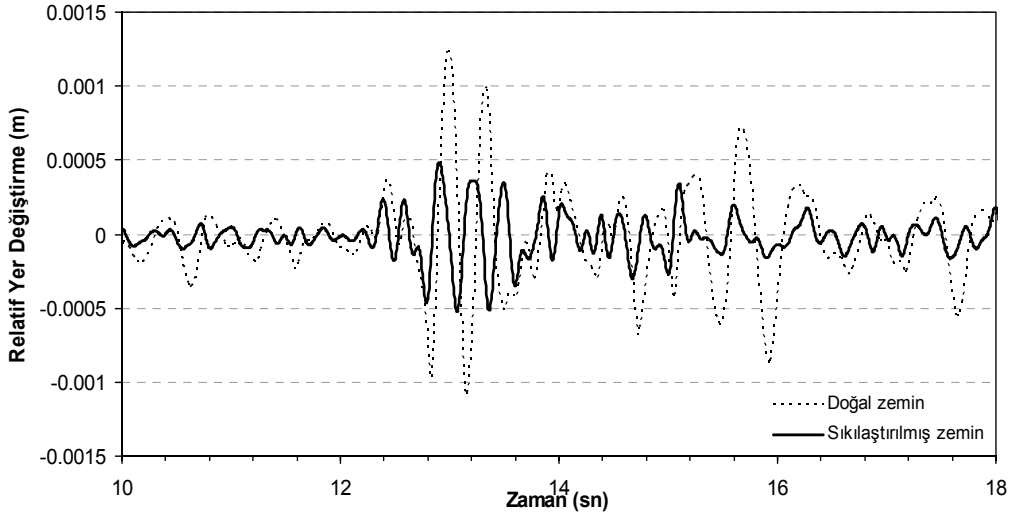
Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için ivme – zaman, relatif hız – zaman ve relatif yerdeğiştirme – zaman grafikleri profil C için Şekil 5.47'de, profil A için Ek A Şekil 32'de ve profil B için Ek B Şekil 32'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.47'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik ivmenin, pik relatif hızın, pik relatif yer değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Şiddetli yer hareketi sırasında kaydedilen ivme, relatif hız ve relatif yer değiştirme sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmalar olup, bunların her üç profilde de sıkılaştırma sonrasında önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır.



(a)



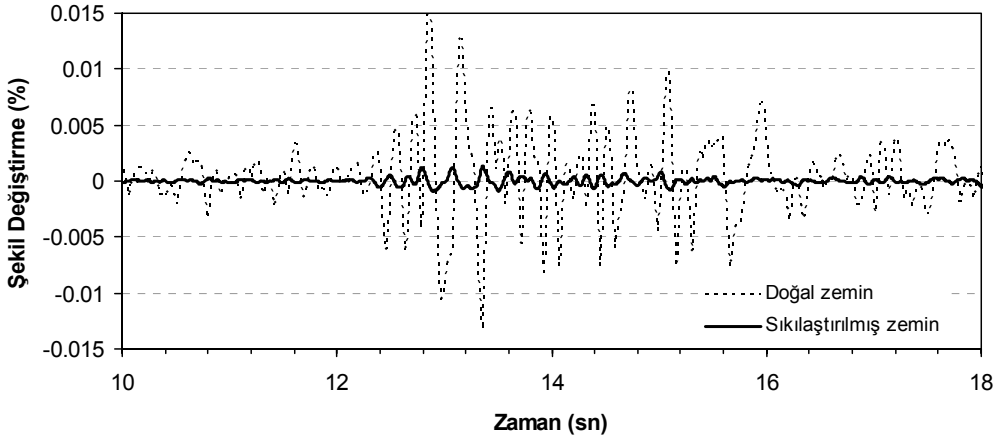
(b)



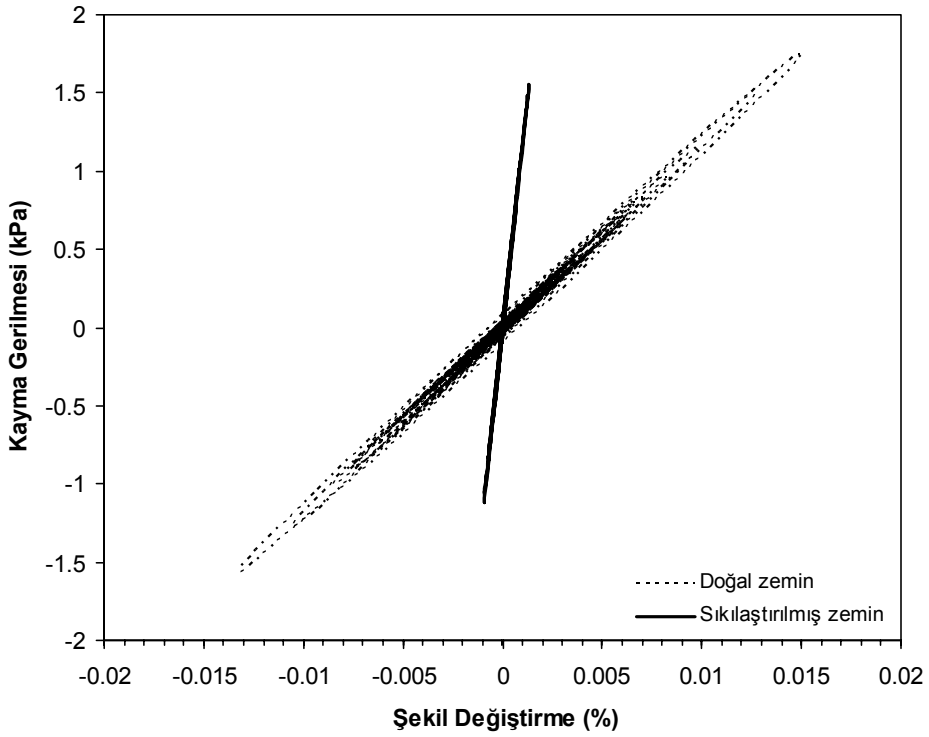
(c)

Şekil 5.47 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için şekil değiştirme – zaman ve kayma gerilmesi – şekil değiştirme grafikleri profil C için Şekil 5.48 ve 5.49'da, profil A için Ek A Şekil 33 ve 34'de ve profil B için Ek B Şekil 33 ve 34'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.48'in incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Sıkılaştırma sonucunda zemin daneleri arasındaki boşluk hacmi azaldığından, şiddetli yer hareketi sırasında ortaya çıkacak şekil değiştirmeler sınırlı olacaktır, bu da sıvılaşma riskinin azalması anlamına gelmektedir. Şekil değiştirme yüzdesinin sıkılaştırma sonucunda önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır. Şekil 5.49'un incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda gerilme - şekil değiştirme oranının azaldığı ve histerisis eğrisinin eğiminin arttığı görülmektedir. Eğimin artmasının nedeni sıkılaştırma sonucunda kayma modülünün artmasıdır, çünkü histerisis eğrisinin eğimi kayma modülünü vermektedir.



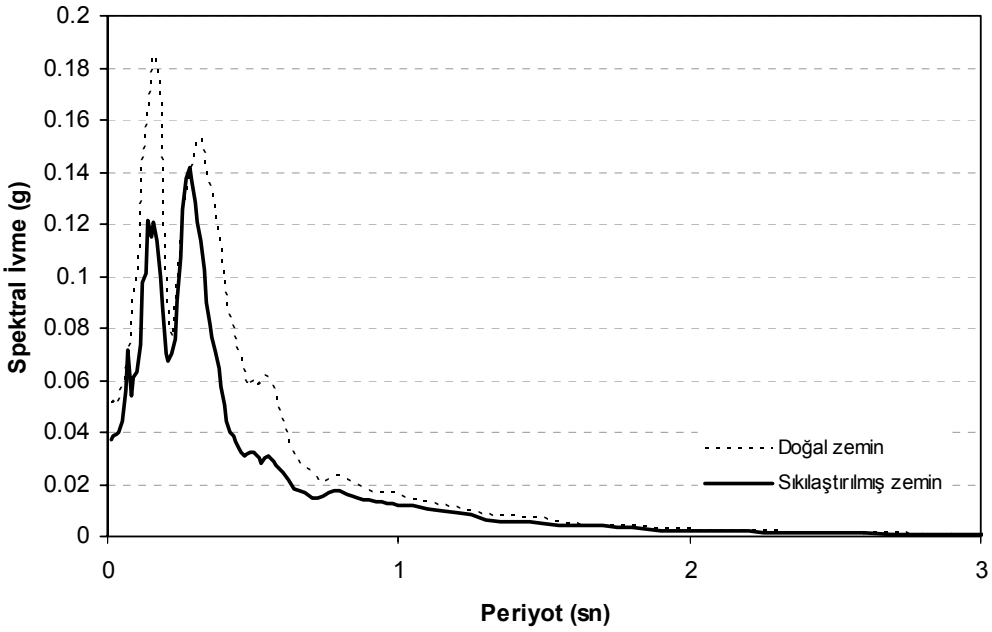
Şekil 5.48 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



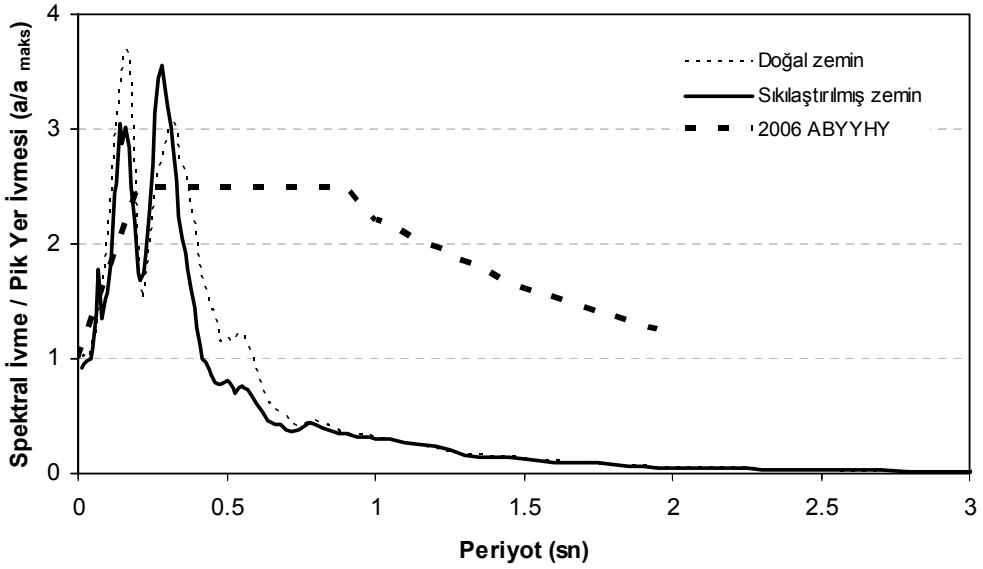
Şekil 5.49 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için % 5 sönüm oranında spektral ivmelerin periyot ile değişimi profil C için Şekil 5.50'deki gibi aynı grafik üzerinde çizilmiştir. Spektral ivmelerin pik yer ivmesine oranlanması ile tepki spektrumları elde edilmiş ve Şekil 5.51'deki gibi 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.50'nin incelenmesinden, sıkılaştırma sonucunda pik spektral ivmenin ve periyodunun sola kayarak azaldığı görülmektedir. Şekil 5.51'in incelenmesinden tepki spektrumlarının da aynı şekilde değiştiği ve 2006 ABYYHY'de öngörülen tasarım spektrumunu karakteristik periyotlar 0.2-0.9 aralığında aştığı gözlenmektedir. Sıkılaştırma sonucunda kayma dalgası hızı ve kayma modülünün artmasına bağlı olarak zeminin rijitliği artacağından, ivmelerin büyümesi, buna karşın zemin periyodunun ve yer değiştirme genliklerinin ise azalması beklenen sonuçtur. Burada beklenenin aksine ivmelerin azalması olası bir depremde yapılarda oluşacak hasarı ve sıvılaşma riskini azaltacak, beklendiği gibi periyodun azalması da yine hasarın minimum düzeyde kalmasını

sağlayacaktır. Profil A ve B için çizilen spektral ivme ve tepki spektrumu grafikleri Ek A Şekil 35 ve 36, Ek B Şekil 35 ve 36'da gösterilmektedir.



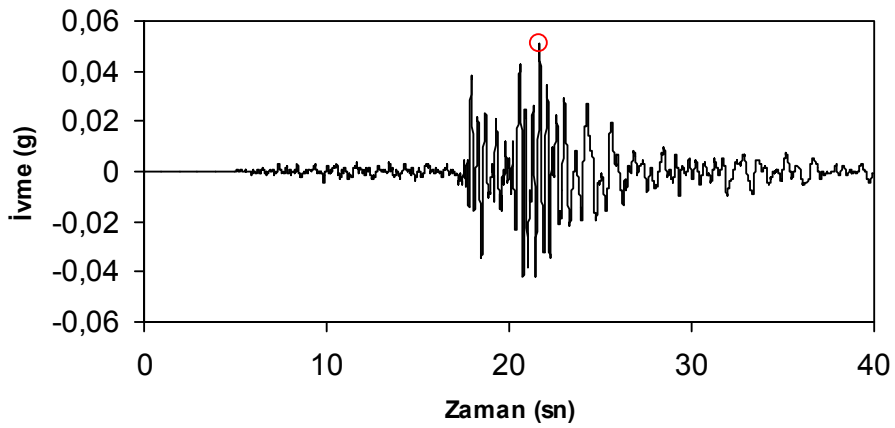
Şekil 5.50 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 5.51 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

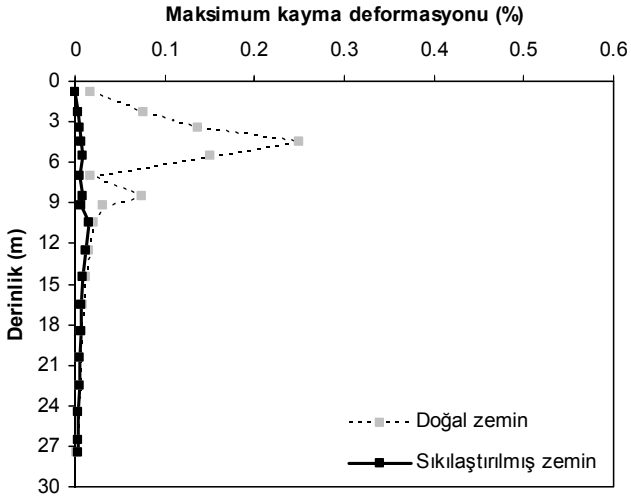
5.4.4.3 Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

Depremin merkez üssüne 105.8 km mesafede bulunan bu istasyonda 13 Eylül 1999'da 65 saniye boyunca kayıt tutulmuş, kuzey-güney doğrultusunda pik ivme 0.051 g, doğu-batı doğrultusunda pik ivme 0.042 g olarak kaydedilmiştir. Programda kuzey-güney doğrultusunda oluşan maksimum ivme, girdi ivmesi olarak kullanılmış ve bu değerlere göre Şekil 5.52'de görüldüğü gibi depremin ivme – zaman grafiği çizilmiştir.

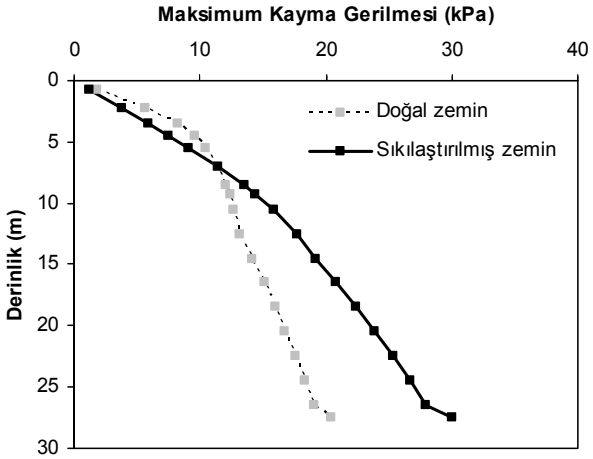


Şekil 5.52 Bursa Tofaş Fabrikası İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği

Zemin profili A, B ve C'nin doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için karakteristik özellikleri tanımlanarak doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için maksimum kayma deformasyonu – derinlik ve maksimum kayma gerilmesi – derinlik grafikleri profil C için Şekil 5.53'de, profil A için Ek A Şekil 37'de ve profil B için Ek B Şekil 37'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.53a'nın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma deformasyonunun azaldığı görülmektedir. Deformasyonun azalması sıvılaşmayı önleme doğrultusunda zemin iyileştirmesinin temel amacı ve beklenen sonucudur. Şekil 5.53b'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma gerilmesinin arttığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin artması şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı artışını sınırlandıracağından, sıvılaşma riski azalacaktır.



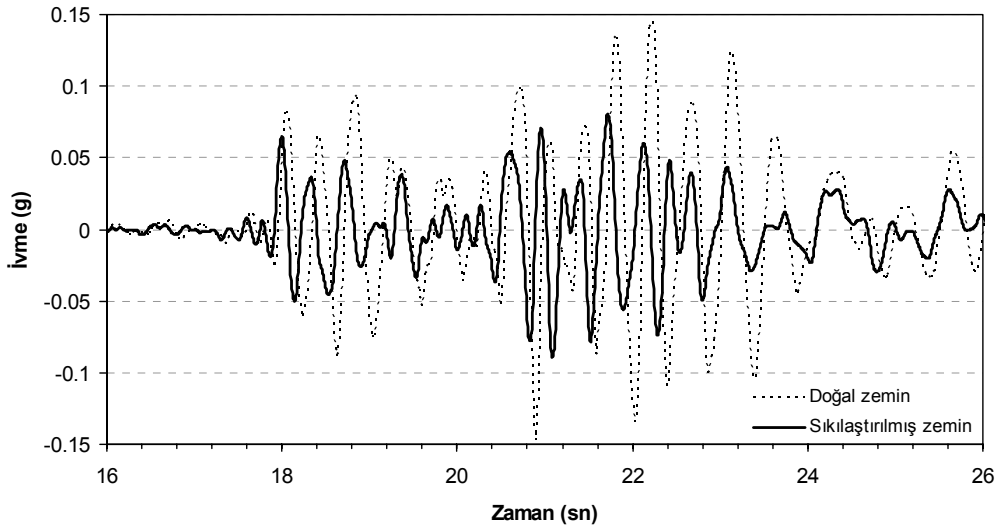
(a)



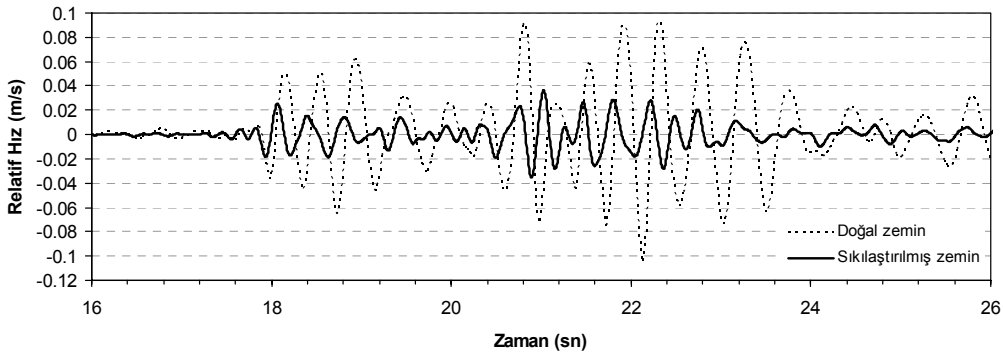
(b)

Şekil 5.53 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi

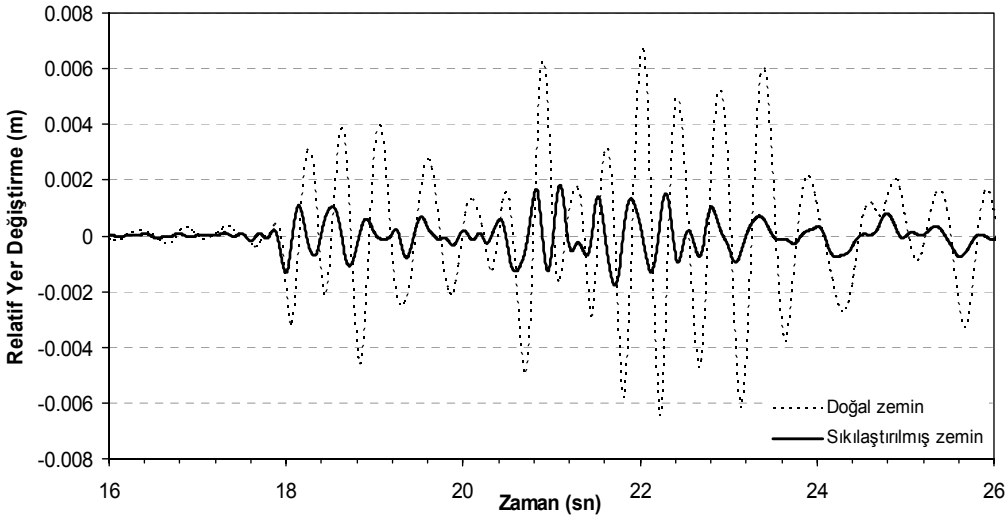
Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için ivme – zaman, relatif hız – zaman ve relatif yerdeğiştirme – zaman grafikleri profil C için Şekil 5.54'de, profil A için Ek A Şekil 38'de ve profil B için Ek B Şekil 38'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.54'ün incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik ivmenin, pik relatif hızın, pik relatif yer değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Şiddetli yer hareketi sırasında kaydedilen ivme, relatif hız ve relatif yer değiştirme sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmalar olup, bunların her üç profilde de sıkılaştırma sonrasında önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır.



(a)



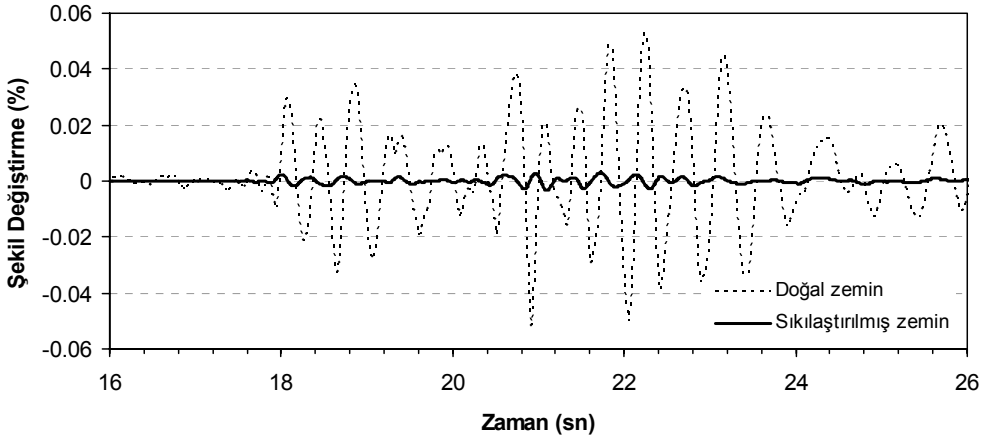
(b)



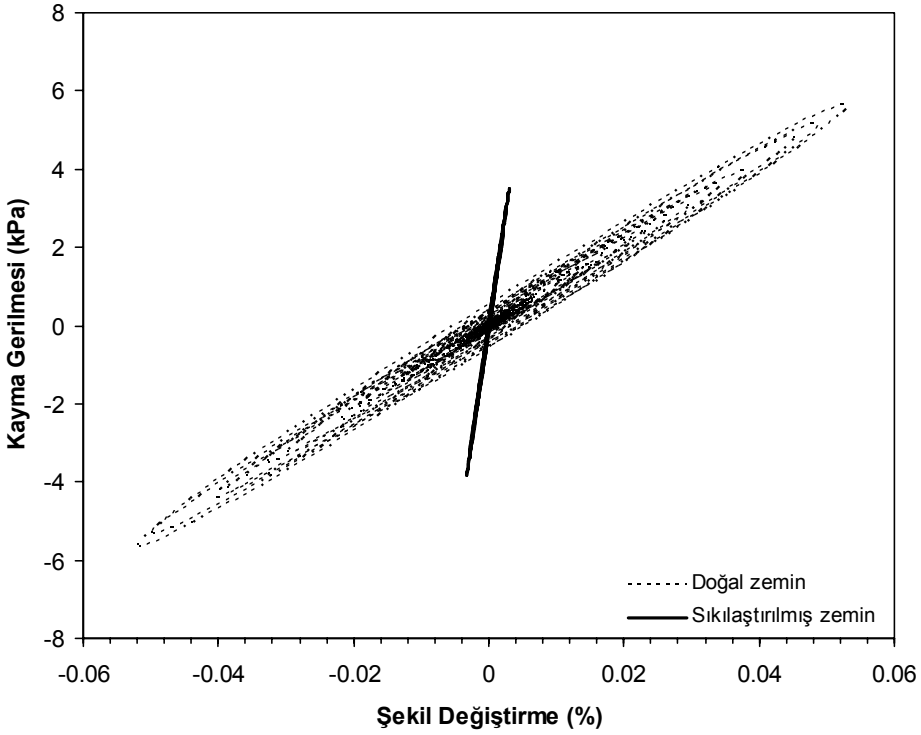
(c)

Şekil 5.54 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için şekil değiştirme – zaman ve kayma gerilmesi – şekil değiştirme grafikleri profil C için Şekil 5.55 ve 5.56'da, profil A için Ek A Şekil 39 ve 40'da ve profil B için Ek B Şekil 39 ve 40'da gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.55'in incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Sıkılaştırma sonucunda zemin daneleri arasındaki boşluk hacmi azaldığından, şiddetli yer hareketi sırasında ortaya çıkacak şekil değiştirmeler sınırlı olacaktır, bu da sıvılaşma riskinin azalması anlamına gelmektedir. Şekil değiştirme yüzdesinin sıkılaştırma sonucunda önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır. Şekil 5.56'nın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda gerilme - şekil değiştirme oranının azaldığı ve histerisis eğrisinin eğiminin arttığı görülmektedir. Eğimin artmasının nedeni sıkılaştırma sonucunda kayma modülünün artmasıdır, çünkü histerisis eğrisinin eğimi kayma modülünü vermektedir.



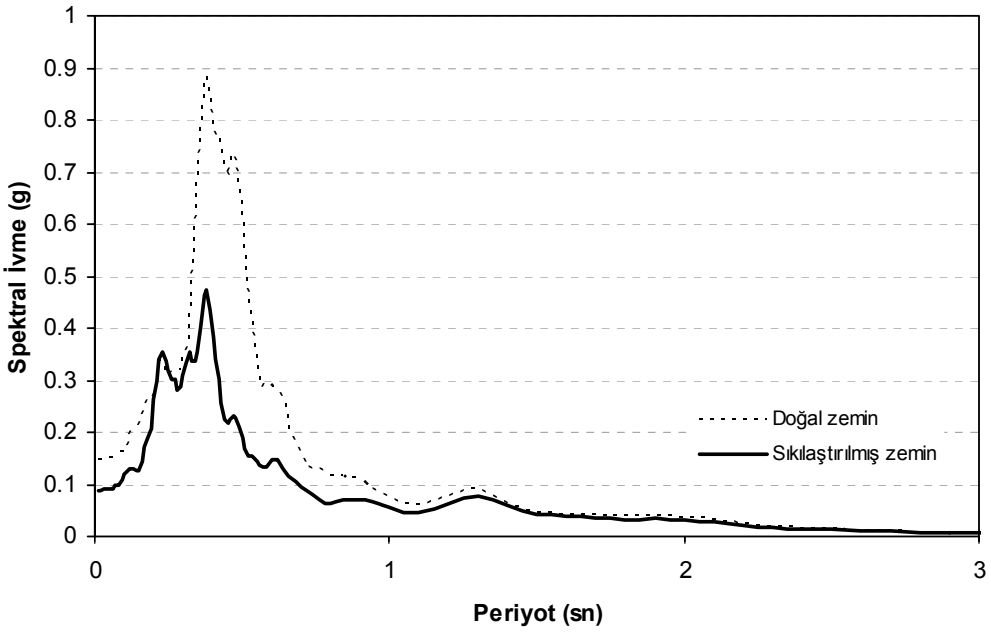
Şekil 5.55 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



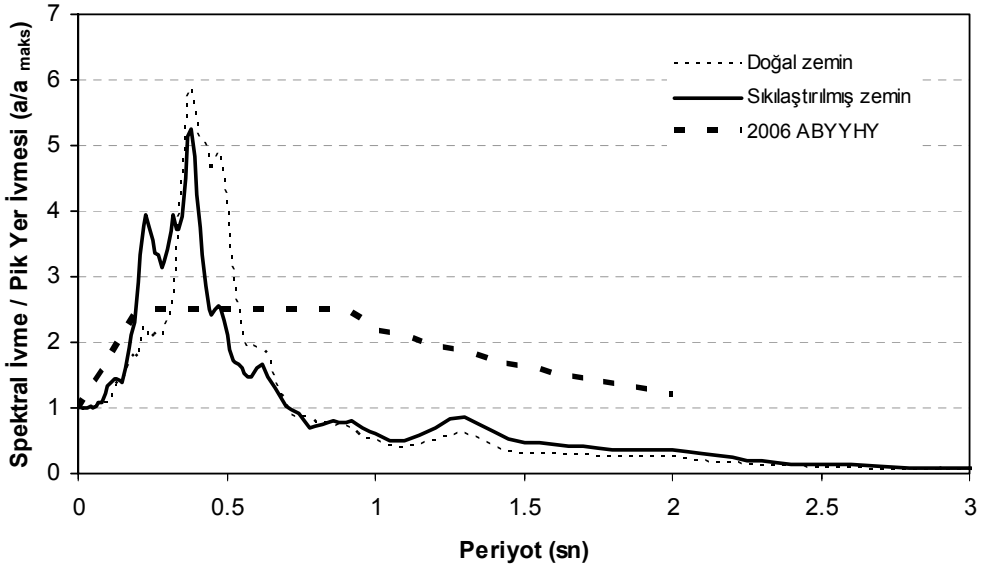
Şekil 5.56 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için % 5 sönüm oranında spektral ivmelerin periyot ile değişimi profil C için Şekil 5.57'deki gibi aynı grafik üzerinde çizilmiştir. Spektral ivmelerin pik yer ivmesine oranlanması ile tepki spektrumları elde edilmiş ve Şekil 5.58'deki gibi 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.57'nin incelenmesinden, sıkılaştırma sonucunda pik spektral ivmenin ve periyodunun sola kayarak azaldığı görülmektedir. Şekil 5.58'in incelenmesinden tepki spektrumlarının da aynı şekilde değiştiği ve 2006 ABYYHY'de öngörülen tasarım spektrumunu karakteristik periyotlar 0.2-0.9 aralığında aştığı gözlenmektedir. Sıkılaştırma sonucunda kayma dalgası hızı ve kayma modülünün artmasına bağlı olarak zeminin rijitliği artacağından, ivmelerin büyümesi, buna karşın zemin periyodunun ve yer değiştirme genliklerinin ise azalması beklenen sonuçtur. Burada beklenenin aksine ivmelerin azalması olası bir depremde yapılarda oluşacak hasarı ve sıvılaşma riskini azaltacak, beklendiği gibi periyodun azalması da yine hasarın minimum düzeyde kalmasını

sağlayacaktır. Profil A ve B için çizilen spektral ivme ve tepki spektrumu grafikleri Ek A Şekil 41 ve 42, Ek B Şekil 41 ve 42'de gösterilmektedir.



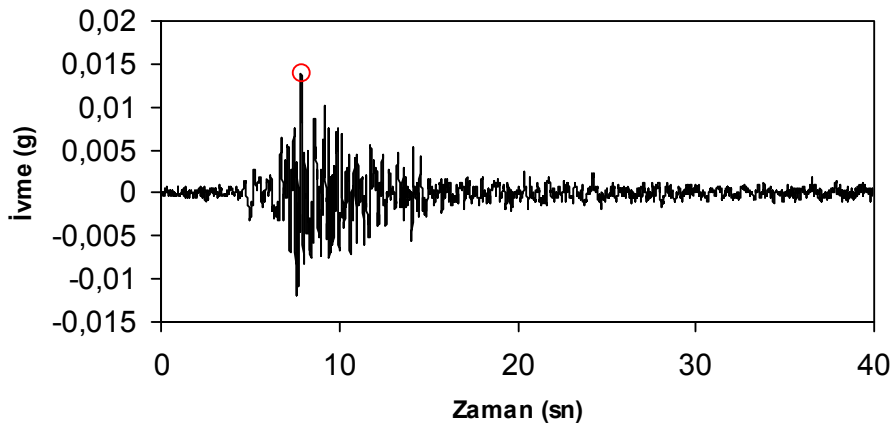
Şekil 5.57 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 5.58 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

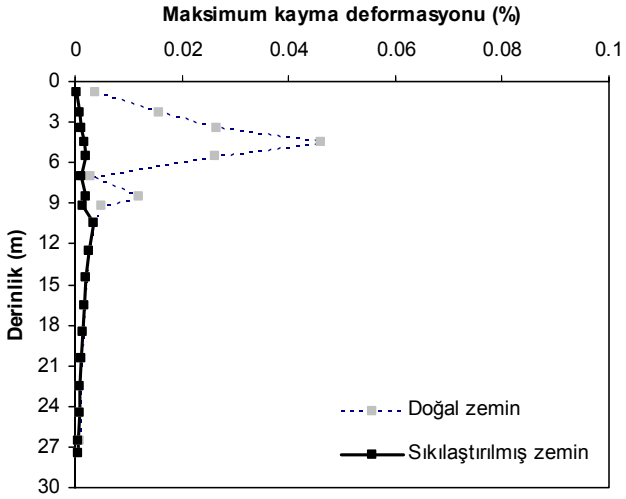
5.4.4.4 Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

Depremin merkez üssüne 181.1 km mesafede bulunan bu istasyonda 13 Eylül 1999'da 34 saniye boyunca kayıt tutulmuş, kuzey-güney doğrultusunda pik ivme 0.011 g, doğu-batı doğrultusunda pik ivme 0.013 g olarak kaydedilmiştir. Programda doğu-batı doğrultusunda oluşan maksimum ivme, girdi ivmesi olarak kullanılmış ve bu değerlere göre Şekil 5.59'da görüldüğü gibi depremin ivme – zaman grafiği çizilmiştir.

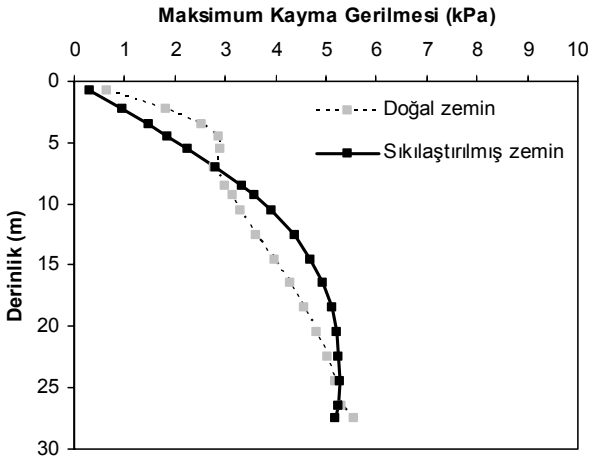


Şekil 5.59 Marmara Ereğlisi Botaş İstasyonu'ndan elde edilen ivme - zaman grafiği

Zemin profili A, B ve C'nin doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için karakteristik özellikleri tanımlanarak doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için maksimum kayma deformasyonu – derinlik ve maksimum kayma gerilmesi – derinlik grafikleri profil C için Şekil 5.60'da, profil A için Ek A Şekil 43'de ve profil B için Ek B Şekil 43'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.60a'nın incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma deformasyonunun azaldığı görülmektedir. Deformasyonun azalması sıvılaşmayı önleme doğrultusunda zemin iyileştirmesinin temel amacı ve beklenen sonucudur. Şekil 5.60b'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda maksimum kayma gerilmesinin arttığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin artması şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı artışını sınırlandıracağından, sıvılaşma riski azalacaktır.



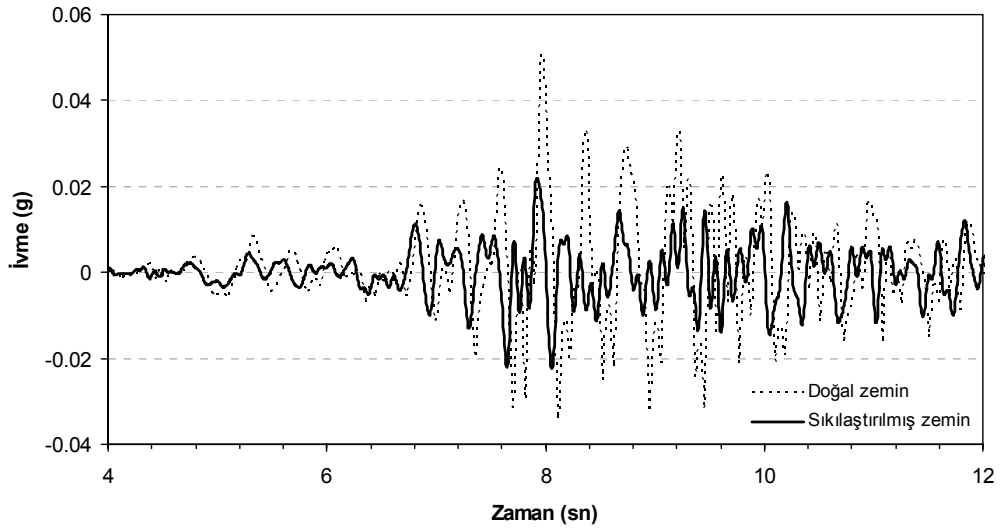
(a)



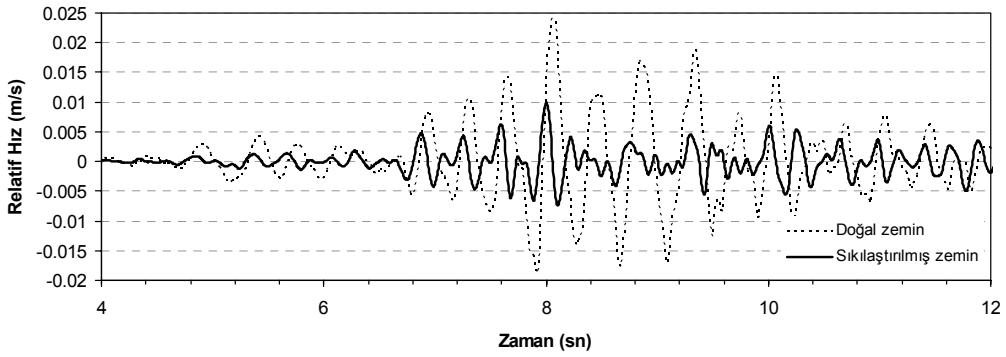
(b)

Şekil 5.60 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi

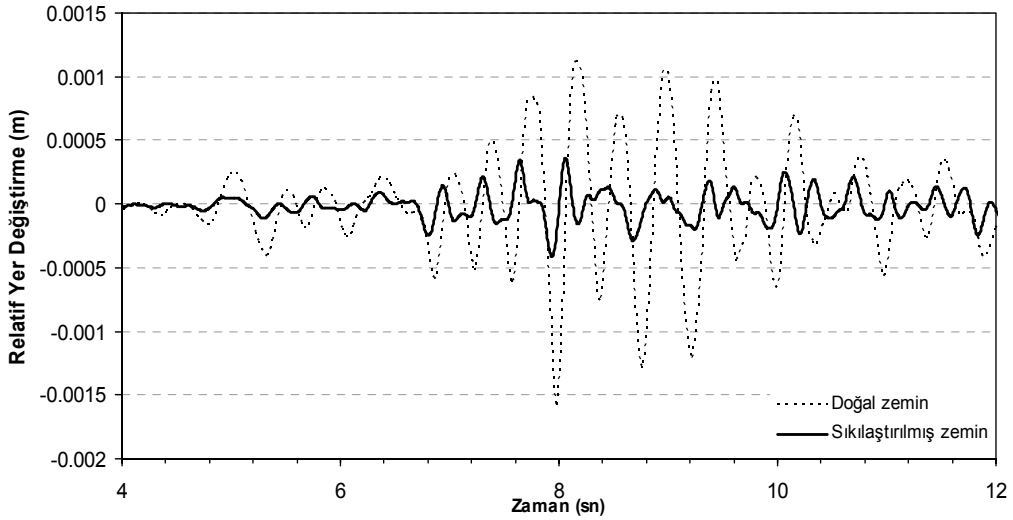
Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için ivme – zaman, relatif hız – zaman ve relatif yerdeğiştirme – zaman grafikleri profil C için Şekil 5.61'de, profil A için Ek A Şekil 44'de ve profil B için Ek B Şekil 44'de gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.61'in incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik ivmenin, pik relatif hızın, pik relatif yer değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Şiddetli yer hareketi sırasında kaydedilen ivme, relatif hız ve relatif yer değiştirme sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmalar olup, bunların her üç profilde de sıkılaştırma sonrasında önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır.



(a)



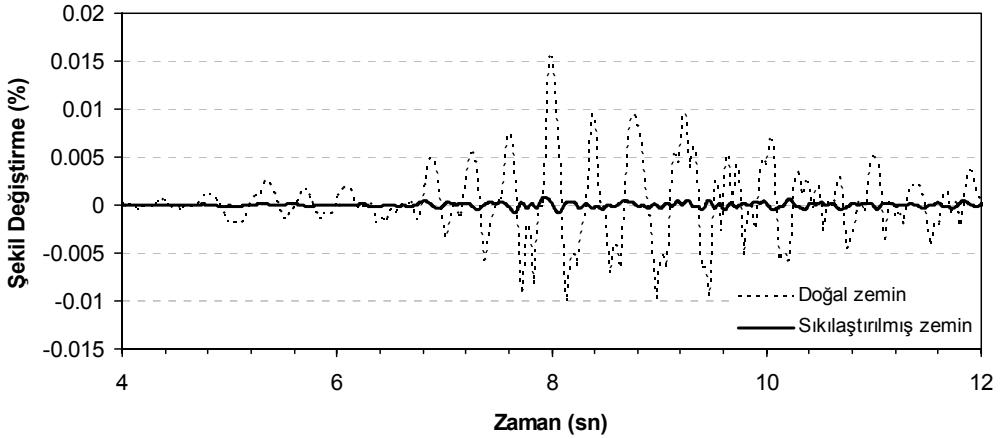
(b)



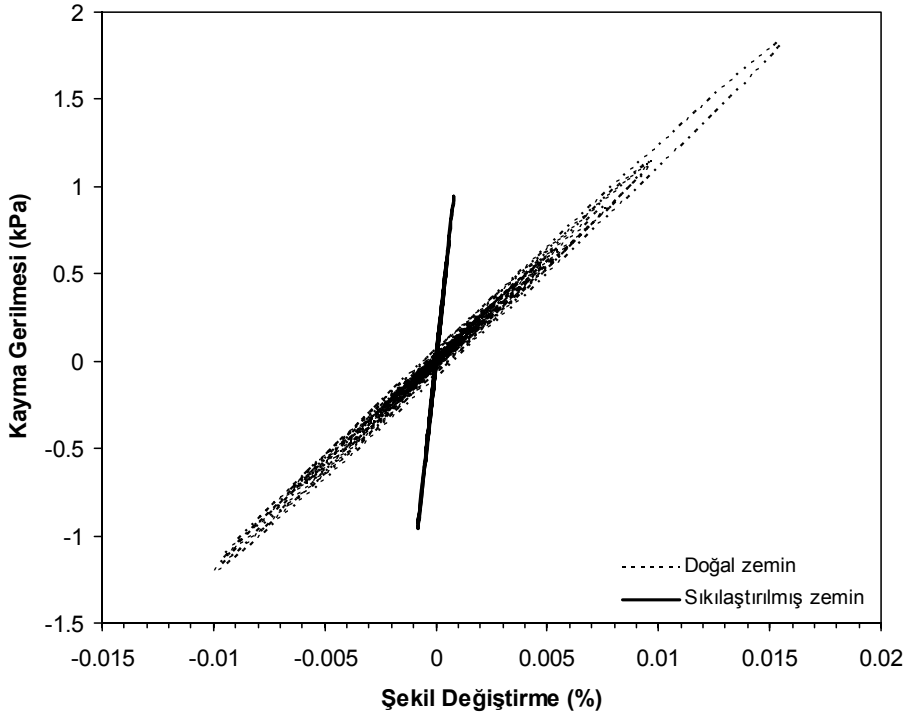
(c)

Şekil 5.61 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için şekil değiştirme – zaman ve kayma gerilmesi – şekil değiştirme grafikleri profil C için Şekil 5.62 ve 5.63'de, profil A için Ek A Şekil 45 ve 46'da ve profil B için Ek B Şekil 45 ve 46'da gösterildiği gibi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Şekil 5.62'nin incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda pik şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Sıkılaştırma sonucunda zemin daneleri arasındaki boşluk hacmi azaldığından, şiddetli yer hareketi sırasında ortaya çıkacak şekil değiştirmeler sınırlı olacaktır, bu da sıvılaşma riskinin azalması anlamına gelmektedir. Şekil değiştirme yüzdesinin sıkılaştırma sonucunda önemli ölçüde azalması, yapılan zemin iyileştirmesinin sıvılaşmayı önleme doğrultusunda başarısını ortaya koymaktadır. Şekil 5.63'ün incelenmesinden sıkılaştırma sonucunda gerilme - şekil değiştirme oranının azaldığı ve histerisis eğrisinin eğiminin arttığı görülmektedir. Eğimin artmasının nedeni sıkılaştırma sonucunda kayma modülünün artmasıdır, çünkü histerisis eğrisinin eğimi kayma modülünü vermektedir.



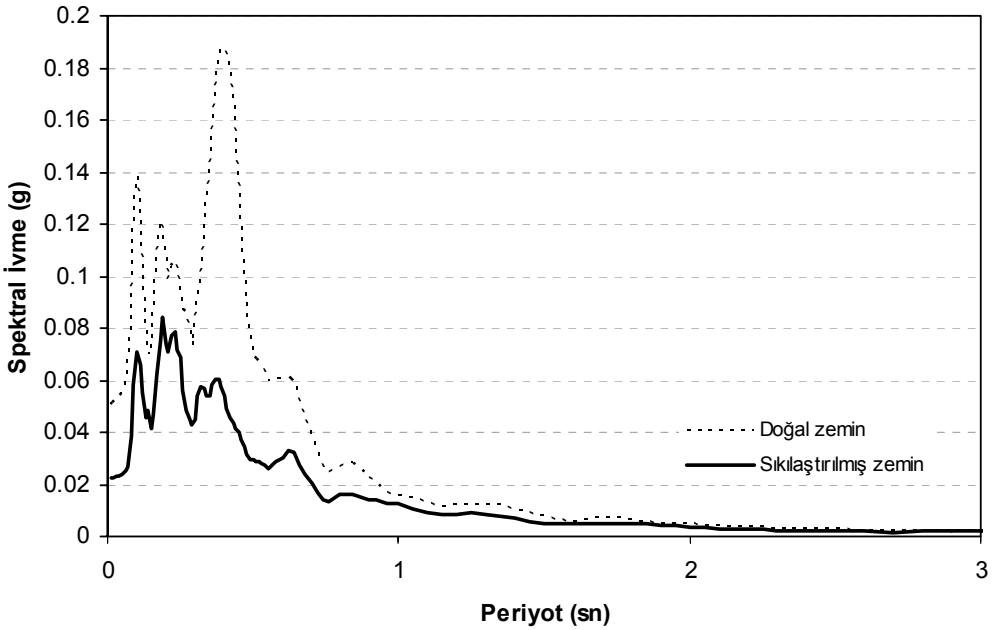
Şekil 5.62 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



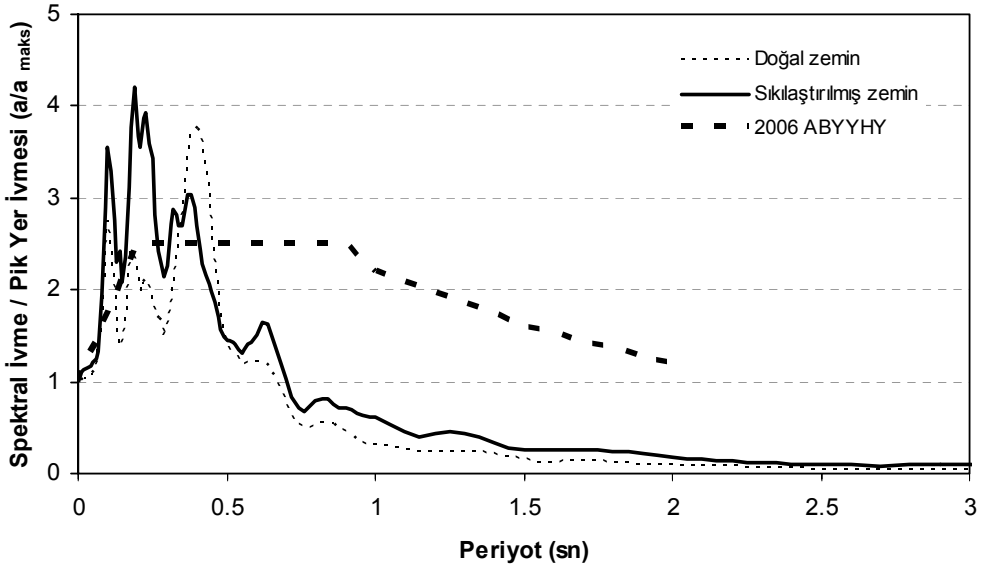
Şekil 5.63 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilen zemin koşulları için % 5 sönüm oranında spektral ivmelerin periyot ile değişimi profil C için Şekil 5.64'deki gibi aynı grafik üzerinde çizilmiştir. Spektral ivmelerin pik yer ivmesine oranlanması ile tepki spektrumları elde edilmiş ve Şekil 5.65'deki gibi 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.64'ün incelenmesinden, sıkılaştırma sonucunda pik spektral ivmenin ve periyodunun sola kayarak azaldığı görülmektedir. Şekil 5.65'in incelenmesinden tepki spektrumlarının da aynı şekilde değiştiği ve 2006 ABYYHY'de öngörülen tasarım spektrumunu karakteristik periyotlar 0.2-0.9 aralığında aştığı gözlenmektedir. Sıkılaştırma sonucunda kayma dalgası hızı ve kayma modülünün artmasına bağlı olarak zeminin rijitliği artacağından, ivmelerin büyümesi, buna karşın zemin periyodunun ve yer değiştirme genliklerinin ise azalması beklenen sonuçtur. Burada beklenenin aksine ivmelerin azalması olası bir depremde yapılarda oluşacak hasarı ve sıvılaşma riskini azaltacak, beklendiği gibi periyodun azalması da yine hasarın minimum düzeyde kalmasını

sağlayacaktır. Profil A ve B için çizilen spektral ivme ve tepki spektrumu grafikleri Ek A Şekil 47 ve 48, Ek B Şekil 47 ve 48'de gösterilmektedir.



Şekil 5.64 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 5.65 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

6. SONUÇLAR

Sıvılaşmanın geçmiş depremlerde sıkça rastlanılan bir olgu olarak insan hayatına ve ekonomiye olan olumsuz etkilerinden dolayı, bu konuda yapılan araştırmalar günden güne artmakta ve gittikçe önem kazanmaktadır. Aktif deprem kuşağı içerisinde bulunan yurdumuzda da sıvılaşma olayı özellikle 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nden sonra olayın yıkıcı etkilerinin Kocaeli – Adapazarı bölgesinde gözlenmesi ile birlikte büyük önem kazanmış ve bu konuda yapılacak yeni çalışmaların gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu konuda bir örnek teşkil edeceği düşünülen bu çalışmada, sıvılaşma mekanizması literatürde kabul görmüş tanımlamalar ile açıklanmış, sıvılaşmayı önlemede yaygın olarak kullanılan sıkılaştırma teknikleri arazi uygulamalarından örnekler verilerek karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın asıl hedefi sıkılaştırmanın sıvılaşmayı önleme doğrultusunda etkinliğini, başka bir deyişle başarı derecesini belirlemektir. Bu amaçla Adapazarı'na ait sıvılaşma potansiyeli yüksek üç farklı zemin profilinde, sıvılaşmaya sebep olan 7.4 büyüklüğündeki 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi ve 5.8 büyüklüğündeki 13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin "Eşdeğer-lineer Deprem Tepki Analizi (EERA)" programı ile analizi yapılmıştır. Analizler çerçevesinde tanımlanan şiddetli yer ivmeleri depremin merkez üssüne farklı mesafelerde bulunan dört deprem istasyonunun bu depremler esnasında tuttuğu kayıtlardan alınmıştır. Seçilen zemin profillerinin birinci aşamada sıkılaştırma öncesi doğal koşullar için analizleri yapıldıktan sonra, ikinci aşamada sıkılaştırma ile iyileştirildikleri varsayılarak 4. Bölüm'de vaka analizlerinde görüldüğü gibi SPT-N değerleri belli mertebede arttırılmış, buna göre profiller tanımlanarak sıkılaştırma sonrası için analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, şiddetli yer hareketi sırasında ortaya çıkan ve sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmalar olan ivmenin, relatif hızın, relatif yer değiştirmenin, kayma deformasyonun, kayma gerilmesinin, şekil

değiştirmenin ve spektral ivmenin sıkılaştırma öncesinde ve sonrasında değişimi simüle edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özet halinde Tablo 6.1 ve 6.2'de sunulmaktadır. Bu tablolarda (+) işareti sıkılaştırma sonrasında kayma gerilmesinin, kayma deformasyonunun ve sıvılaşma riskinin artması durumunu, (-) işareti sıkılaştırma sonrasında kayma gerilmesinin, kayma deformasyonunun ve sıvılaşma riskinin azalması durumunu göstermek için kullanılmıştır.

Tablo 6.1 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin analizinin sonuçları

	Zemin Profili A			
	Sıkılaştırma öncesi	Sıkılaştırma sonrası	% Değişim	Sıvılaşma riski
Yarımca Petkim Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.340	0.350	-3	+
pik relatif hız (m/s)	0.630	0.350	44	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.157	0.041	74	-
pik şekil değiştirme (%)	0.290	0.020	93	-
pik spektral ivme (g)	1.690	1.350	20	-
Darıca Arçelik Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.140	0.180	-29	+
pik relatif hız (m/s)	0.210	0.130	38	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.023	0.010	57	-
pik şekil değiştirme (%)	0.056	0.007	88	-
pik spektral ivme (g)	0.510	0.550	-8	+
Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.180	0.150	17	-
pik relatif hız (m/s)	0.250	0.130	48	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.038	0.013	66	-
pik şekil değiştirme (%)	0.080	0.007	91	-
pik spektral ivme (g)	0.580	0.810	-40	+
Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.120	0.140	-17	+
pik relatif hız (m/s)	0.120	0.110	8	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.018	0.009	50	-
pik şekil değiştirme (%)	0.044	0.006	86	-
pik spektral ivme (g)	0.410	0.580	-41	+

	Zemin Profili B			
	Sıkılaştırma öncesi	Sıkılaştırma sonrası	% Değişim	Sıvılaşma riski
Yarımca Petkim Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.370	0.430	-16	+
pik relatif hız (m/s)	0.330	0.120	64	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.043	0.013	70	-
pik şekil değiştirme (%)	0.090	0.020	78	-
pik spektral ivme (g)	1.400	1.590	-14	+
Darıca Arçelik Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.280	0.370	-32	+
pik relatif hız (m/s)	0.140	0.120	14	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.010	0.004	60	-
pik şekil değiştirme (%)	0.040	0.020	50	-
pik spektral ivme (g)	1.110	1.360	-23	+
Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.180	0.120	33	-
pik relatif hız (m/s)	0.120	0.030	75	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.013	0.003	77	-
pik şekil değiştirme (%)	0.040	0.005	88	-
pik spektral ivme (g)	0.800	0.490	39	-
Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.180	0.150	17	-
pik relatif hız (m/s)	0.100	0.040	60	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.010	0.003	70	-
pik şekil değiştirme (%)	0.030	0.007	77	-
pik spektral ivme (g)	0.640	0.430	33	-

	Zemin Profili C			
	Sıkılaştırma öncesi	Sıkılaştırma sonrası	% Değişim	Sıvılaşma riski
Yarımca Petkim Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.520	0.470	10	-
pik relatif hız (m/s)	0.370	0.150	59	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.045	0.014	69	-
pik şekil değiştirme (%)	0.250	0.020	92	-
pik spektral ivme (g)	1.530	1.760	-15	+
Darıca Arçelik Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.390	0.320	18	-
pik relatif hız (m/s)	0.170	0.120	29	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.012	0.005	58	-
pik şekil değiştirme (%)	0.100	0.010	90	-
pik spektral ivme (g)	1.260	1.080	14	-
Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.220	0.120	45	-
pik relatif hız (m/s)	0.170	0.050	71	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.015	0.003	80	-
pik şekil değiştirme (%)	0.090	0.005	94	-
pik spektral ivme (g)	1.010	0.490	51	-
Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.210	0.170	19	-
pik relatif hız (m/s)	0.150	0.050	67	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.012	0.004	67	-
pik şekil değiştirme (%)	0.080	0.006	93	-
pik spektral ivme (g)	0.780	0.550	29	-

Tablo 6.2 13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin analizinin sonuçları

	Zemin Profili A			
	Sıkılaştırma öncesi	Sıkılaştırma sonrası	% Değişim	Sıvılaşma riski
Yarımca Petkim Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.1400	0.1000	29	-
pik relatif hız (m/s)	0.1000	0.0700	30	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0130	0.0060	54	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0370	0.0040	89	-
pik spektral ivme (g)	0.5200	0.6000	-15	+
Darıca Arçelik Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.0300	0.0270	10	-
pik relatif hız (m/s)	0.0240	0.0150	38	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0016	0.0009	44	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0070	0.0010	86	-
pik spektral ivme (g)	0.1600	0.0700	56	-
Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.0900	0.0800	11	-
pik relatif hız (m/s)	0.0820	0.0690	16	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0090	0.0050	44	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0230	0.0030	87	-
pik spektral ivme (g)	0.3700	0.4500	-22	+
Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.0270	0.0240	11	-
pik relatif hız (m/s)	0.0220	0.0160	27	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0023	0.0011	52	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0060	0.0009	85	-
pik spektral ivme (g)	0.1300	0.0800	38	-

	Zemin Profili B			
	Sıkılaştırma öncesi	**Sıkılaştırma sonrası**	**% Değişim**	**Sıvılaşma riski**
Yarımca Petkim Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.1440	0.1400	3	-
pik relatif hız (m/s)	0.0830	0.0370	55	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0070	0.0020	71	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0300	0.0060	80	-
pik spektral ivme (g)	0.6500	0.5100	22	-
Darıca Arçelik Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.0500	0.0400	20	-
pik relatif hız (m/s)	0.0230	0.0120	48	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0010	0.0004	60	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0070	0.0020	71	-
pik spektral ivme (g)	0.2100	0.1500	29	-
Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.1000	0.0700	30	-
pik relatif hız (m/s)	0.0780	0.0240	69	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0050	0.0010	80	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0240	0.0030	88	-
pik spektral ivme (g)	0.6200	0.3600	42	-
Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.0400	0.0200	50	-
pik relatif hız (m/s)	0.0190	0.0070	63	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0013	0.0003	77	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0070	0.0010	86	-
pik spektral ivme (g)	0.1700	0.0900	47	-

	Zemin Profili C			
	Sıkılaştırma öncesi	Sıkılaştırma sonrası	% Değişim	Sıvılaşma riski
Yarımca Petkim Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.1800	0.1760	2	-
pik relatif hız (m/s)	0.1230	0.0630	49	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0090	0.0040	56	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0660	0.0070	89	-
pik spektral ivme (g)	0.7300	0.6800	7	-
Darıca Arçelik Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.0500	0.0400	20	-
pik relatif hız (m/s)	0.0230	0.0120	48	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0010	0.0004	60	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0070	0.0020	71	-
pik spektral ivme (g)	0.2100	0.1500	29	-
Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.1500	0.0900	40	-
pik relatif hız (m/s)	0.1050	0.0370	65	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0070	0.0020	71	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0500	0.0030	94	-
pik spektral ivme (g)	0.8800	0.4700	47	-
Marmara Ereğlisi Botaş Deprem İstasyonu				
kayma deformasyonunun değişimi (%)		-		-
kayma gerilmesinin değişimi (kPa)		+		-
pik ivme (g)	0.0500	0.0200	60	-
pik relatif hız (m/s)	0.0240	0.0090	63	-
pik relatif yerdeğiştirme (m)	0.0016	0.0004	75	-
pik şekil değiştirme (%)	0.0150	0.0008	95	-
pik spektral ivme (g)	0.1900	0.0800	58	-

Tabloların incelenmesinden çıkarılan sonuçlardan ilki, hem 17 Ağustos Kocaeli hem de 13 Eylül Artçı depremleri için üç zemin profilinin analizleri karşılaştırıldığında, sıvılaşmayı tetikleyen mekanizmaların sıkılaştırma sonucunda sayısal değerlerinin yüzde olarak en fazla Profil C'de azaldığı, başka bir deyişle yapılan sıkılaştırmanın en fazla Profil C'de başarılı olduğudur.

Tabloların incelenmesinden çıkarılan sonuçlardan bir diğeri, 17 Ağustos Kocaeli Depremi'nin analizinde sıvılaşma riski kolonuna bakıldığında, sıvılaşmayı tetikleyen yedi mekanizmanın sıkılaştırma sonrasında sıvılaşma riskini azaltıcı yönde en fazlasının Profil C'de değiştiğinin görülmesidir. Bu da yapılan sıkılaştırmanın sıvılaşmayı önleme doğrultusunda en fazla Profil C'de başarılı olduğunu göstermektedir.

Bu iki sonuçtan, ilk 3 - 4 metrelik kısmında düşük SPT-N değerlerine sahip çok yumuşak kil ve gevşek silt tabakaları içeren, yer altı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu C tipi profillerde sıkılaştırmanın daha etkili olduğu söylenebilir.

Tabloların incelenmesinden çıkarılan bir başka sonuç, istasyonlara göre analizler karşılaştırıldığında, 17 Ağustos Kocaeli Depremi'nin Bursa Tofaş Fabrikası verilerine göre analizinin, 13 Eylül Artçı Depremi'nin ise Marmara Ereğlisi Botaş verilerine göre analizinin en iyi sıkılaşma yüzdelerini verdiğinin görülmesidir. 17 Ağustos depreminde 4 istasyon içinde en düşük yer ivmesini kaydeden istasyonun Bursa Tofaş Fabrikası olduğu, 13 Eylül depreminde ise en düşük yer ivmesini kaydeden istasyonun Marmara Ereğlisi Botaş olduğu düşünülürse, sıkılaştırmanın yer ivmesinin düşük olduğu bölgelerde daha etkili olduğu söylenebilir.

Tabloların incelenmesinden çıkarılan bir diğer sonuç, 17 Ağustos Kocaeli Depremi'nin ve 13 Eylül Artçı Depremi'nin analizleri sıkılaştırma sonrasında sıvılaşma riskinin azalması bakımından karşılaştırıldığında, sıvılaşma riskinin 13 Eylül depremi analizinde daha büyük oranda azaldığının görülmesidir. Buna göre sıkılaştırmanın sıvılaşma riskini azaltıcı yönde etkinliğinin, düşük deprem şiddetlerinde daha fazla olduğu söylenebilir.

Tabloların incelenmesinden çıkarılan önemli bir sonuç da, hem 17 Ağustos Kocaeli hem de 13 Eylül Artçı Depremi'nin analizinde sıkılaştırma sonrasında birçok istasyonda pik spektral ivme azalmış ve sola kayarak periyodu küçülmüştür. Ancak bazı istasyonlarda pik spektral ivmenin periyodu küçülmesine rağmen artışı gözlenmiştir. Sıkılaştırma sonucunda kayma dalgası hızı ve kayma modülünün artmasına bağlı olarak zeminin rijitliği artacağından, ivmelerin büyümesi, buna karşın zemin periyodunun ve yer değiştirme genliklerinin ise azalması beklenen sonuçtur. Bu nedenle sıkılaştırma sonucunda her ne kadar ivmeler artsa da, zemin periyodunun küçülerek yapı periyodundan uzaklaşması olası bir deprem sırasında rezonans tehlikesini önleyeceğinden hasar riskinin azalması anlamına gelmektedir.

Tabloların toplu değerlendirilmesinden, sıkılaştırma sonrasında en etkili sonucun zemin profili C için 5.8 şiddetindeki 13 Eylül Artçı Depremi'nin Marmara Ereğlisi Botaş İstasyonu verilerine göre analizinden elde edildiği görülmektedir. Bu analizin sonuçları vurgulanırsa, pik ivmede % 60 iyileşme, pik relatif hızda % 63 iyileşme, pik relatif yer değiştirmede % 75 iyileşme, pik şekil değiştirmede % 95 iyileşme, pik spektral ivmede % 58 iyileşme sağlandığı görülmektedir. Bu sonuçların bir ortalaması alınırsa sıvılaşma riskinin sıkılaştırma sonrasında % 70 oranında azaldığı söylenebilir. Analiz sonuçları göstermiştir ki, depremin şiddeti ve pik yer ivmesi arttıkça bu oran azalmaktadır, ancak gelecekte sıkılaştırma tekniklerinin geliştirilmesiyle (örneğin patlatma tekniğinin etki derinliği halen bilinmemektedir) % 100 iyileştirme sağlanması mümkündür.

KAYNAKLAR

Abdel, S. and Farag, H., 2000. Use of porous steel soil nails for enhancing dynamic stability of earth dams, *PhD Thesis,* University of Missouri-Rolla

ABYYHY, 1998. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, *İnşaat mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayını No. 25,* Resmi Gazete, 23.390.

Altun, S. ve Ansal, A., 2003**.** Tekrarlı yükler altında kumların gerilme – şekil değiştirme özellikleri. *itüdergisi/d*. Cilt 2, Sayı 4, 25-34

Andrews, D.C. and Martin, G.R., 2000. Criteria for liquefaction of silty soils, *Proc.12 WCEE, New Zealand* Vol. 5, No. 0312, pp.

Bakır, B.S. ve Yılmaz, T., 2002. Sıvılaşmanın sismik bina performansı üzerindeki etkileri: Adapazarı örneği, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

Bakır, B.S., Sucuoğlu, H., ve Yılmaz, T., 2002. An overview of local site effects and the associated building damage in Adapazarı during the 17 August 1999 İzmit earthquake, *Bull. Seismological Soc. of Am.*, 92, 509-526.

Bartlett, S.F. and Youd, T.L., 1995. Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction induced lateral spreading, *ASCE Journal of Geotech. Eng,* **121**, 316-329.

Casagrande, A., 1947. Classification and Identification of Soils. Transactions, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 113, pp. 901-930.

Castro, G. and Poulos, S.J., 1977. Factors affecting liquefaction and cyclic mobility, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *ASCE*, Vol. 103.

CYCLIC 1D, 2005. Version 1.0, Yang, Z. and Elgamal, A., *Copyright © 2001-2005 University of San Diego,* http://cyclic.ucsd.edu.

Degen W.S. and Hussin J.D., 2001. Soil densification: short course notes taught in conjunction with the *ASCE Geo-Odyssey Conference,* June 10 2001, Blacksburg, VA.

Day, R.W., 2004. Geotechnical Earthquake Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York.

Durgunoğlu, H.T. ve diğ., 2002. Ağır dinamik kompaksiyon-yüksek enerji kolonlari ile zemin ıslahına ait bir vaka analizi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

Durgunoğlu, H.T. ve diğ., 2002. Sıvılaşmaya karşı Jetgrout yöntemi ile zemin ıslahına ait bir vaka analizi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 21-22 Ekim 2002, pp. 454-463, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

Düzceer, R. ve Gökalp A., 2002**. A**karyakıt tank temellerinin taş kolonlarla iyileştirilmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses), 2000. Version August 20/2000, Bardet, J.P., Ichii K. and Lin C.H., *University of Southern California,* http://geoinfo.usc.edu.

Elias, V., Welsh, J., Warren, J., Lukas, R., 1999. Ground Improvement Technical Summaries Vol II. *U.S. Department of Transportation*, Report no FHWA-SA-98-086

Erken, A., 2001. The Role of Geotechnical Factors on Observed Damage in Adapapazarı, *XV ICMGE Satelite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes"*, 25 August, 2001, İstanbul, Türkiye.

Erken, A. and Ansal, A.M., 1994. Liquefaction characteristics of undisturbed sands, performance of ground and soil structure during earthquakes**,** *13th Int.*

Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng., New Delhi, January 5-10, 165-170. (in India).

Gohl ve diğ., 2000. Explosive Compaction: Design, Implementation and Effectiveness, *Geotechnique* 50(6), pp.657-665

Green, A. R., 2001. Energy based evaluation and remediation of liqufiable of soils, *PhD Thesis,* Virginia Polytechnic Institute and State University

Hamada, M. et al., 1986. Study on liquefaction-induced permanent ground displacements, *Association for the Development of Earthquake Prediction,* Tokyo, Japan.

Hayward Baker Inc., A Keller Company, 2003, USA,
http://www.haywardbaker.com

Hryciw, R.D. 1986. A Study of Physical and Chemical Aspects of Blast Densification of Sand, *PhD Thesis,* Northwestern University

Ishihara, K., 1985. Stability of natural deposits during earthquakes, *Proceedings of the 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* vol. 1, San Francisco, 321-376.

Ishihara, K., 1997. Terzaghi oration: Geotechnical aspects of the 1995 Kobe earthquake, *Proceedings of ICSMFE,* Hamburg, s. 2047-2073.

Ishihara, K. and Yoshimine, M. 1992. Evaulation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundation*, Tokyo, Japan, 32 (1) 173-188.

Japanese Geotechnical Society, 1998. Remedial Measures Against Soil Liquefaction, A.A Balkema, Rotterdam.

Juang's Website on Soil Liquefaction in the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake, 2002. Juang H., Clemson University
http://www.ces.clemson.edu/chichi/

Kaya, Z., Irısawa, T., Erken, A., 2002. Adapazarı zeminlerinin dinamik davranışı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

Komazawa ve diğ., 2001. Bedrock Structure in Adapazarı, Turkey - A Possible Cause of Severe Damage by the 1999 Kocaeli Earthquake, *Journal SDDE*, 2001, Philadelphia.

Köleoğlu, E., 2002. Sıvılaşma potansiyeli değerlendirmeleri ve sıvılaşma analizi kriterlerinin değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall Publishing, Upper Saddle River, NJ, 653 pp.

Kummeneje O. and Eide O., 1961. Investigation of Loose Sand Deposits by Blasting, Vol. 1, Proceedings: *5. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* 17-22 July, Paris, France, pp. 491-497

Lukas, R.G., 1986. Dynamic compaction for highway construction, Vol. 1, *Design and construction guidelines*, Report No. FHWA/RD-86/133, Federal Highway Administration, Washington DC.

Lukas, R.G., 1995. Dynamic Compaction, *Geotechnical Engineering Circular*, No. 1, Publication No. FHWA-SA-95-037, Federal Highway Administration, Office of Engineering, Washington DC.

Lyman A.K.B, 1942. Compaction of Cohesionless Foundation Soils by Explosives, *Transactions of ASCE*, Vol. 107, pp 1330-1341

Mayne, P.W., 1984. Ground improvement by dynamic compaction, *Civil Engineering Practice, Geotechnical Ocean Engineering,* pp 405-422

Menard L. and Broise Y., 1975. Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation, Geotechnique, Vol. 25, pp 3-18

Mitchell, J.K., Baxter C.D.P., and Munson, T.C., 1995. Performance of improved ground during earthquakes. *Soil Improvement for Earthquake Hazard Mitigation, Geotech Special Pub.,* ASCE, 49, 1-36

Mitchell, J.K. and Gallagher P.M., 1998. Guidelines for ground improvement of civil works and military structures and facilities, Publication no. ETL 1110–1–185, *US Army Corps of Engineers,* Washington, D.C.

Narin Van Court W.A. and Mitchell, J.K., 1995. Investigation of Predictive Methodoligies for Explosive Compaction, Proceedings: Soil Improvement for Earthquake Hazard Mitigation, (R.D. Hryciw, ed.), *Geotechnical Special Publication* No.49, ASCE, pp 51-65

National Research Council (NRC), 1985. Liquefaction of soils during earthquakes, Report No:CETS-EE-001, *Committee on Earthquake Engineering.* National Academy Press, Washington, D.C.

National Geophysical Data Center (NGDC), http://www.ngdc.noaa.gov.

Önalp, A., Sert, S., Bol, E., 2000. Adapazarı zeminlerinin deprem performansı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi*, s.375-382, 26-27 Ekim 2000, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Önalp, A., Bol, E., 2002. Adapazarı zeminlerinin jeomorfolojik ve geoteknik özellikleri, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

Önalp, A., Arel, E., 2002. Siltlerin sıvılaşma yeteneği: Adapazarı Kriteri, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

Özsoy, B. ve Durgunoğlu, T., 2003. Sıvılaşma etkilerinin yüksek kayma modüllü zemin-çimento karışımı kolonlarla azaltılması, 5. *Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, bildiri no: AT-004, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul

Sancio, R.B. ve diğ., 2002. Correlation between ground failure and subsurface soil conditions in downtown Adapazarı Turkey, *Journal Structural Dynamics and Earthquake Engineering.*

Sancio, R.B., 2003. Ground failure and building performance in Adapazarı Turkey, *PhD Thesis,* University of California, Berkeley

Seed, R.B., Çetin, K.Ö., Moss, R.E.S, 2001. Recent advances in soil liquefaction hazard assessment, *Proc. Satellite Conference TC4 Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes* –XV ICSMGE

Seed, H.B., 1976. Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes, *ASCE National-Convention on Liquefaction Problems in*

Geotechnical Engineering, P.A. September 27-October ASCE Preprint, 2752.

Seed, H.B., 1991. Liquefaction Manual. Course Notes for CE 275: *Geotechnical Earthquake Engineering,* College of Engineering, University of California, Berkeley.

Seed, H.B. and Idriss, I.M., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, *Earthquake Engineering Research Institute,* University of California, Berkeley.

Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol 97, No SM 9, pp. 1249 – 1273

Soil liquefaction, University of Washington, Seattle, WA**,** 2000.

http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html

Sucuoğlu H., 2000. Depremlerin sismik özellikleri, *Marmara ve Düzce depremleri mühendislik raporu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası ve ODTÜ İnşaat Bölümü, Ankara

Tao, M., 2003. Case history verification of the energy method to determine the liquefaction potential of soil deposits, *PhD Thesis,* Case Western Reserve University

Wilson, D.W. et al., 2000. Observed Seismic Lateral Resistance of Liquefying Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineerimg,* ASCE*,* **126,** 898-996.

Wolf J.P. and Song C., 1999**.** The Guts of Dynamic Soil-Structure Interaction, Proceedings: *International Symposium on Earthquake Engineering*, Budva, Montenegro, September 22-25

Van Impe W.F. and Madhav M.R., 1995. Deep Dynamic Densification of Granular Deposits, *Report: Soil Mechnics Laboratuary*, Ghent University, Belgium

EKLER

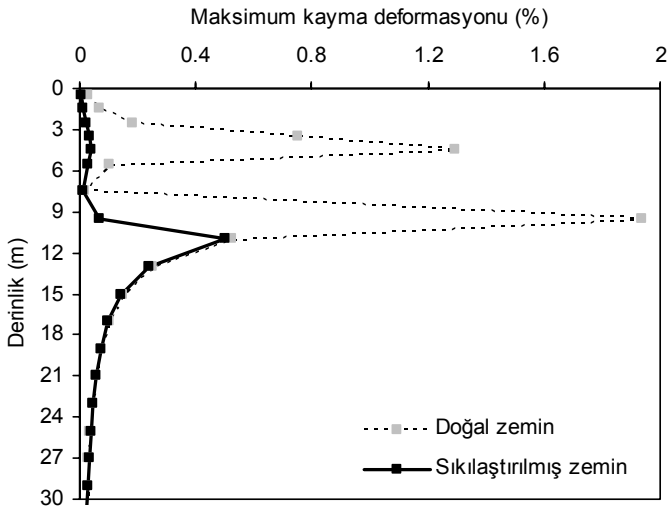
EK A. ZEMİN PROFİLİ “A” İÇİN ÇİZİLEN GRAFİKLER 152

EK B. ZEMİN PROFİLİ “B” İÇİN ÇİZİLEN GRAFİKLER 184

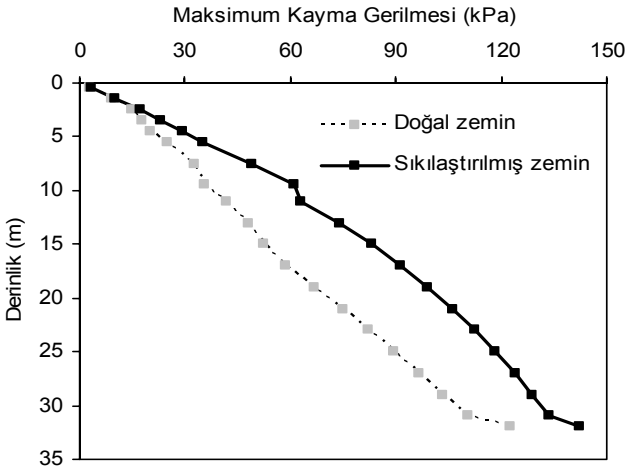
A. ZEMİN PROFİLİ “A” İÇİN ÇİZİLEN GRAFİKLER

17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi’nin Analizi

Yarımca Petkim Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

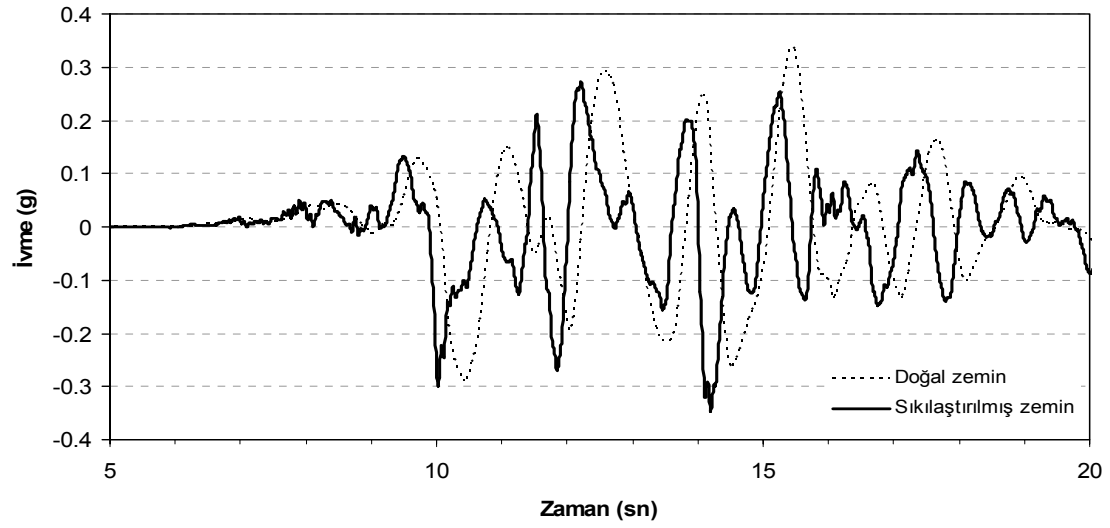


(a)

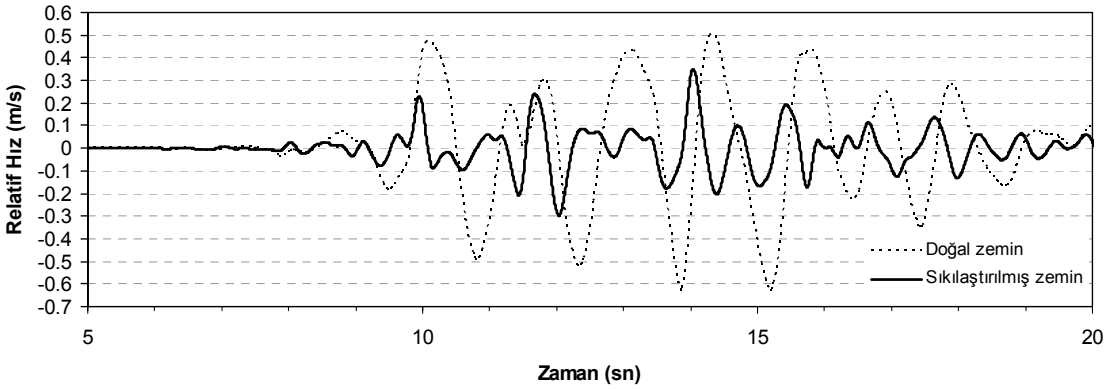


(b)

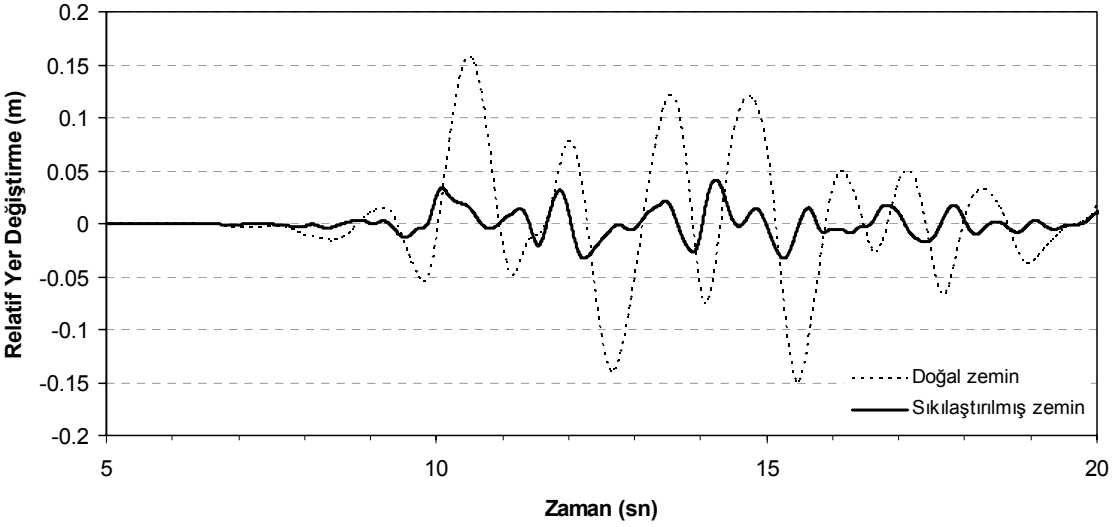
Şekil 1 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

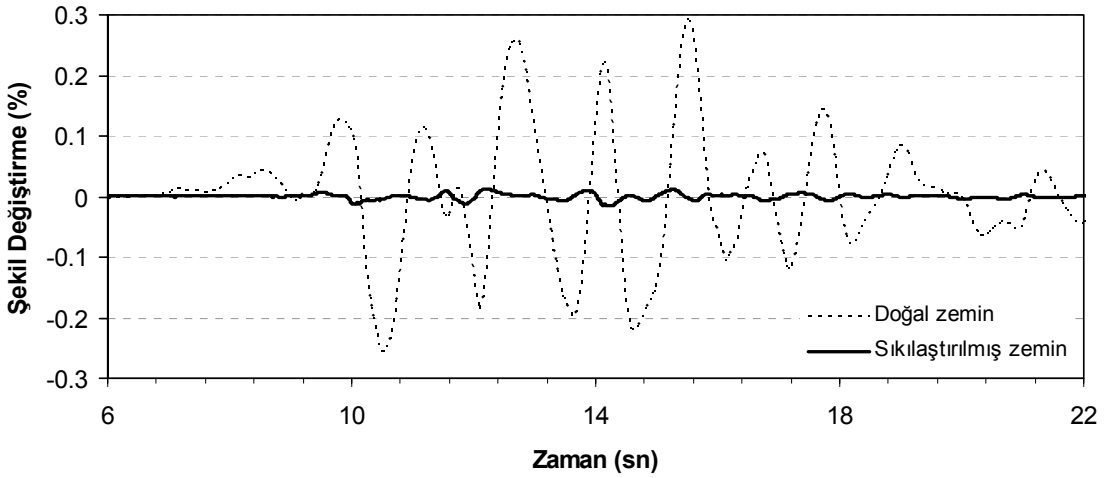


(b)

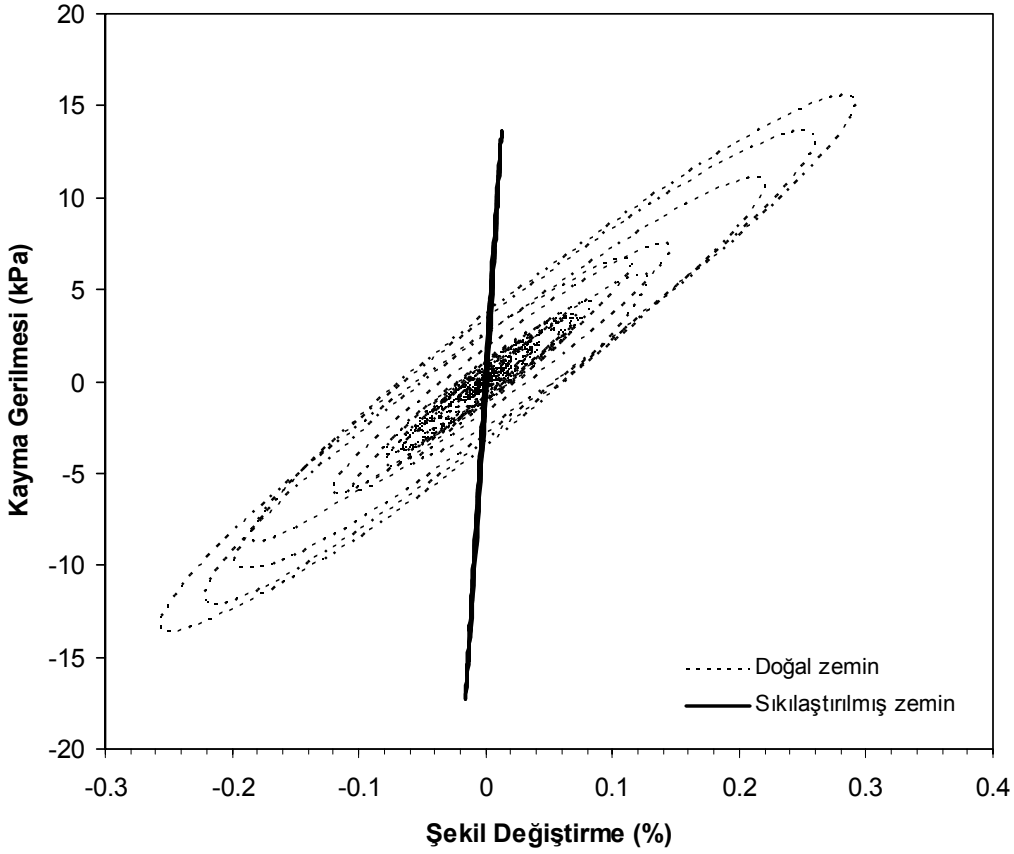


(c)

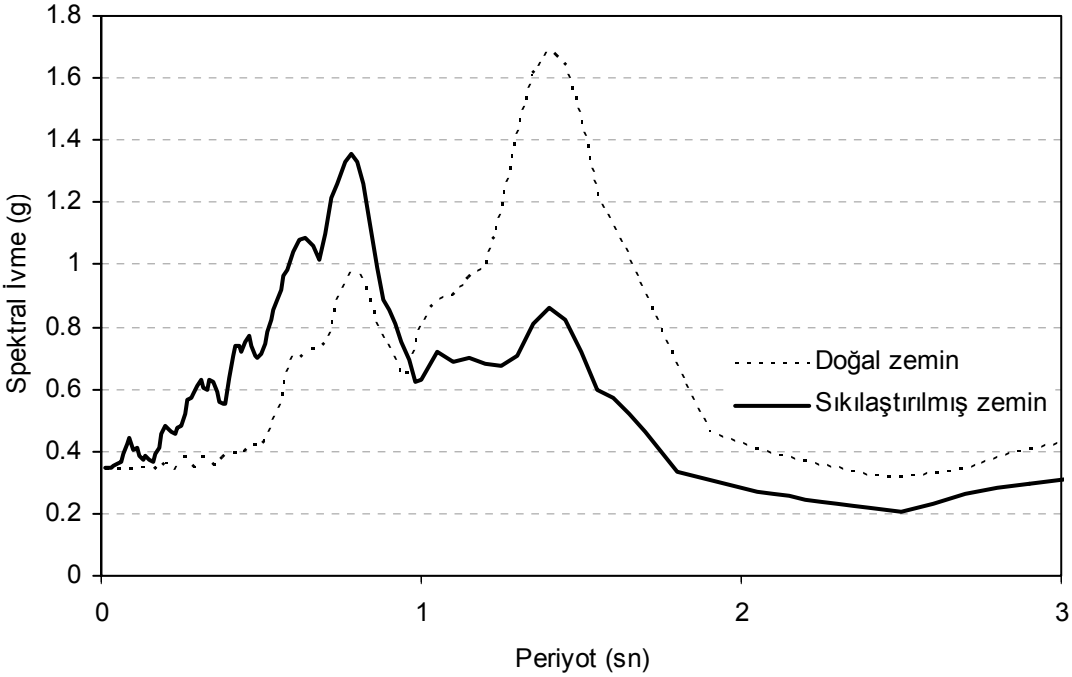
Şekil 2 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



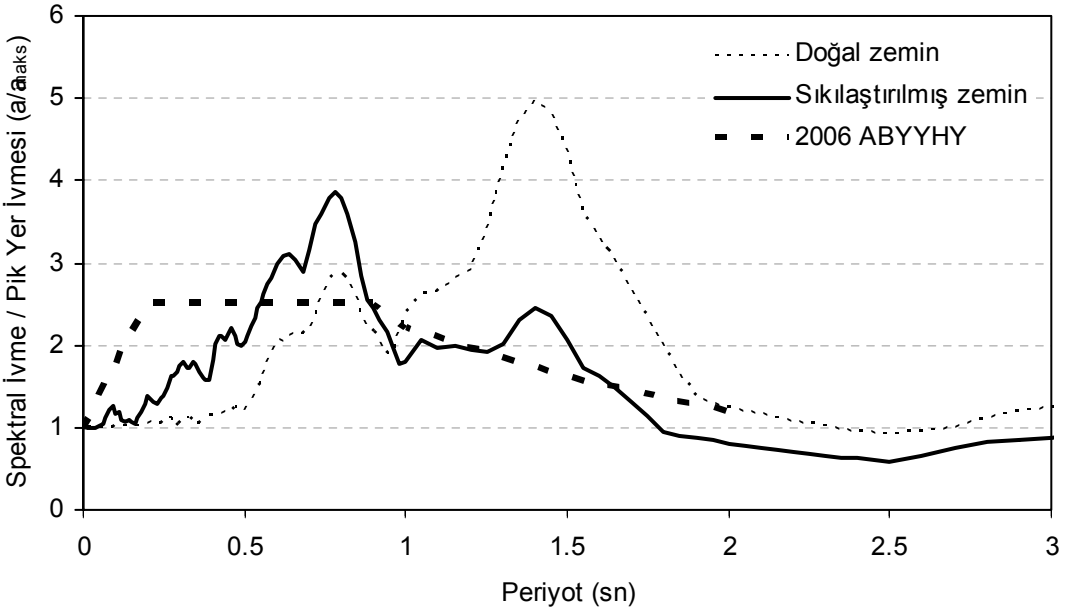
Şekil 3 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



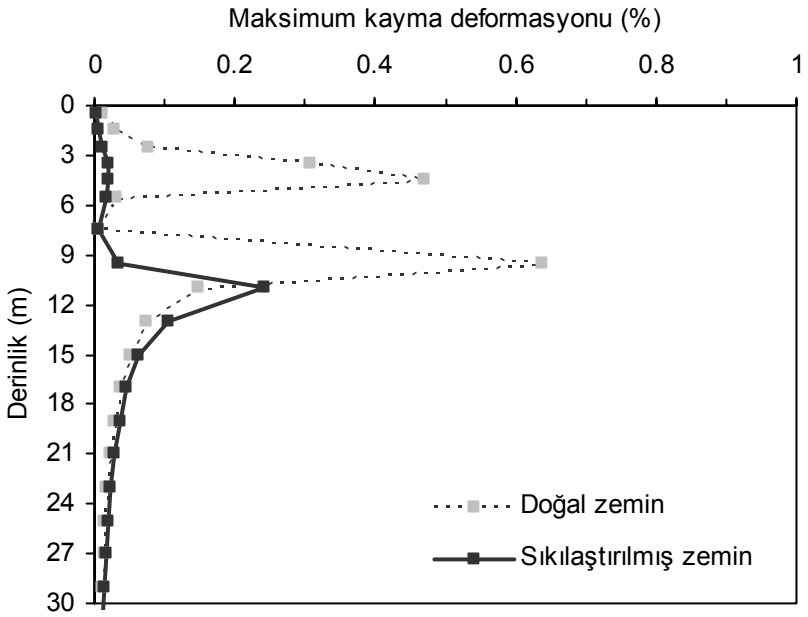
Şekil 4 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



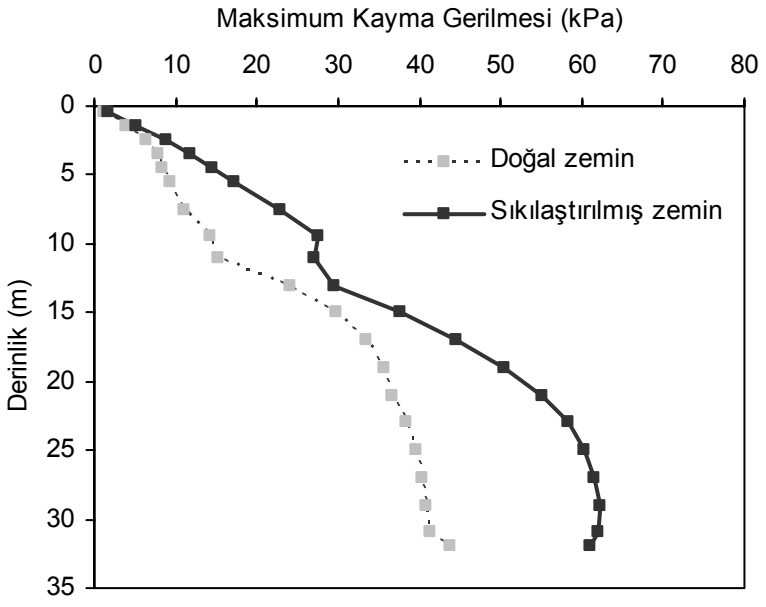
Şekil 5 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 6 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

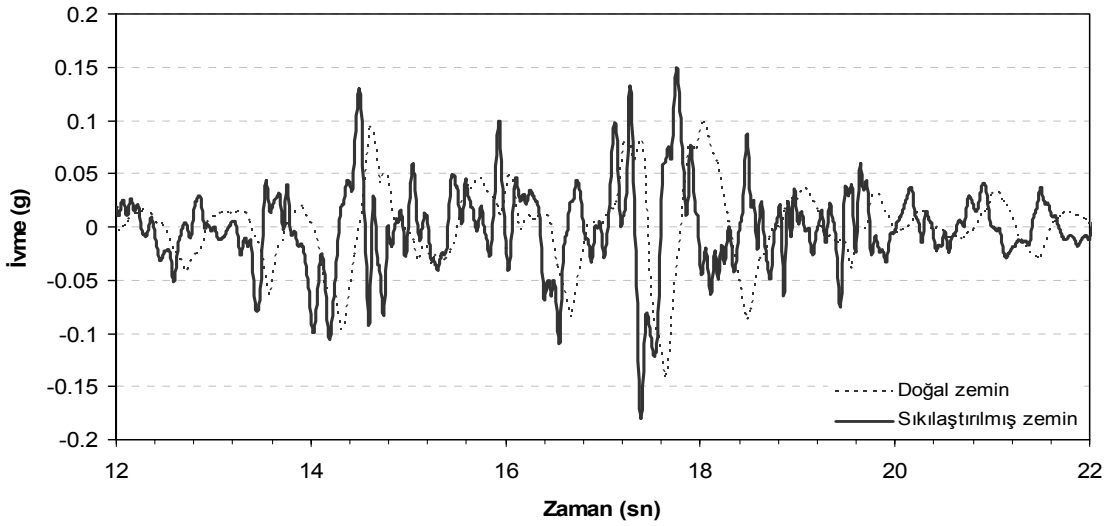


(a)

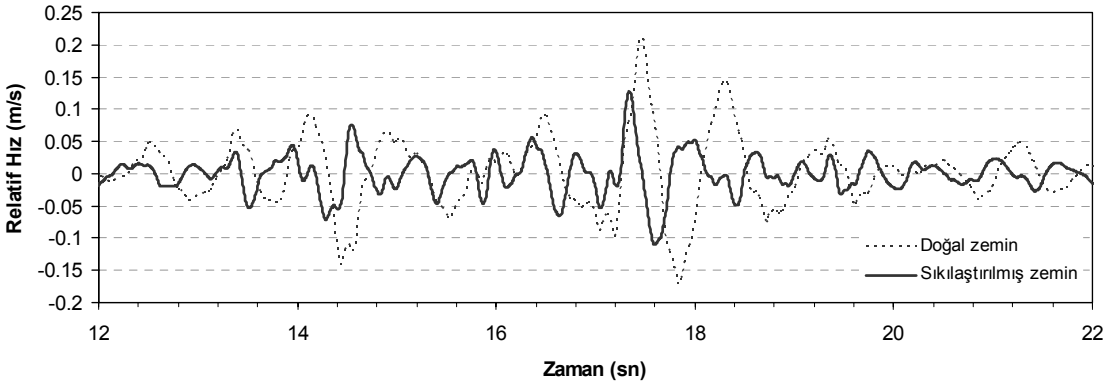


(b)

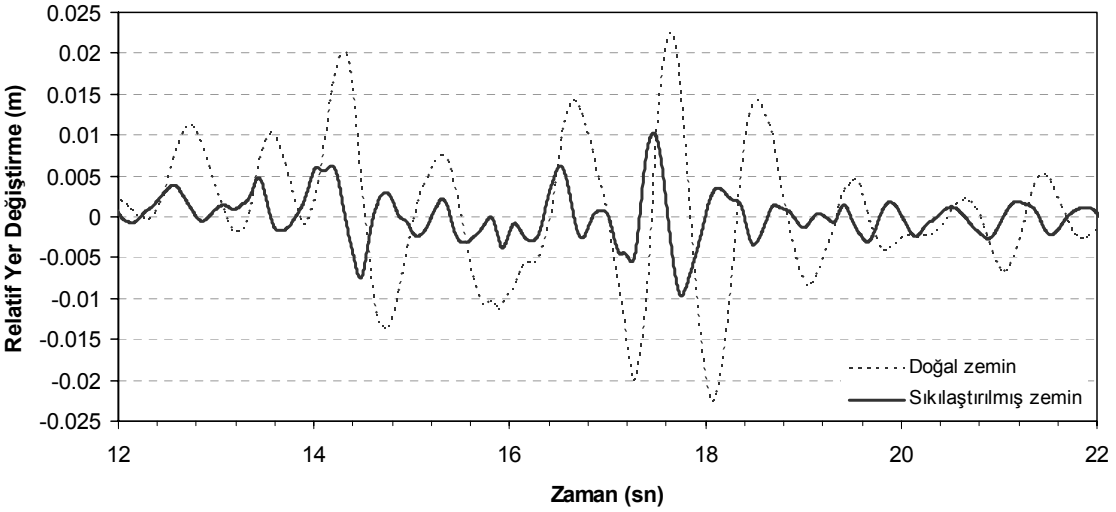
Şekil 7 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

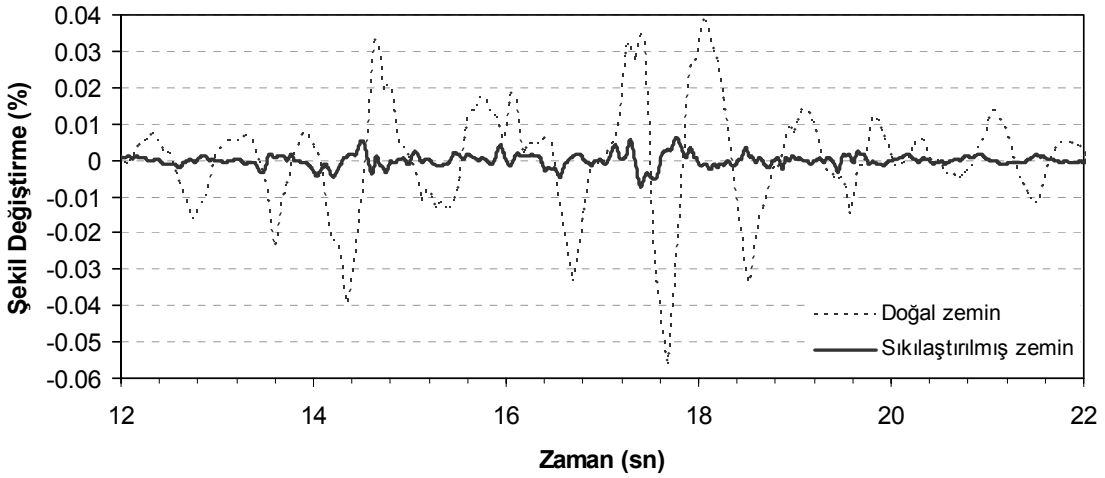


(b)

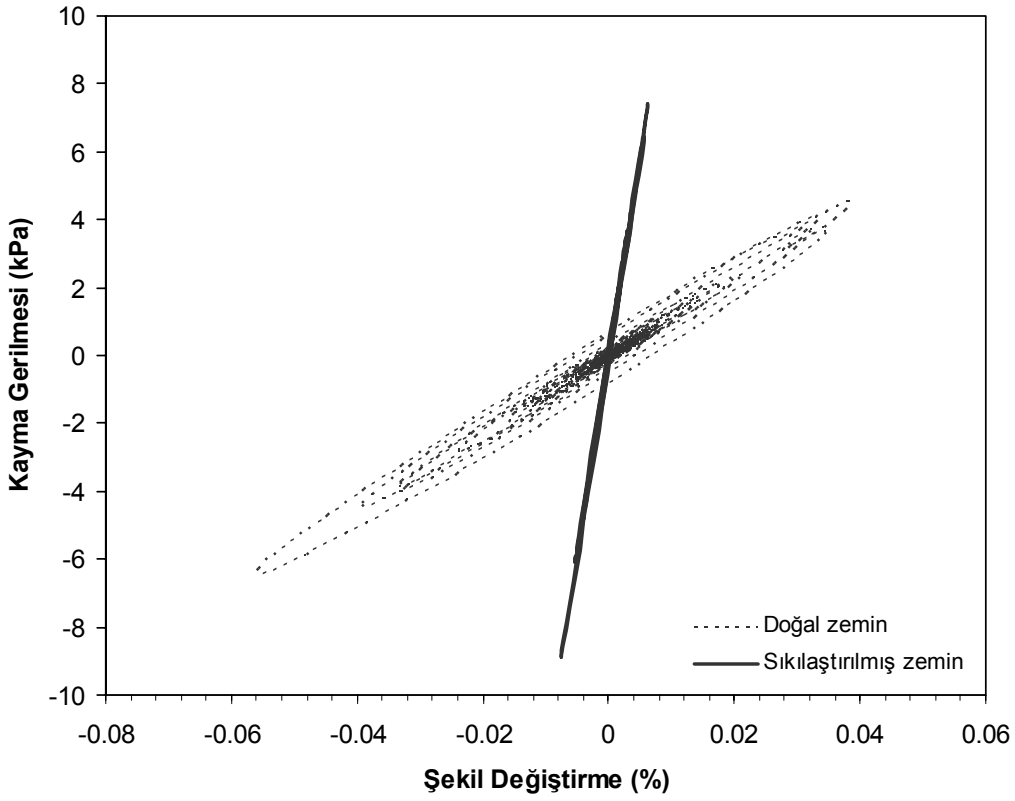


(c)

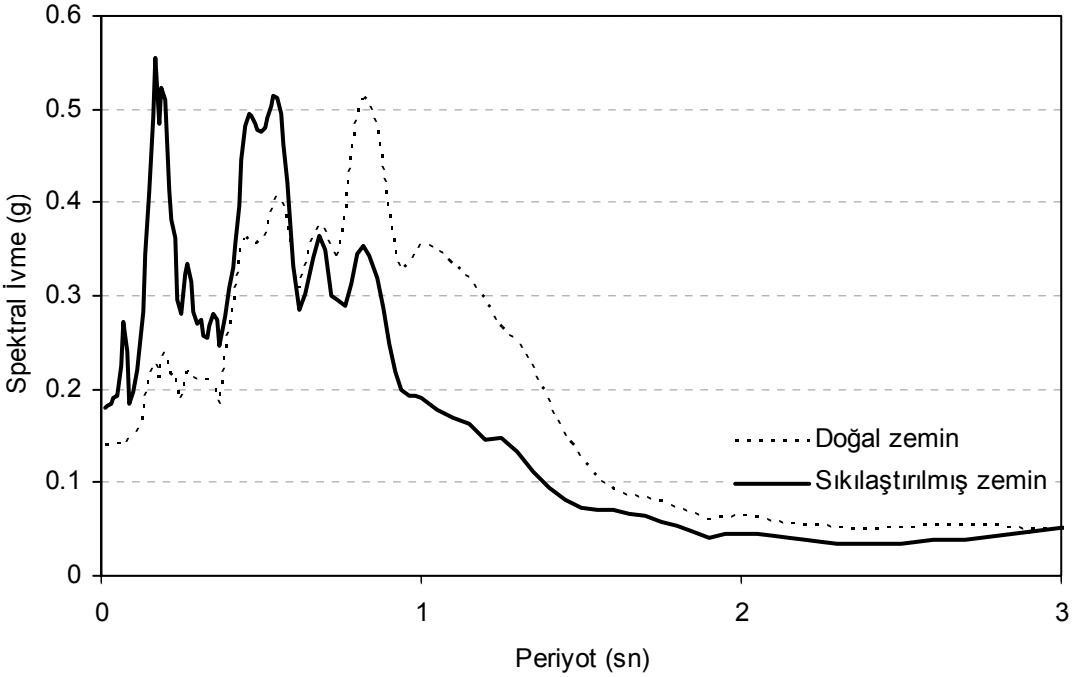
Şekil 8 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



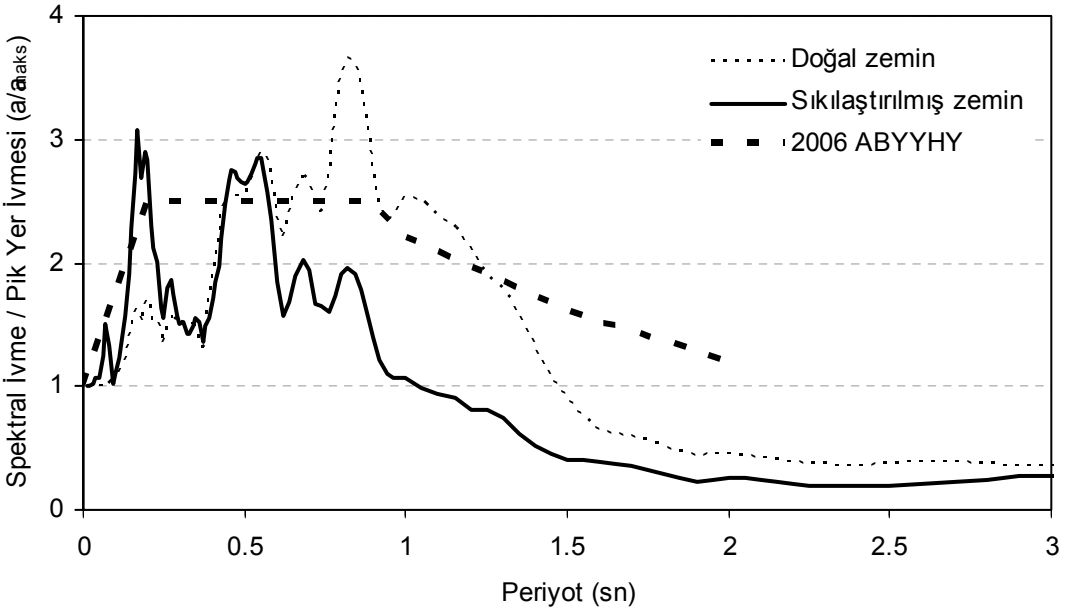
Şekil 9 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



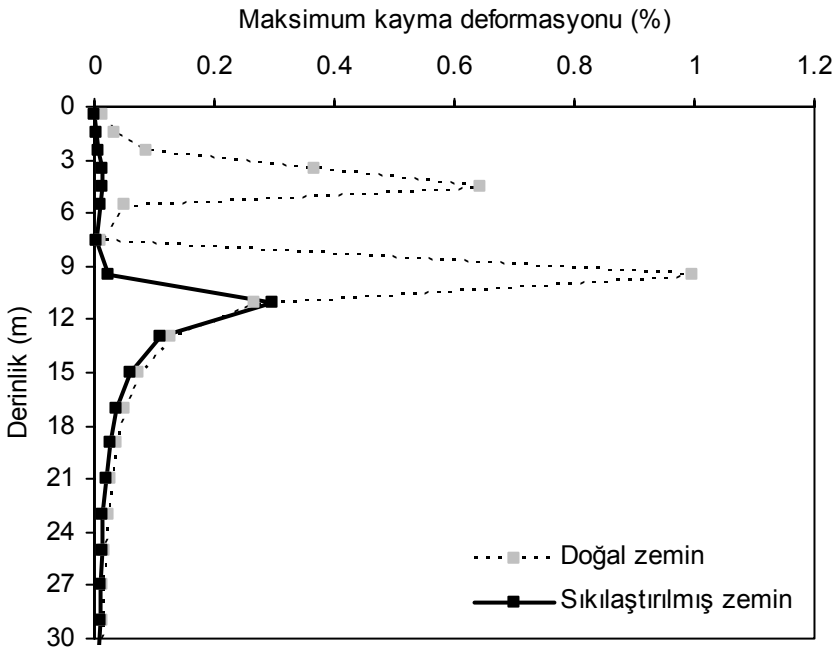
Şekil 10 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



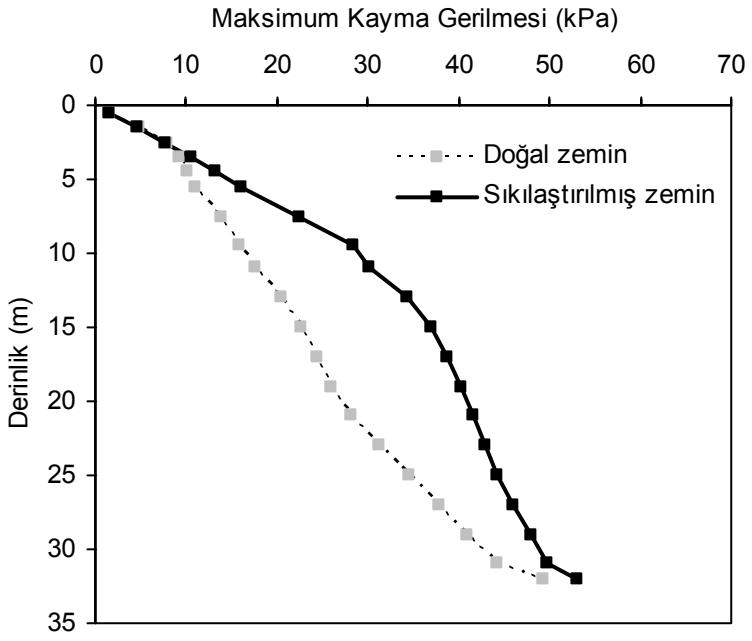
Şekil 11 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 12 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

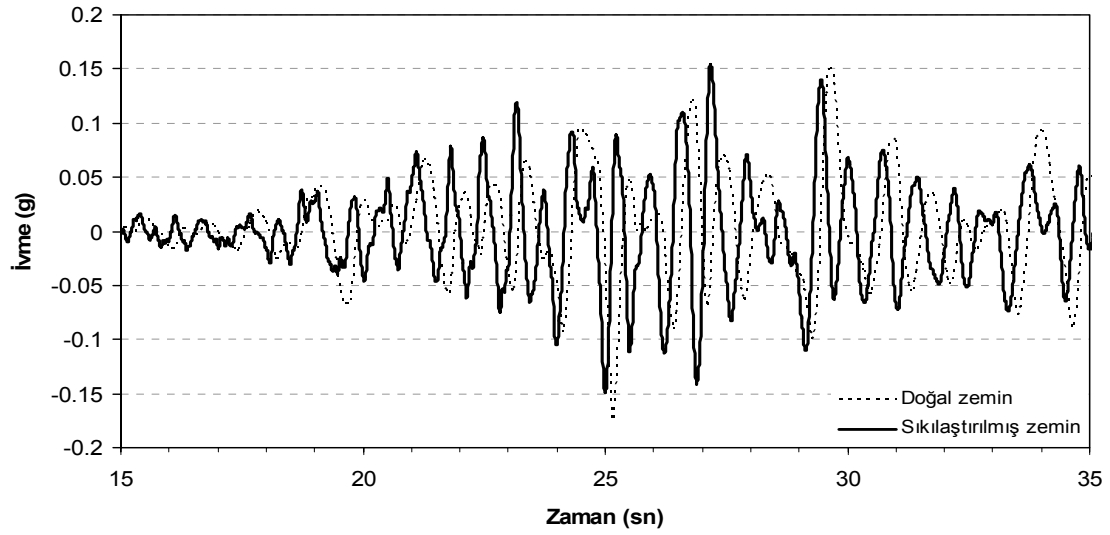


(a)

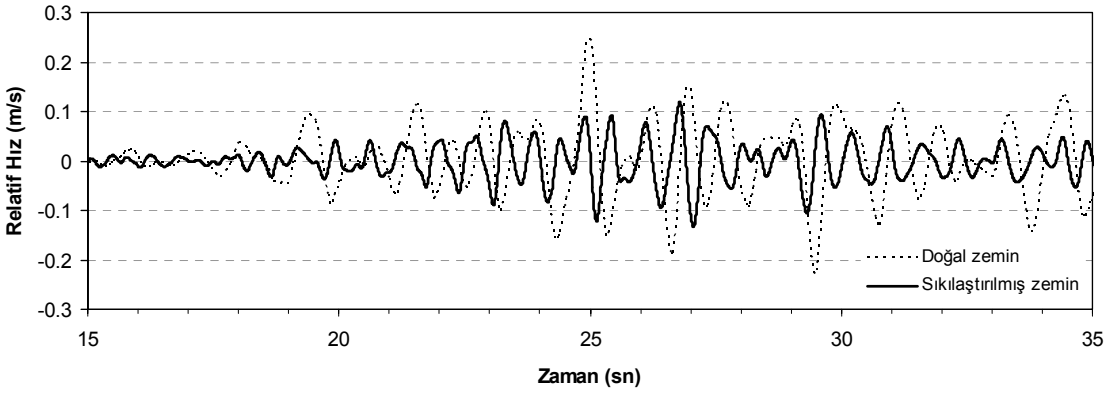


(b)

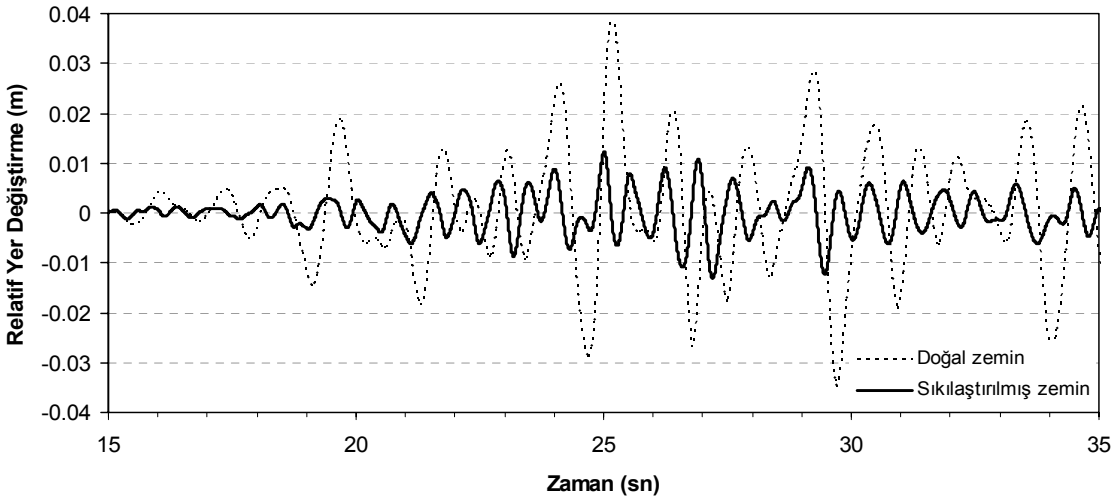
Şekil 13 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

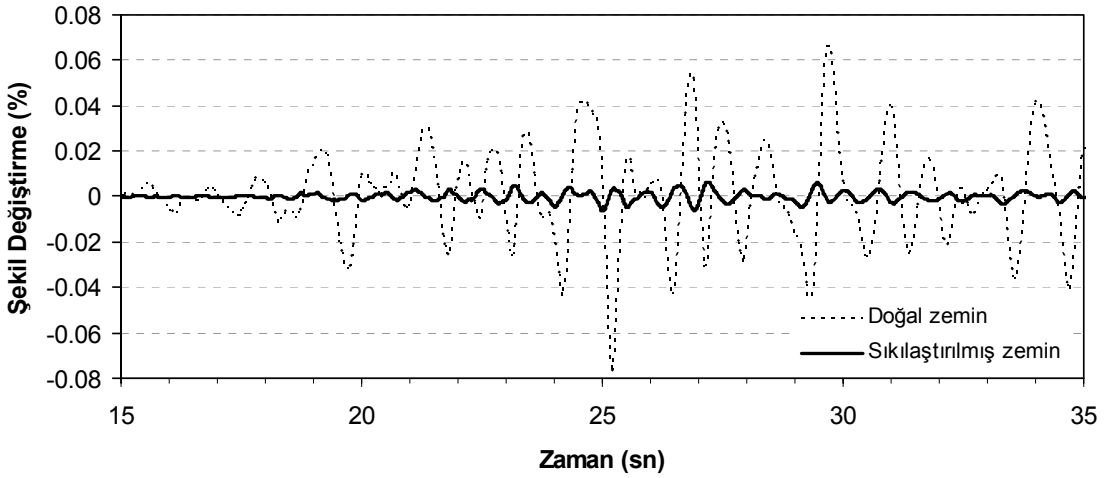


(b)

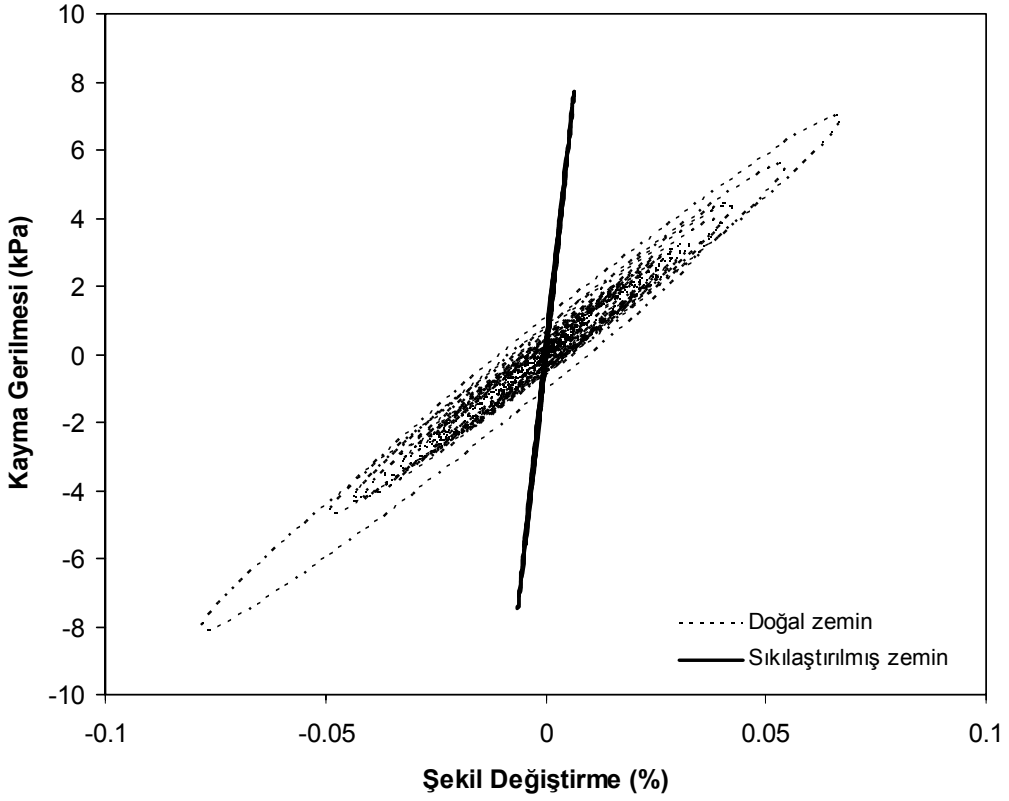


(c)

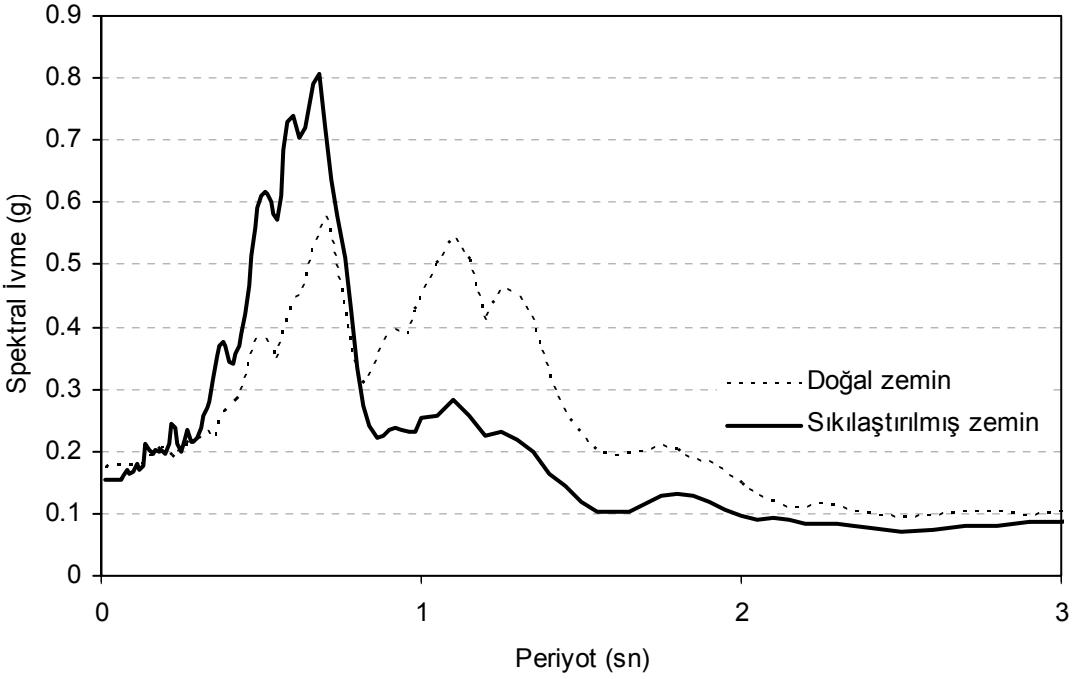
Şekil 14 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



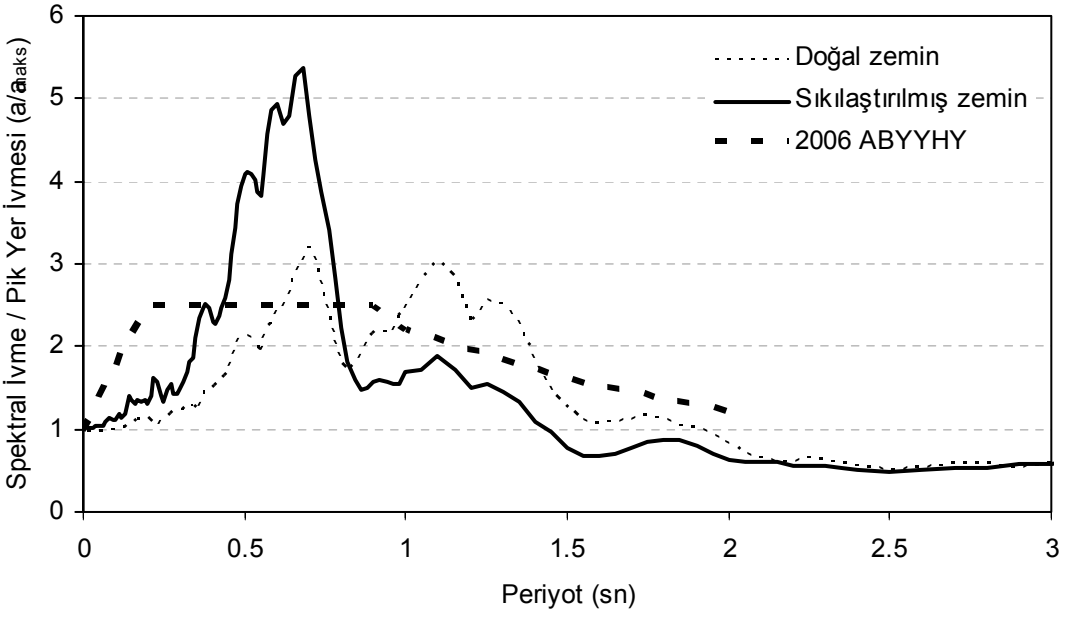
Şekil 15 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



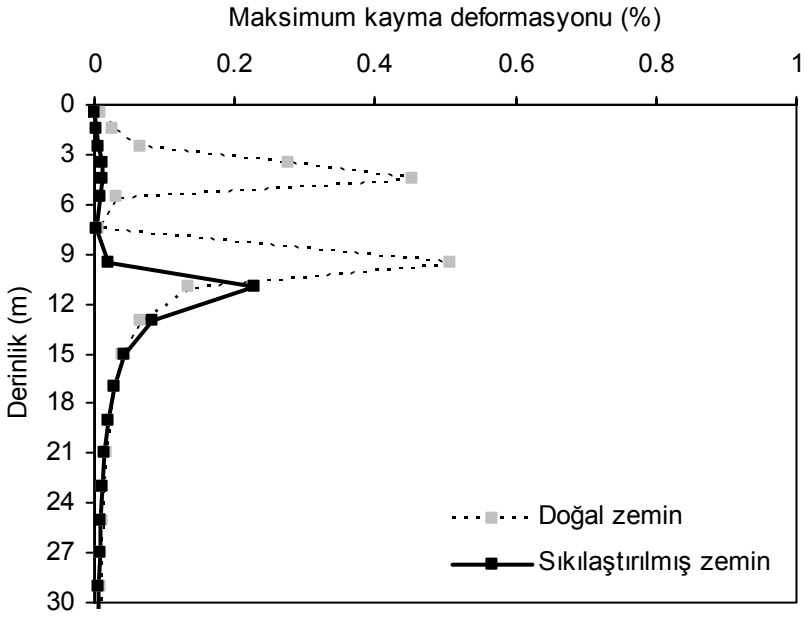
Şekil 16 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



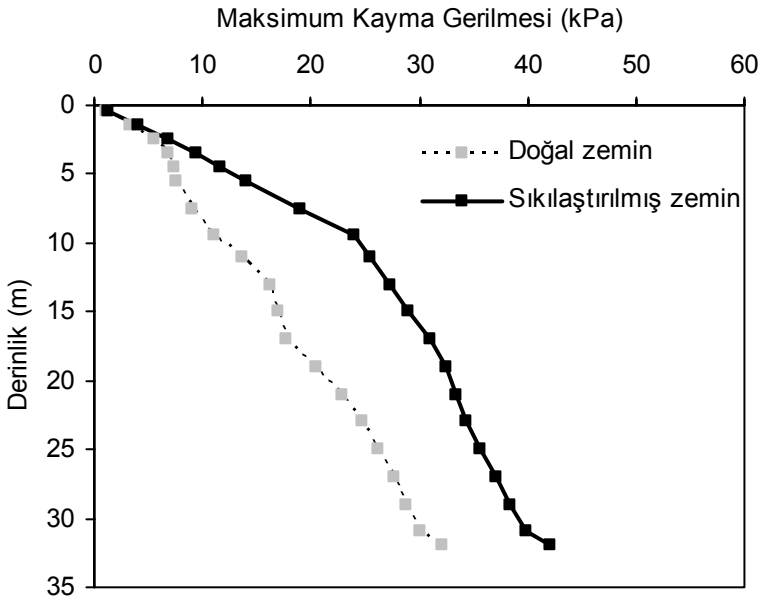
Şekil 17 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 18 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

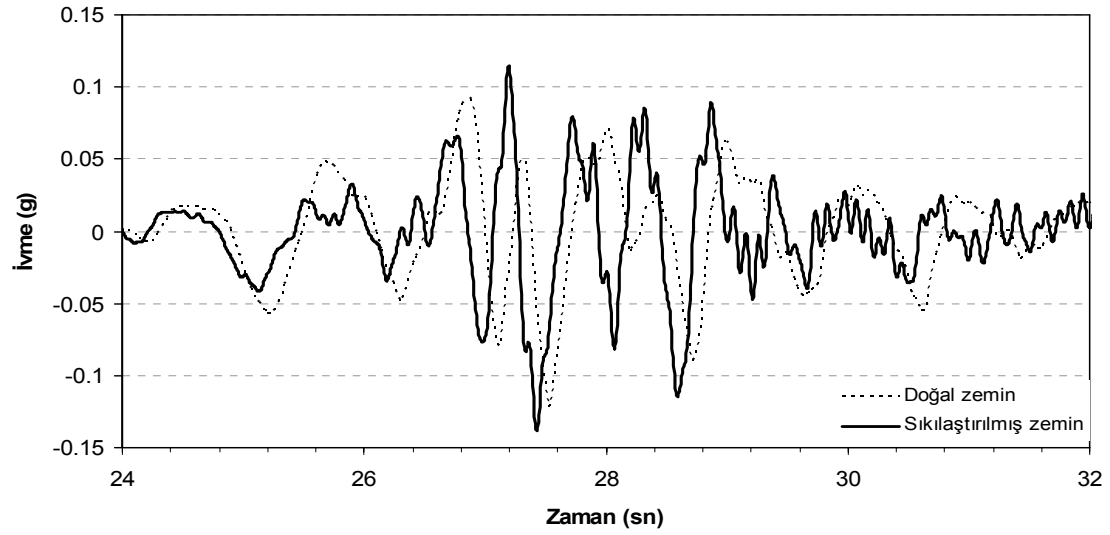


(a)

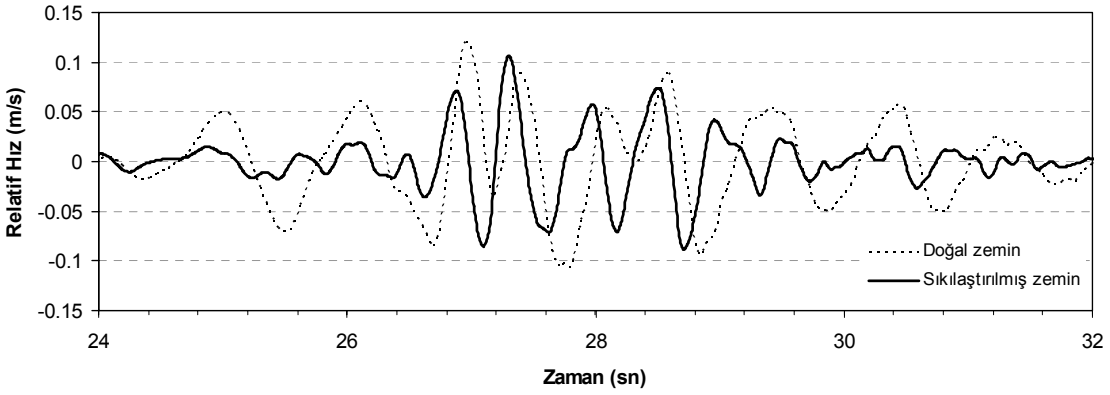


(b)

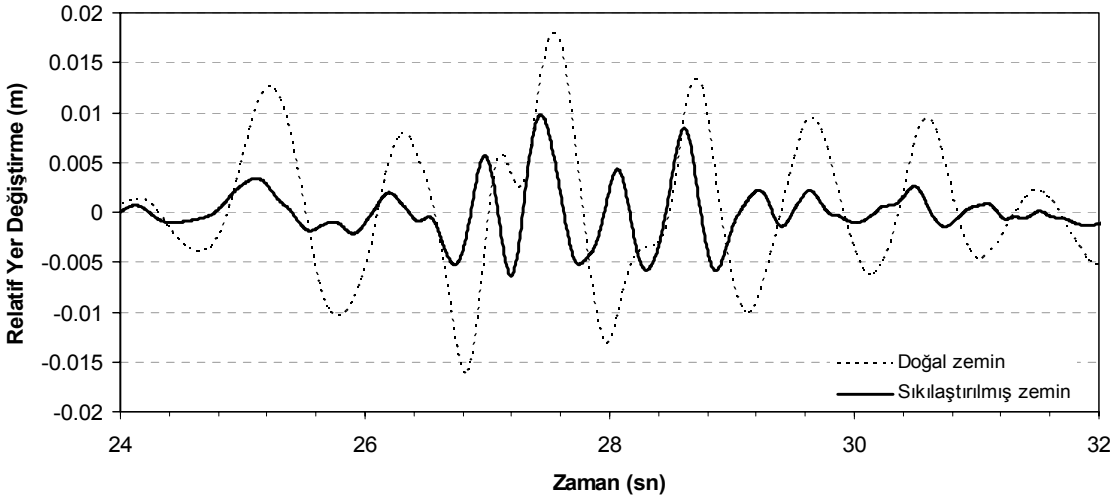
Şekil 19 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

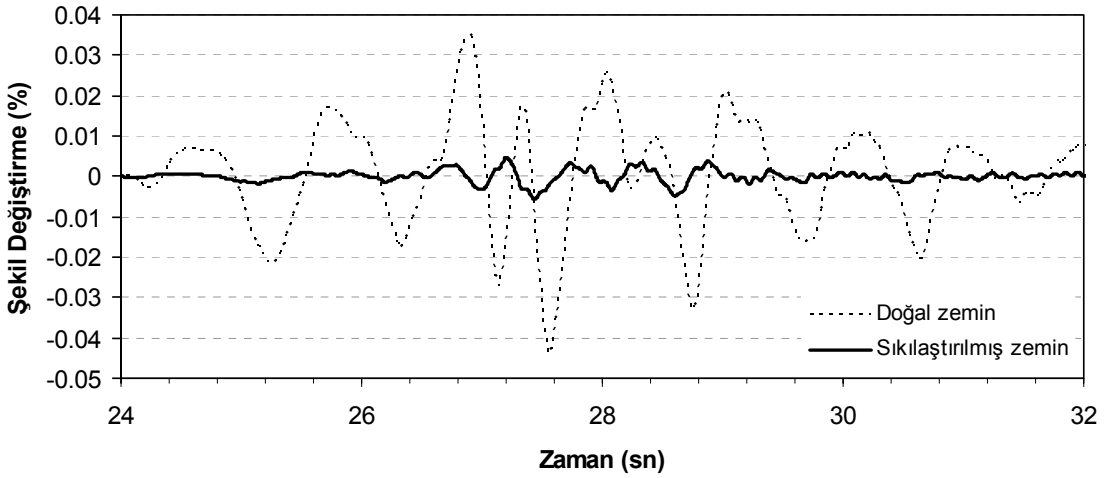


(b)

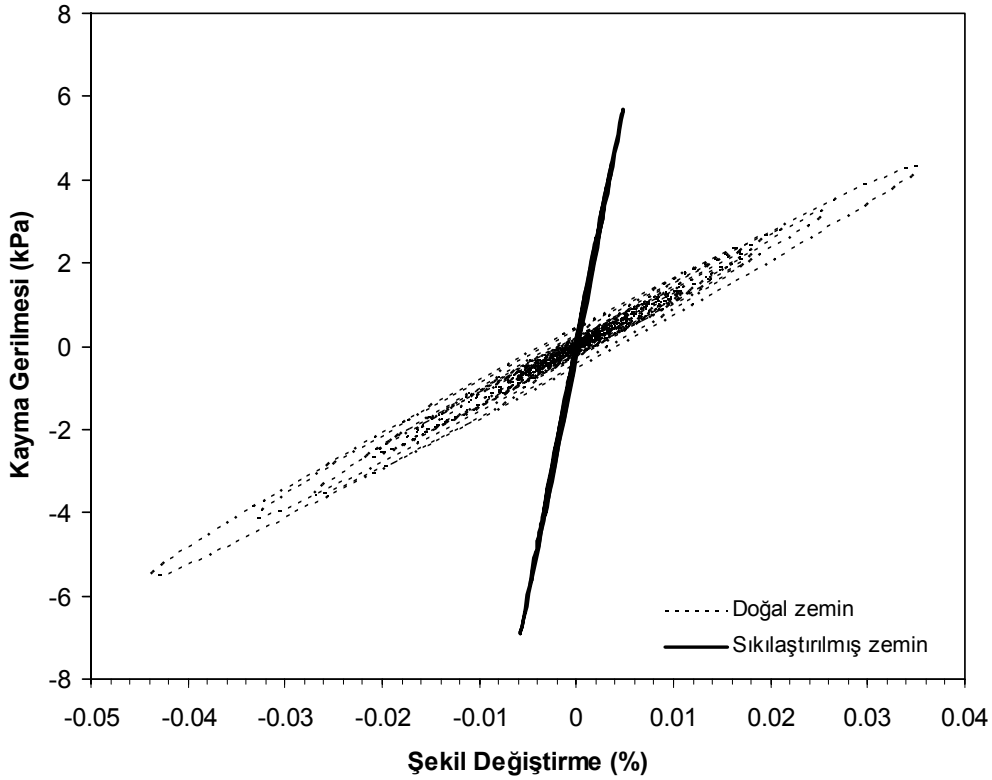


(c)

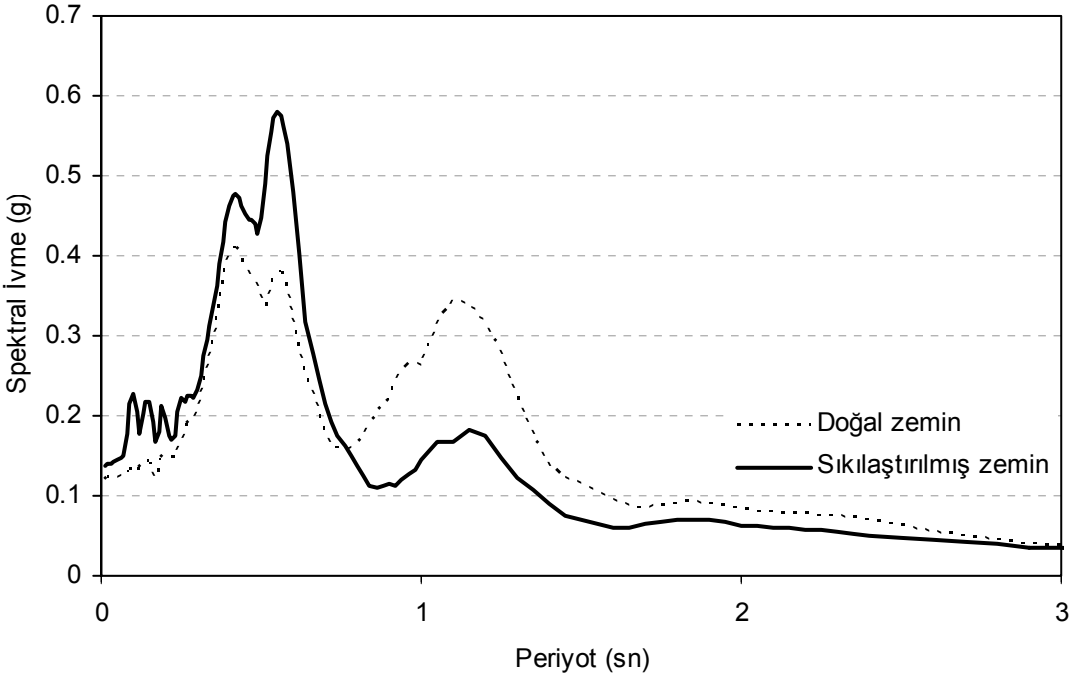
Şekil 20 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



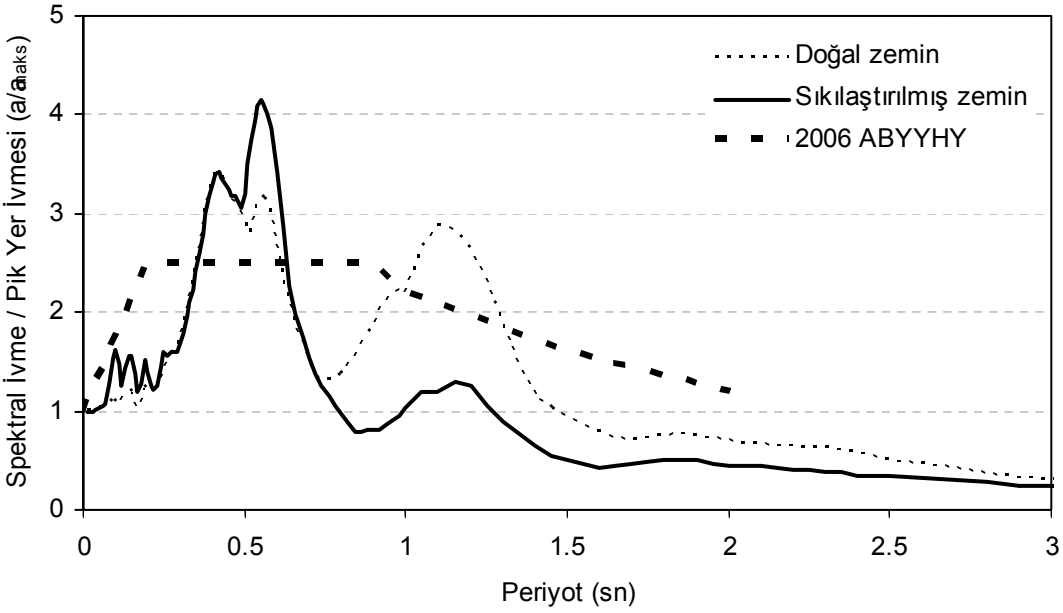
Şekil 21 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 22 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



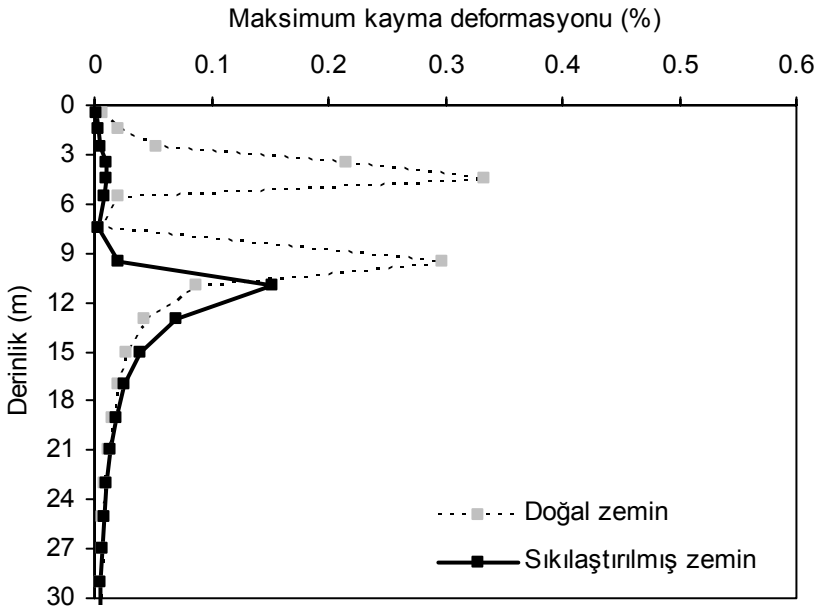
Şekil 23 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



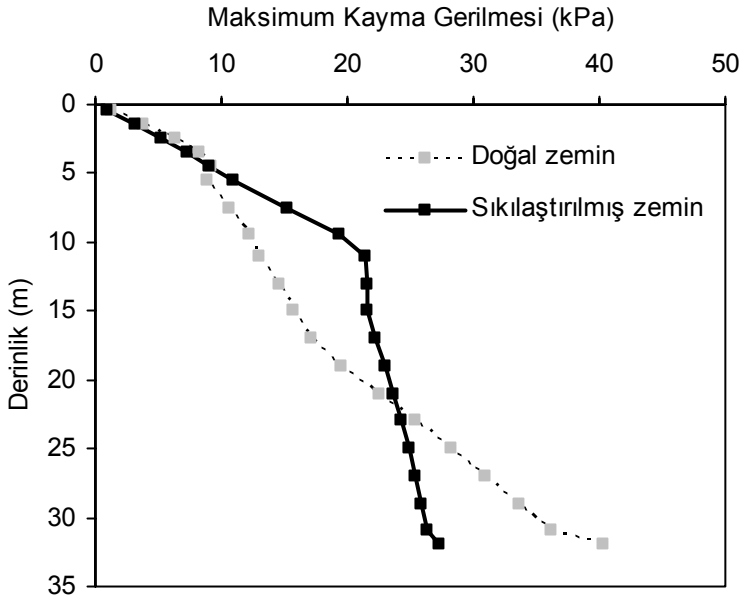
Şekil 24 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin Analizi

Yarımca Petkim Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

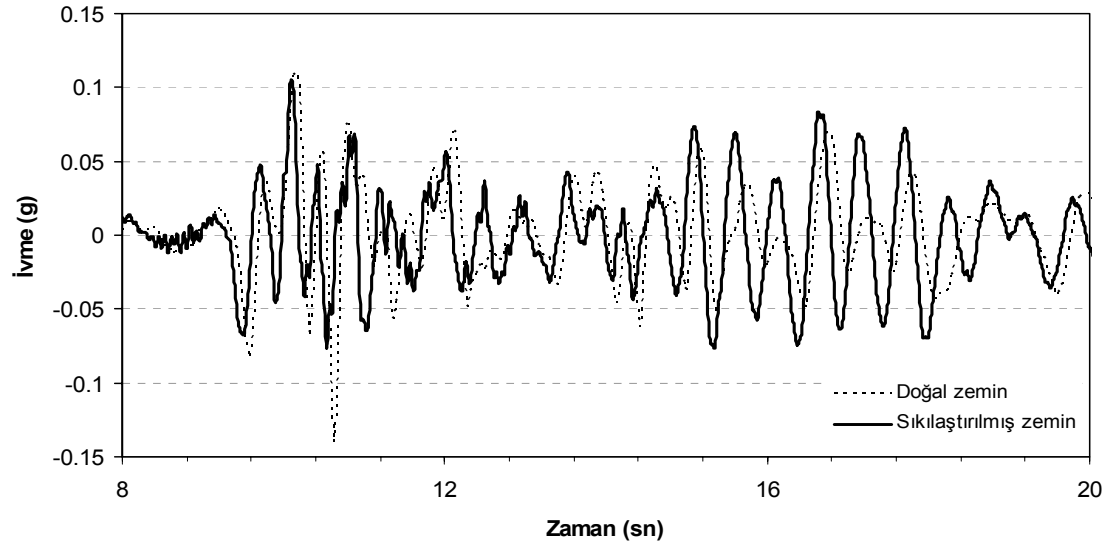


(a)

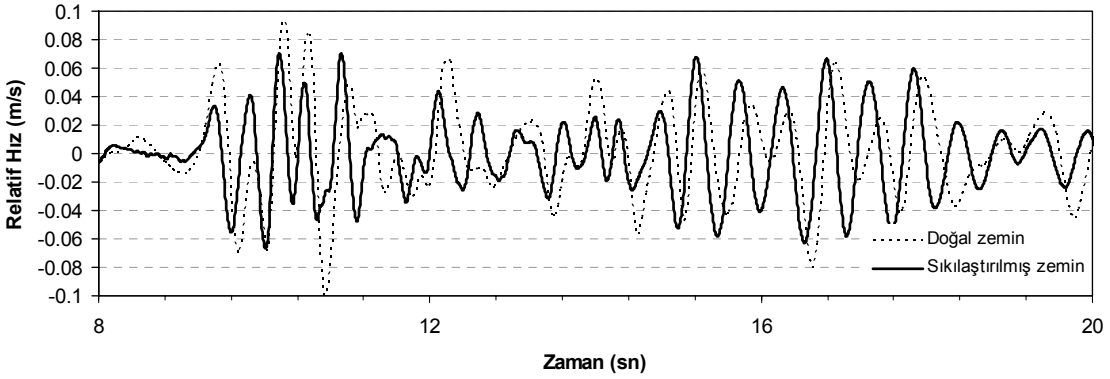


(b)

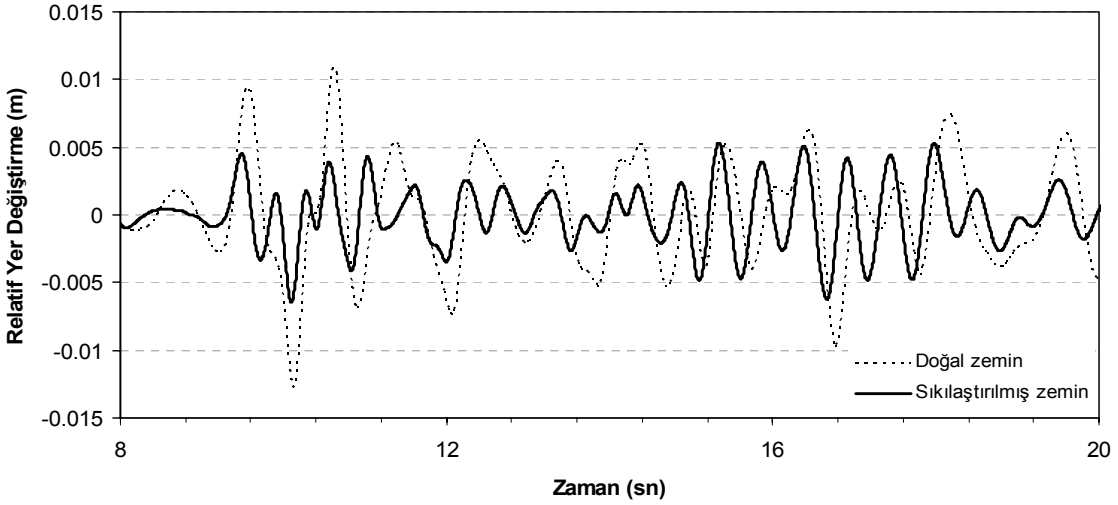
Şekil 25 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

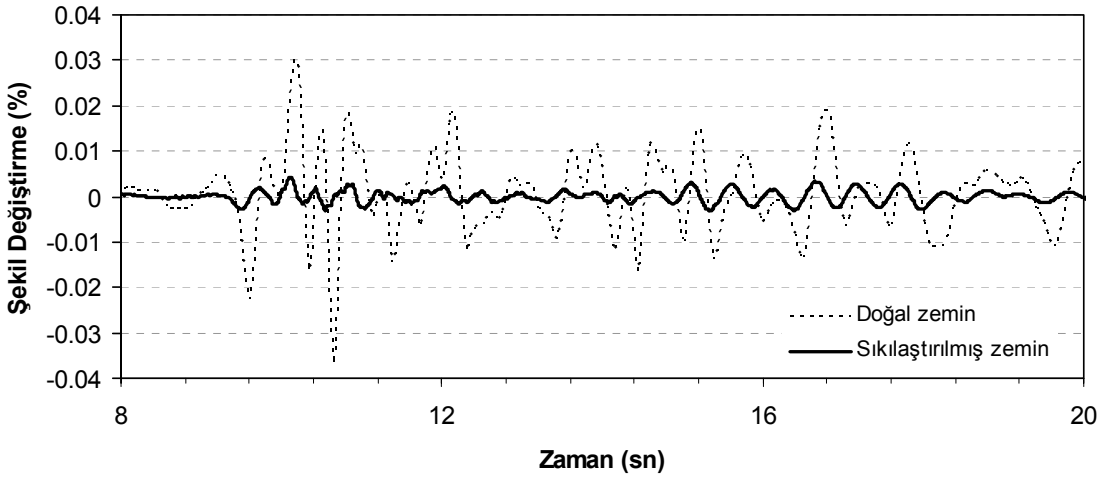


(b)

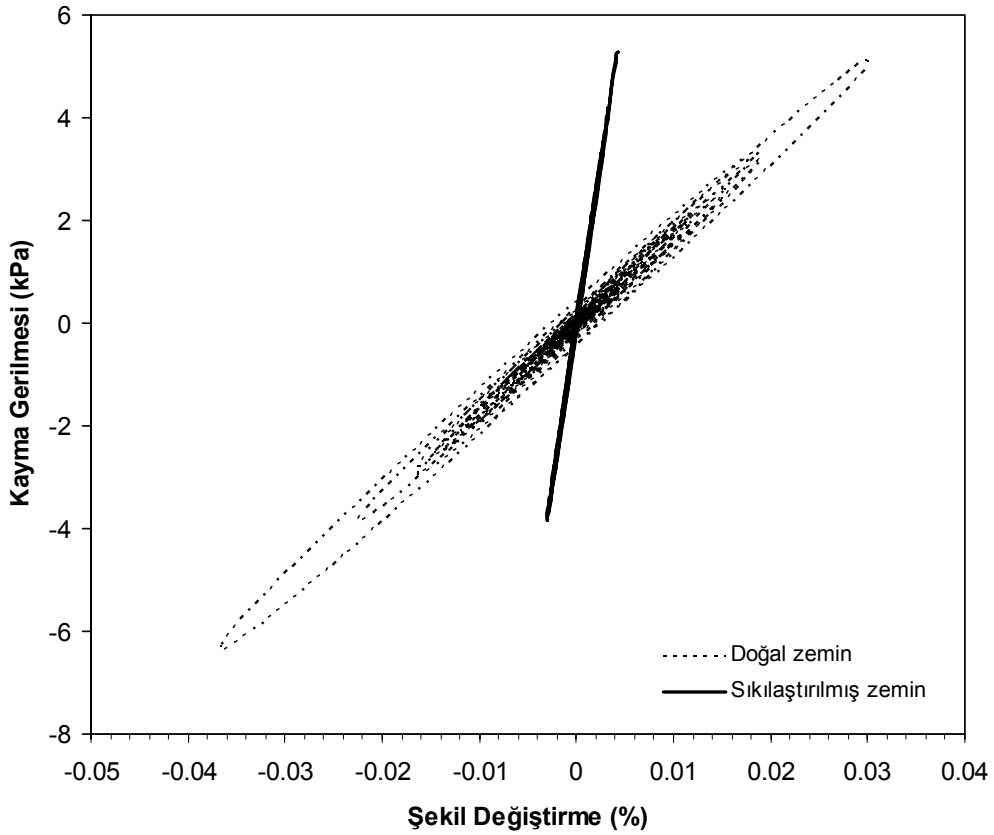


(c)

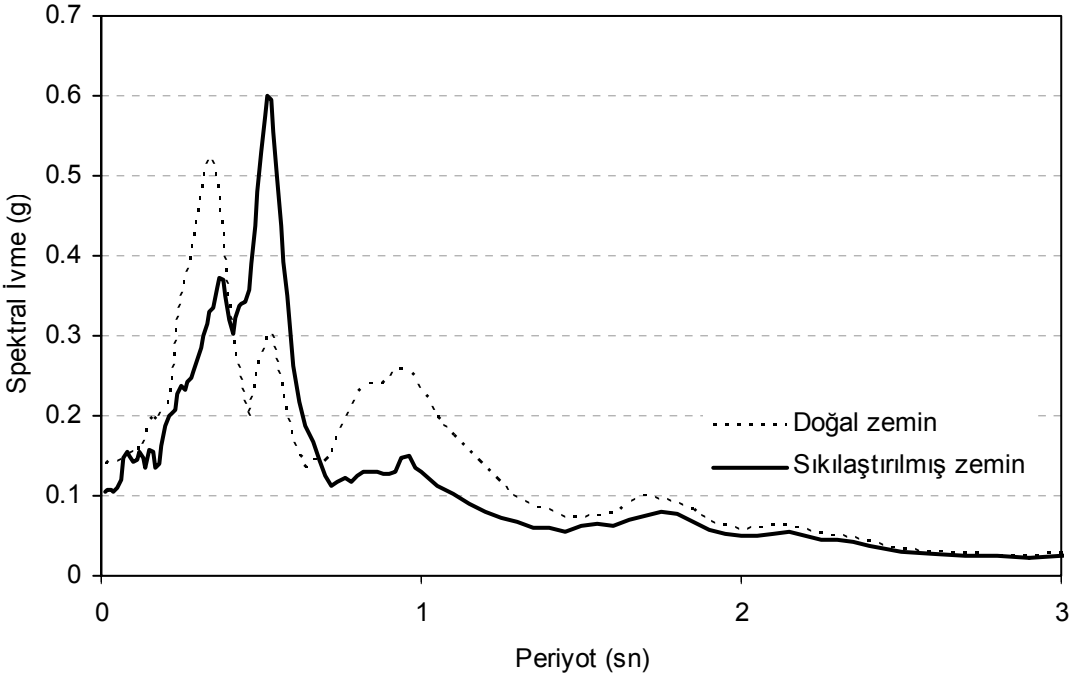
Şekil 26 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



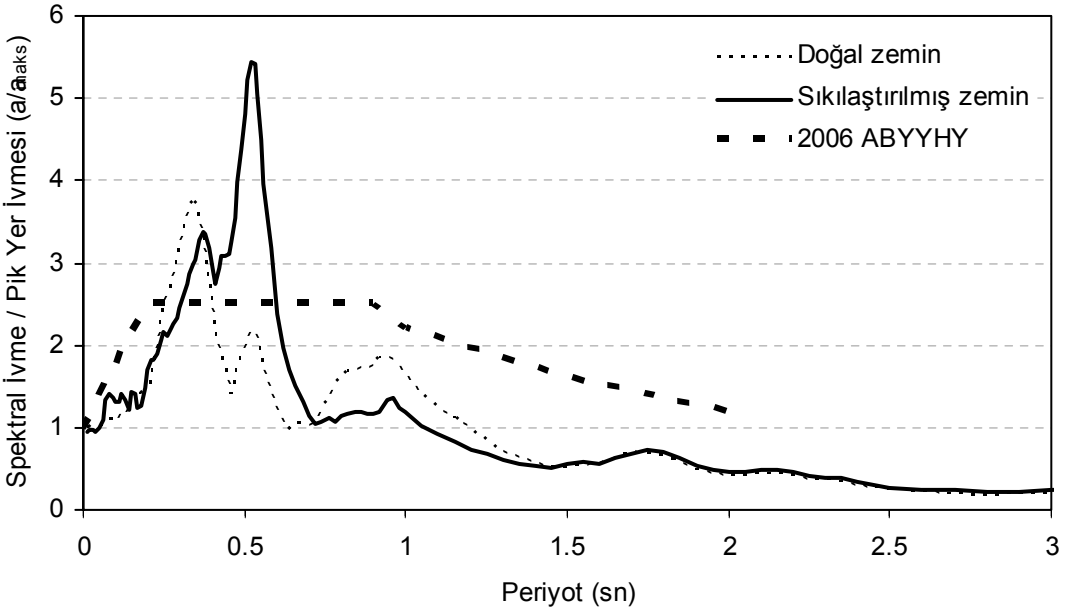
Şekil 27 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 28 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

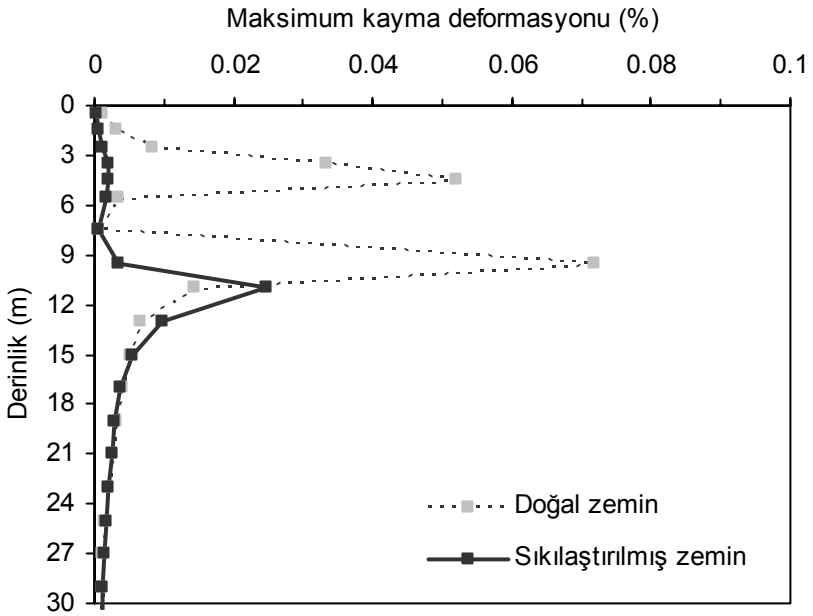


Şekil 29 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)

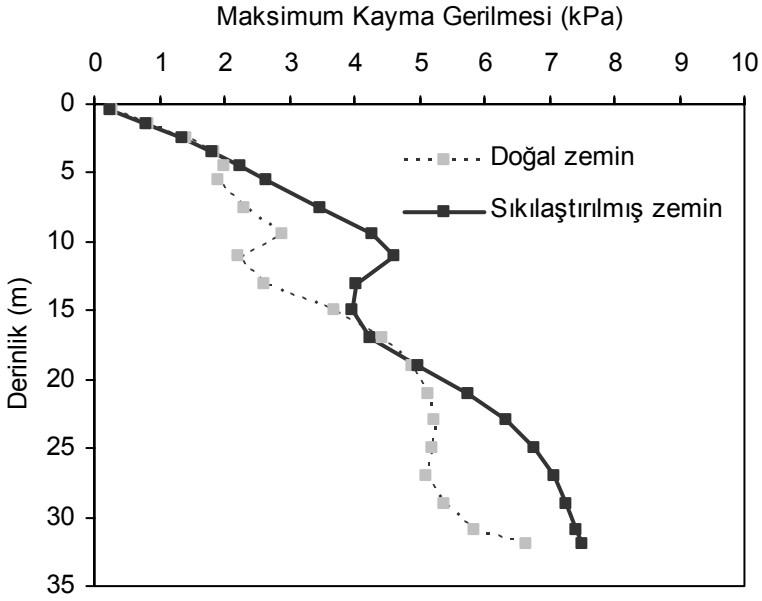


Şekil 30 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

Darıca Arçelik Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

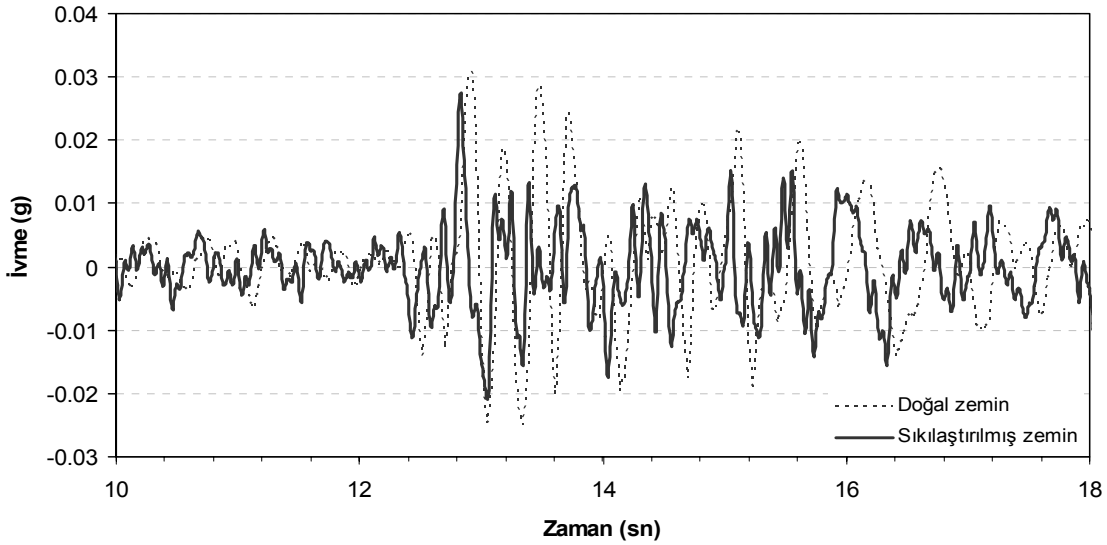


(a)

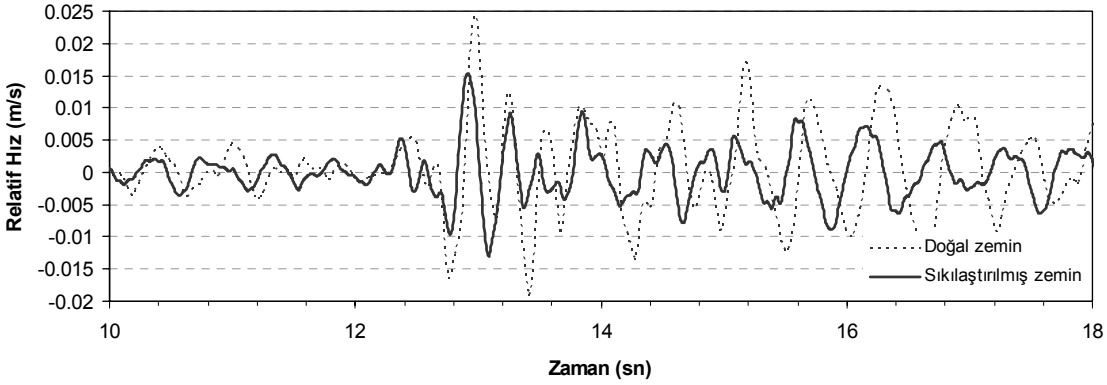


(b)

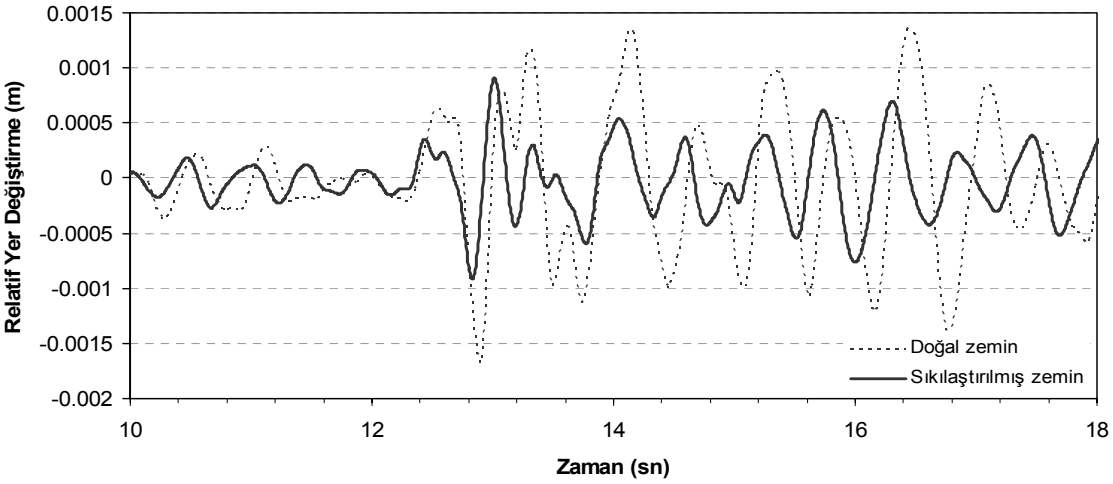
Şekil 31 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

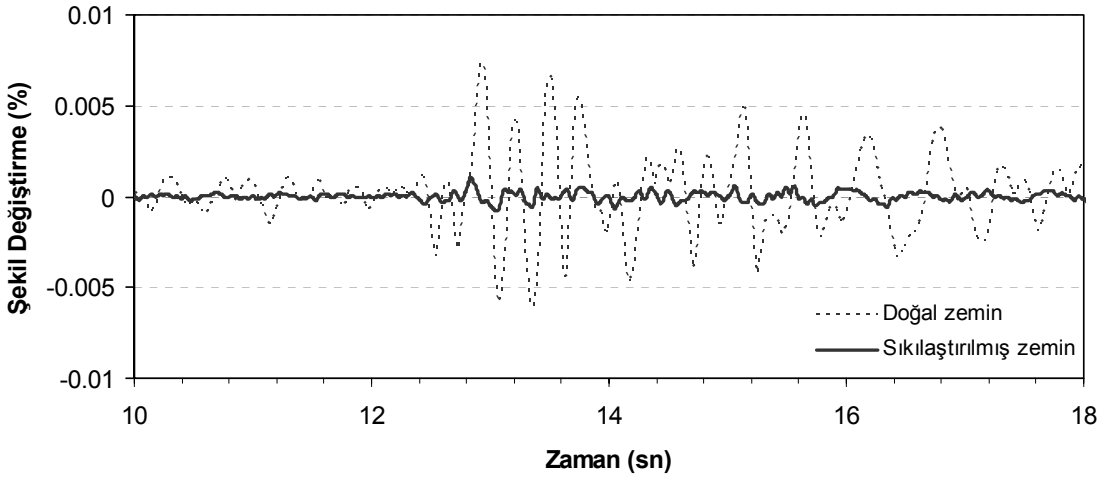


(b)

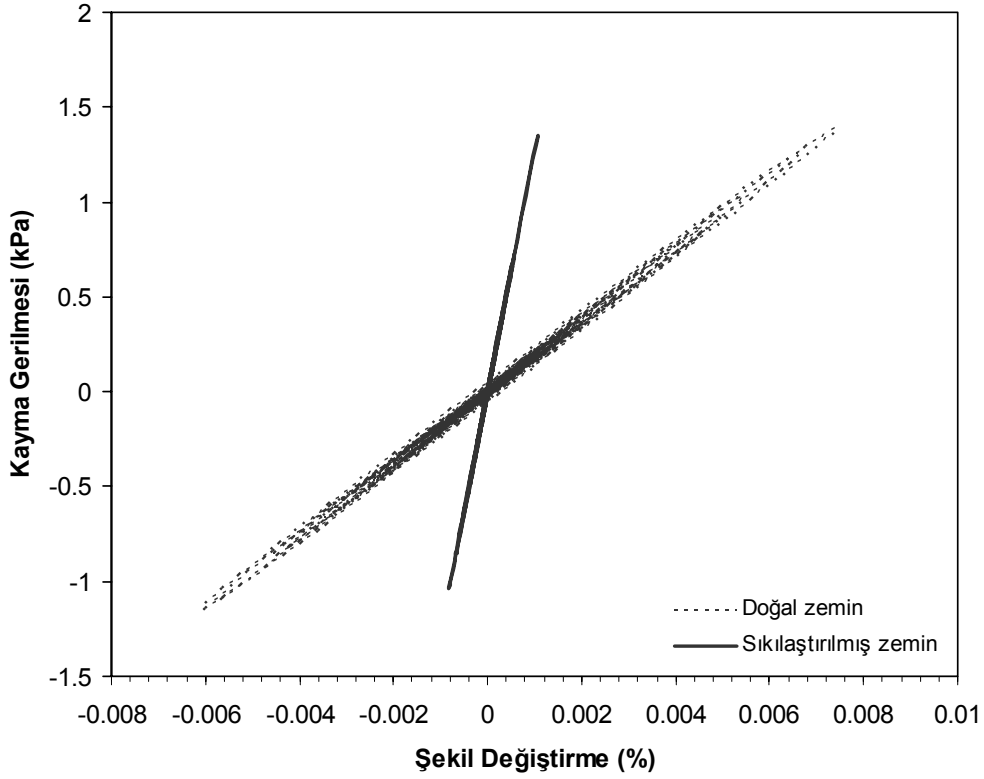


(c)

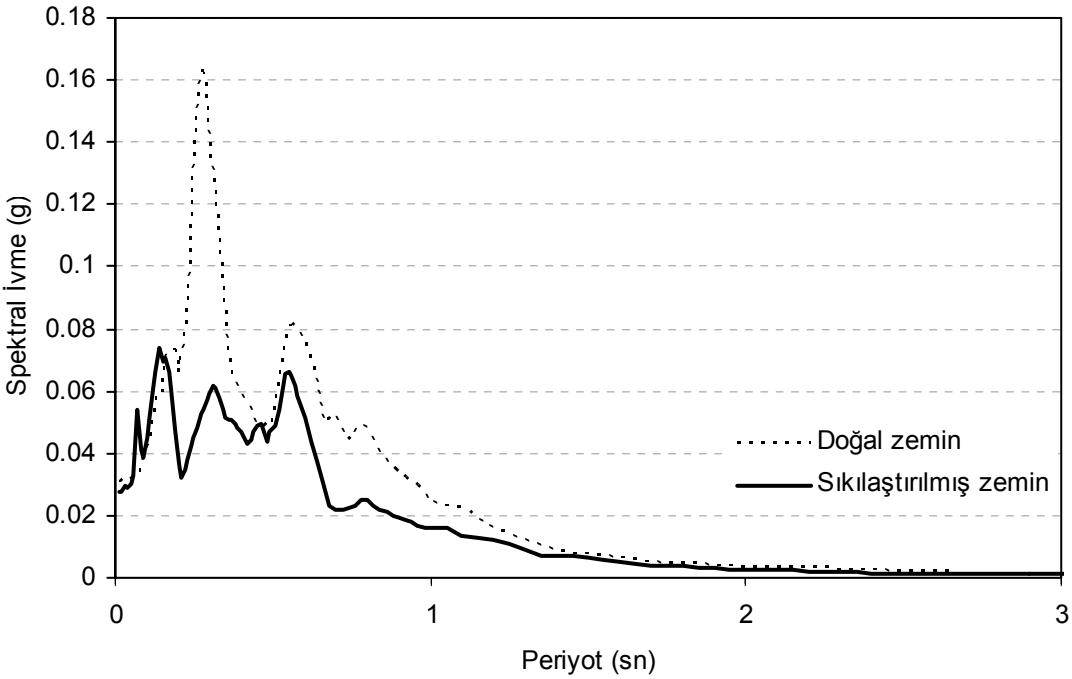
Şekil 32 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



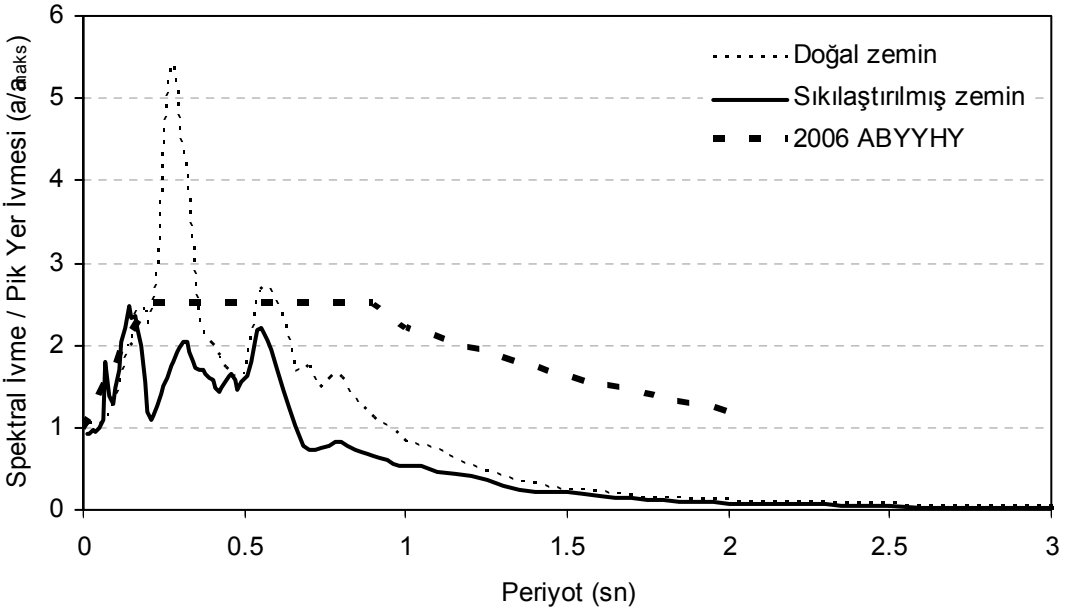
Şekil 33 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 34 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

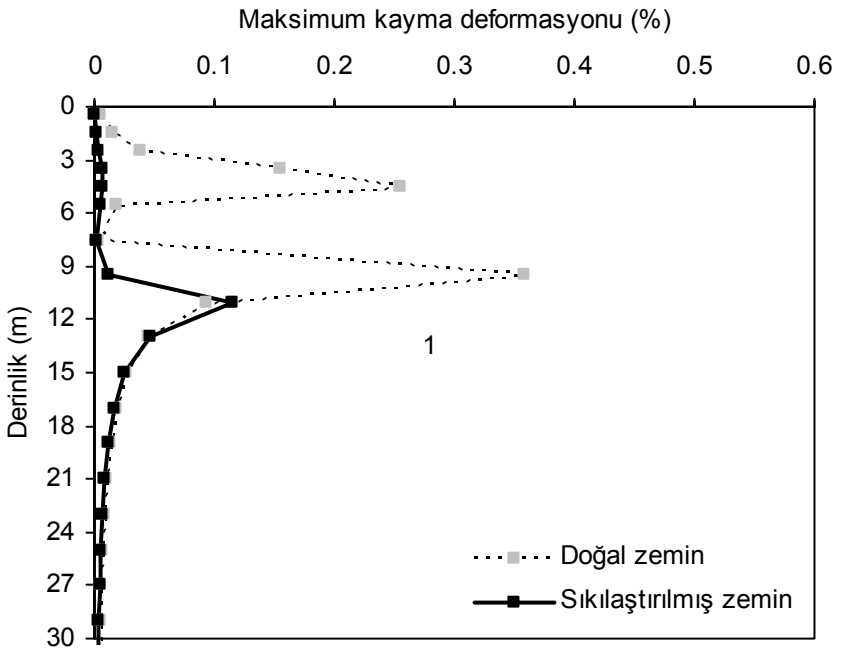


Şekil 35 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)

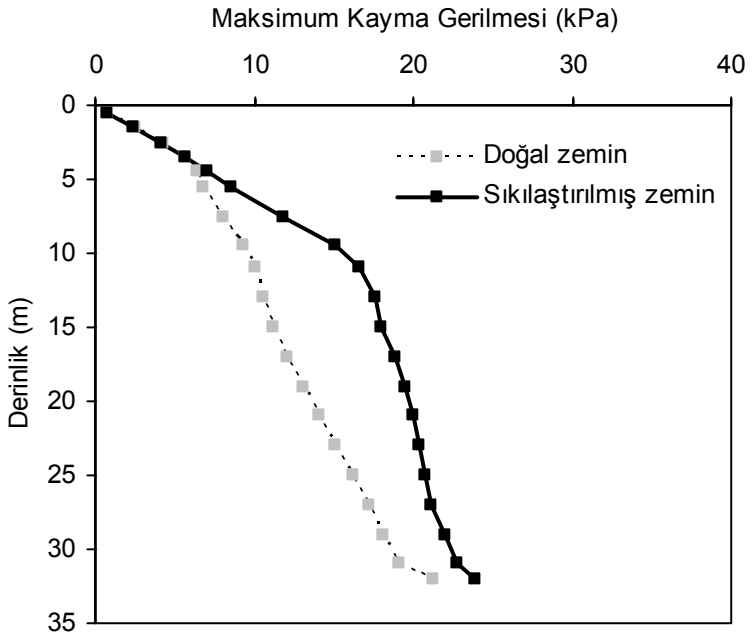


Şekil 36 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

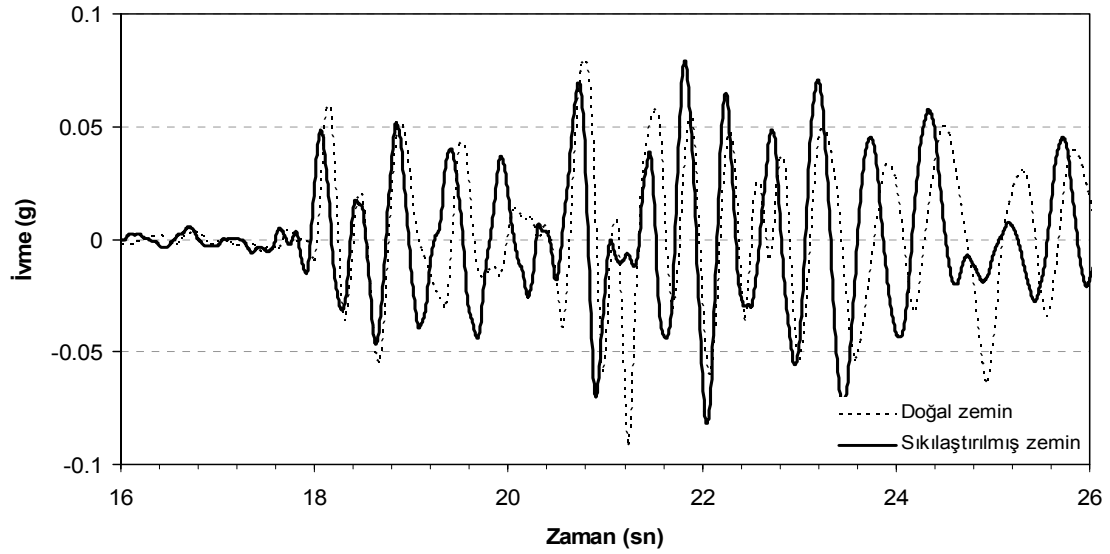


(a)

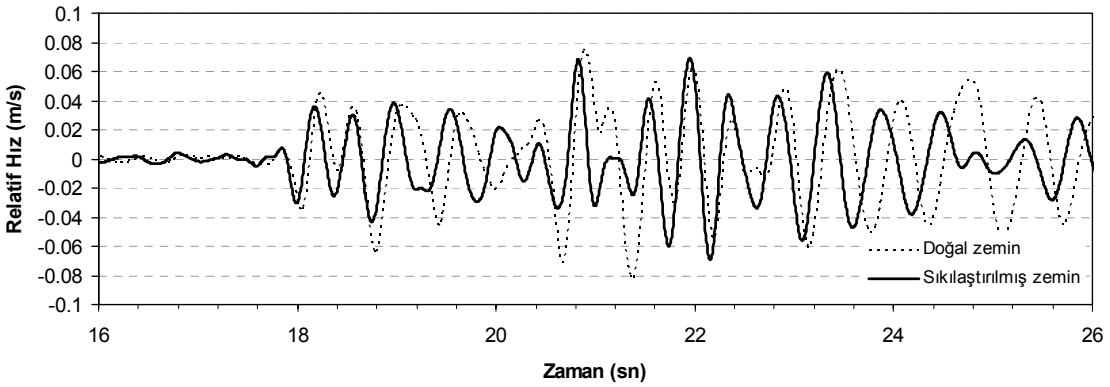


(b)

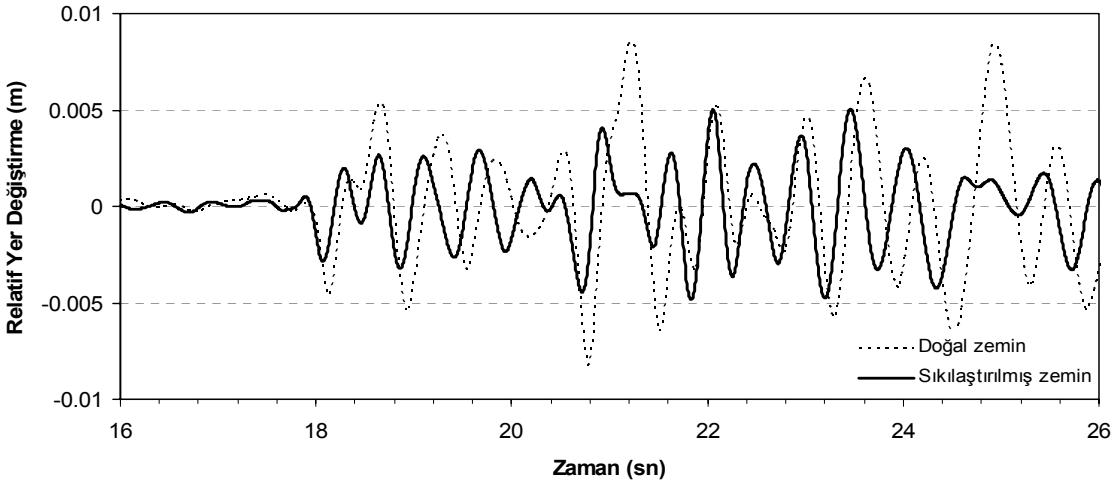
Şekil 37 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

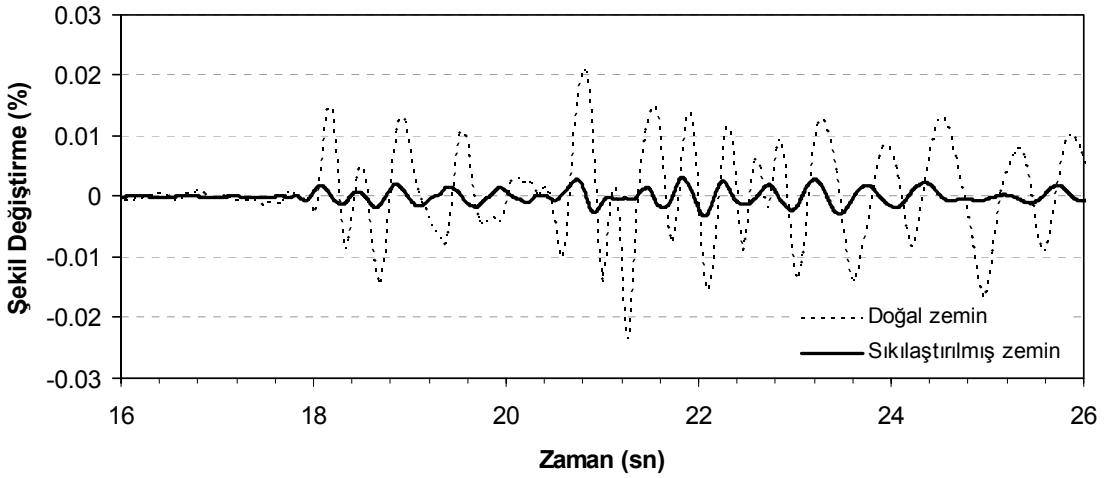


(b)

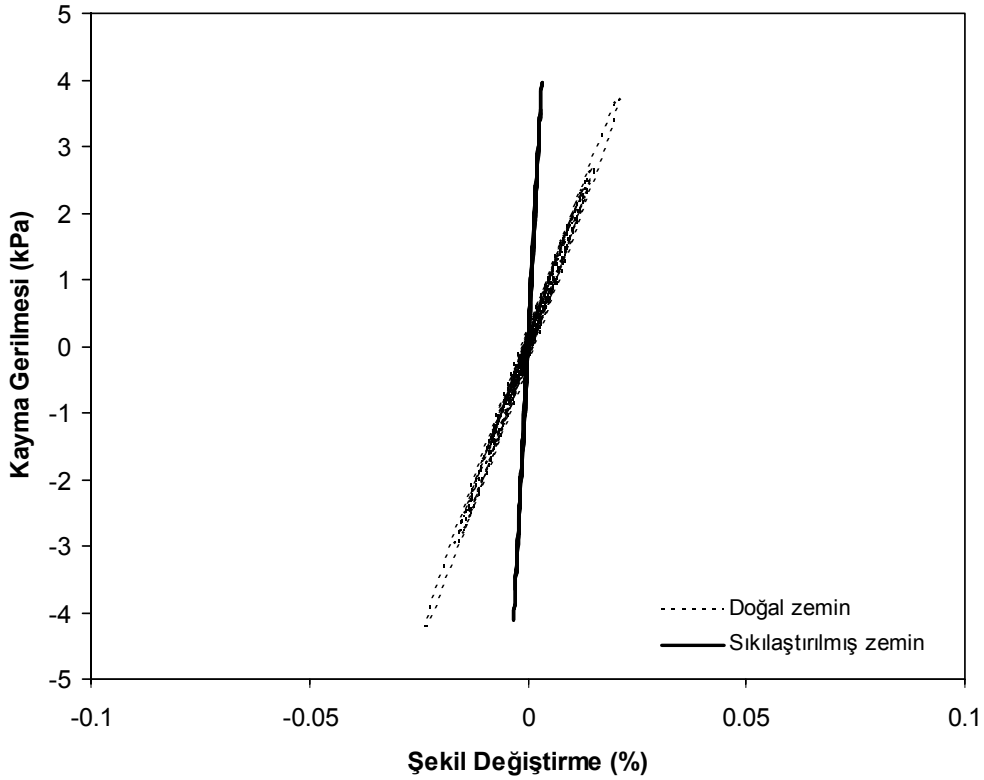


(c)

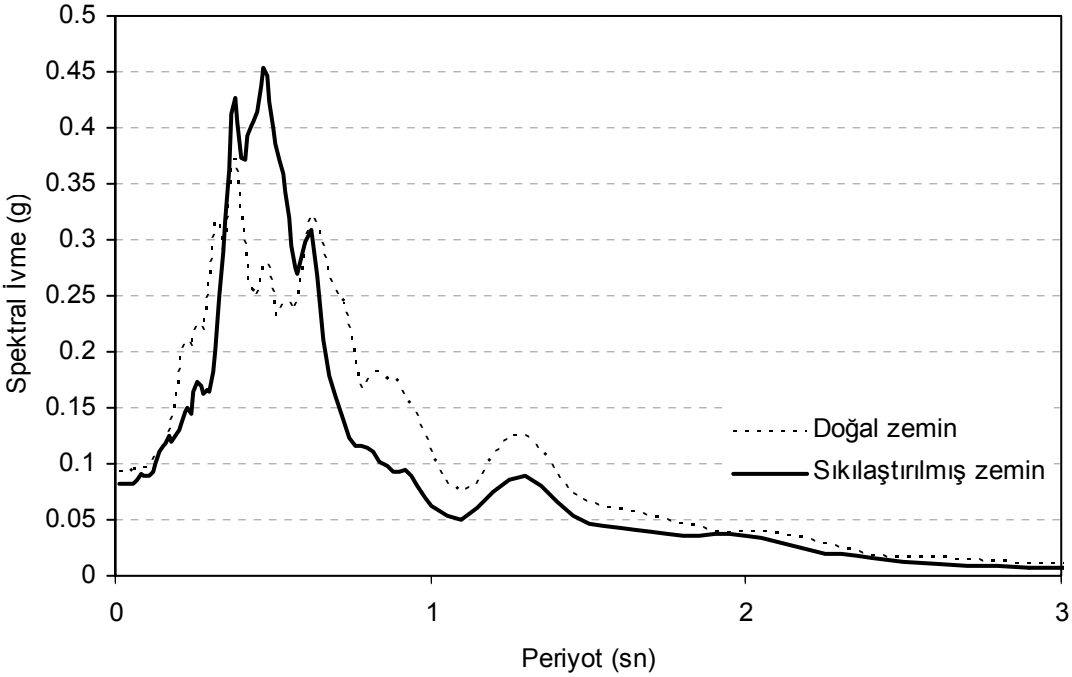
Şekil 38 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



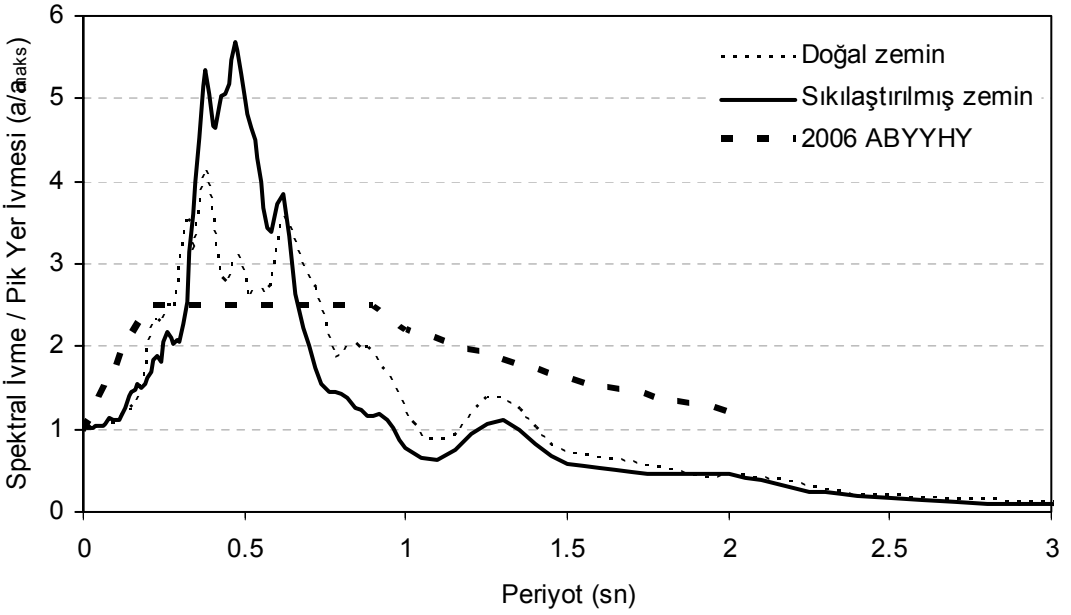
Şekil 39 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



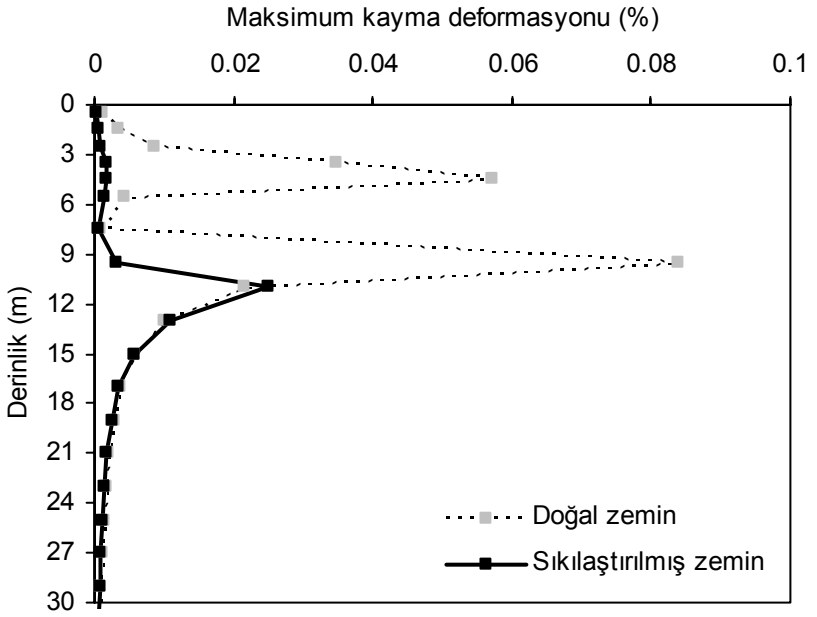
Şekil 40 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



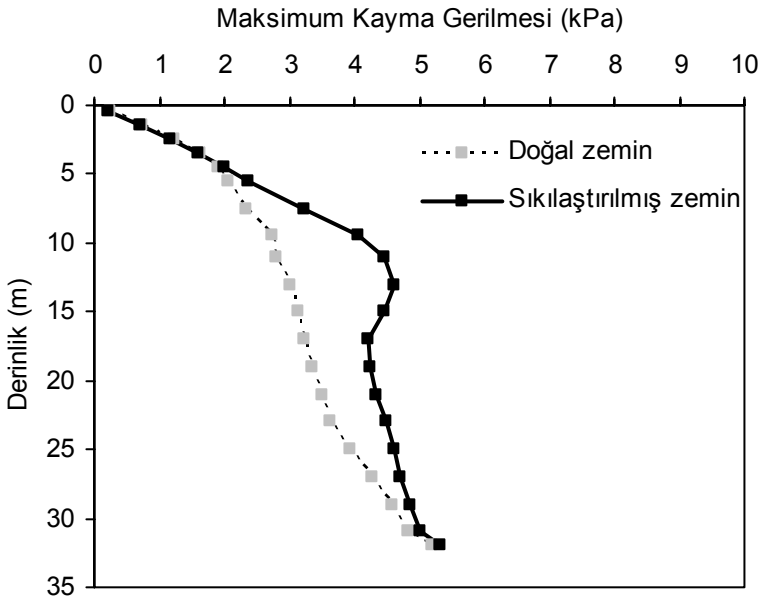
Şekil 41 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 42 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

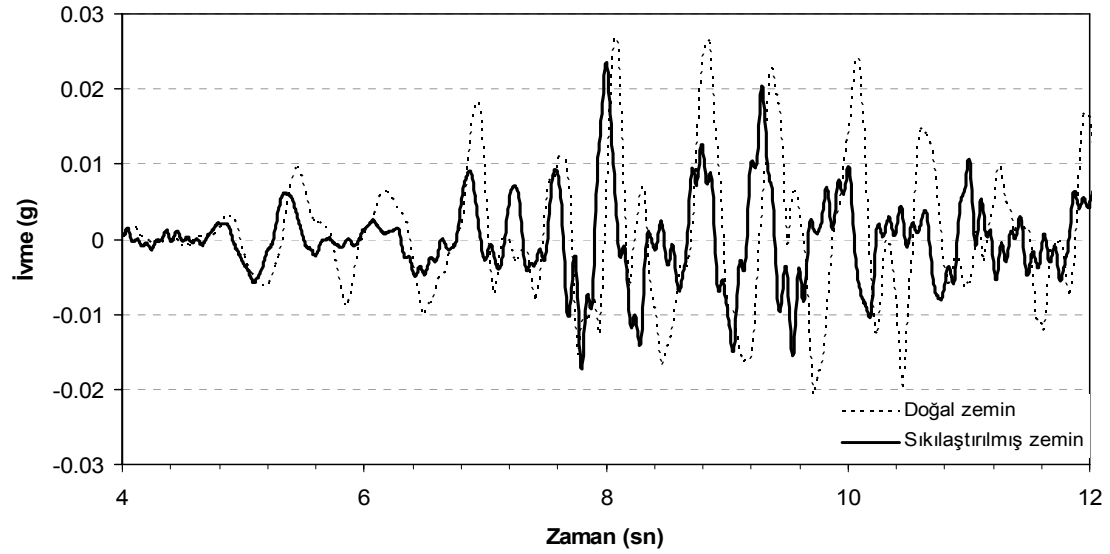


(a)

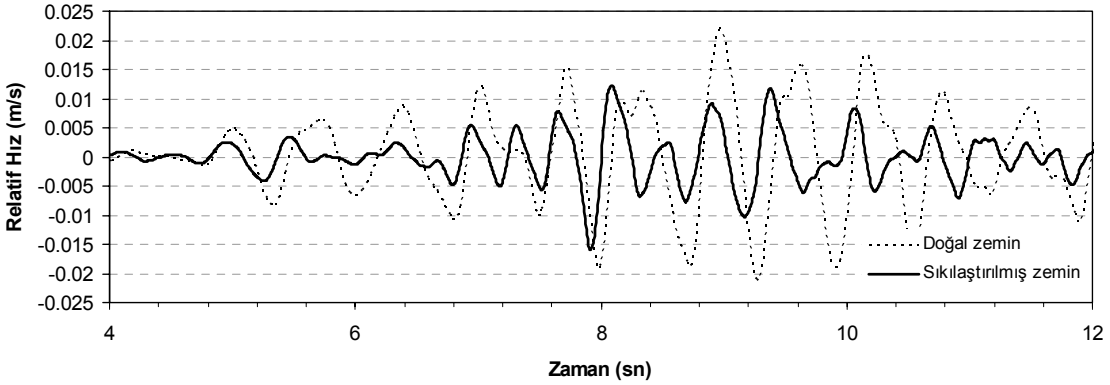


(b)

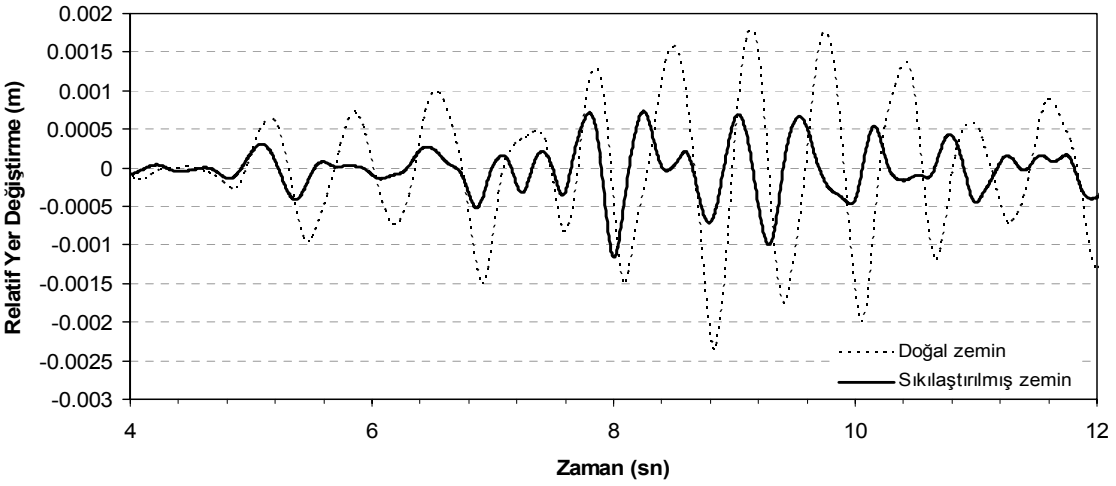
Şekil 43 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

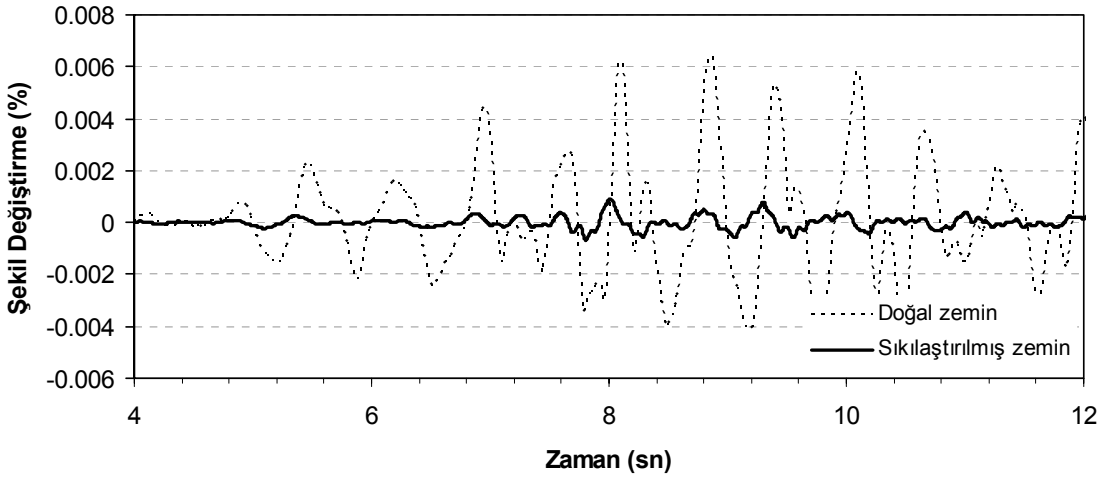


(b)

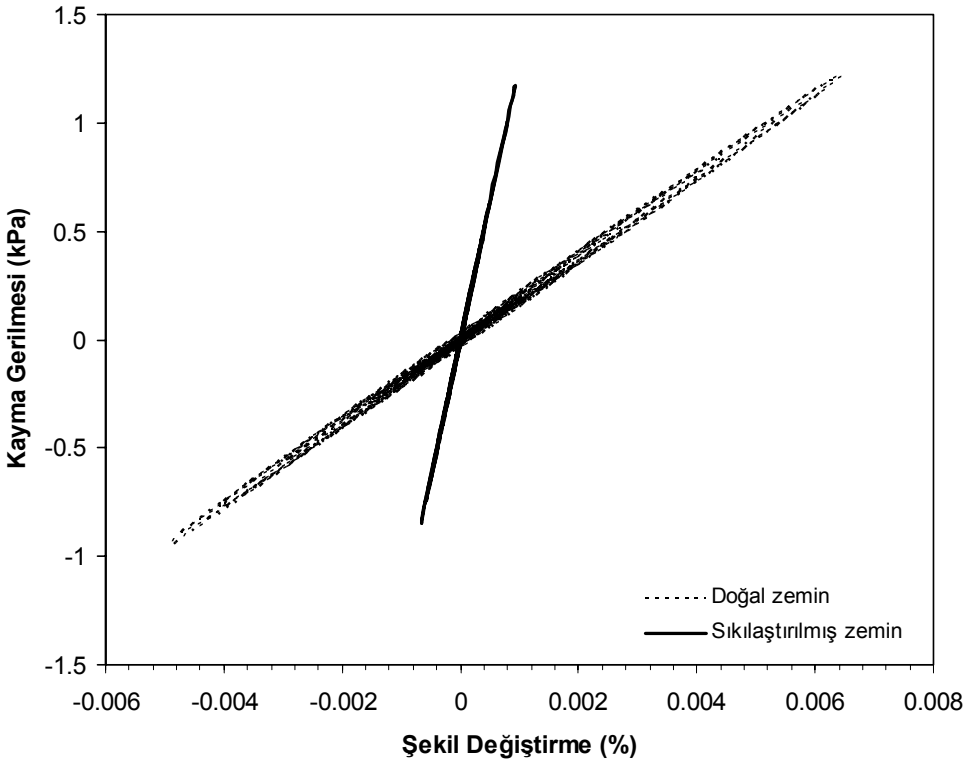


(c)

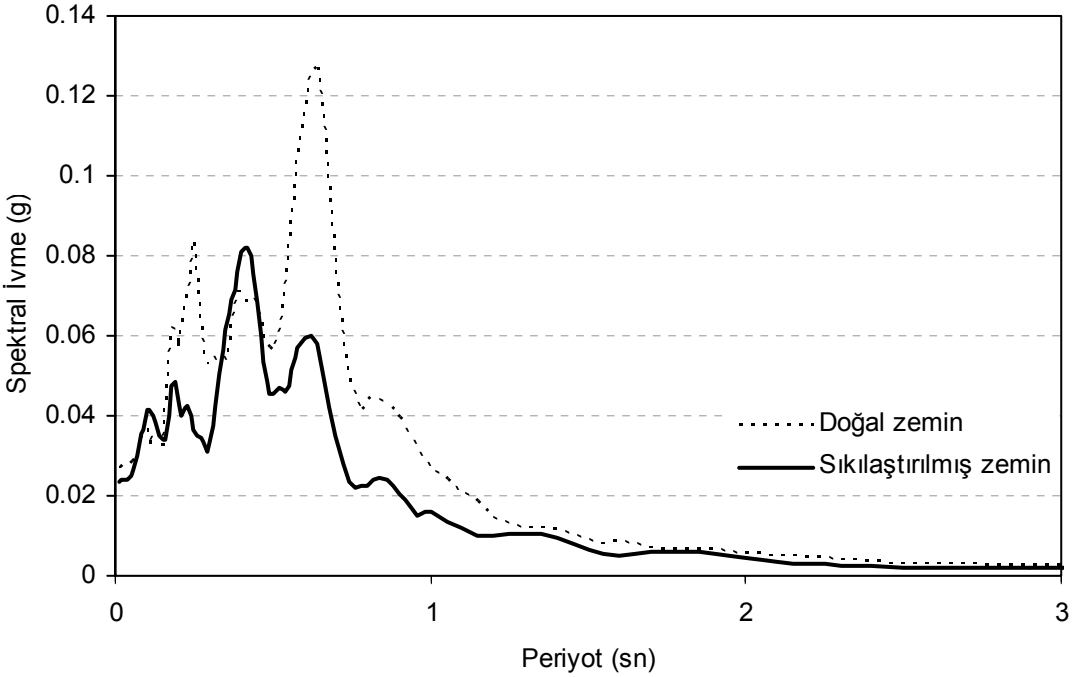
Şekil 44 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



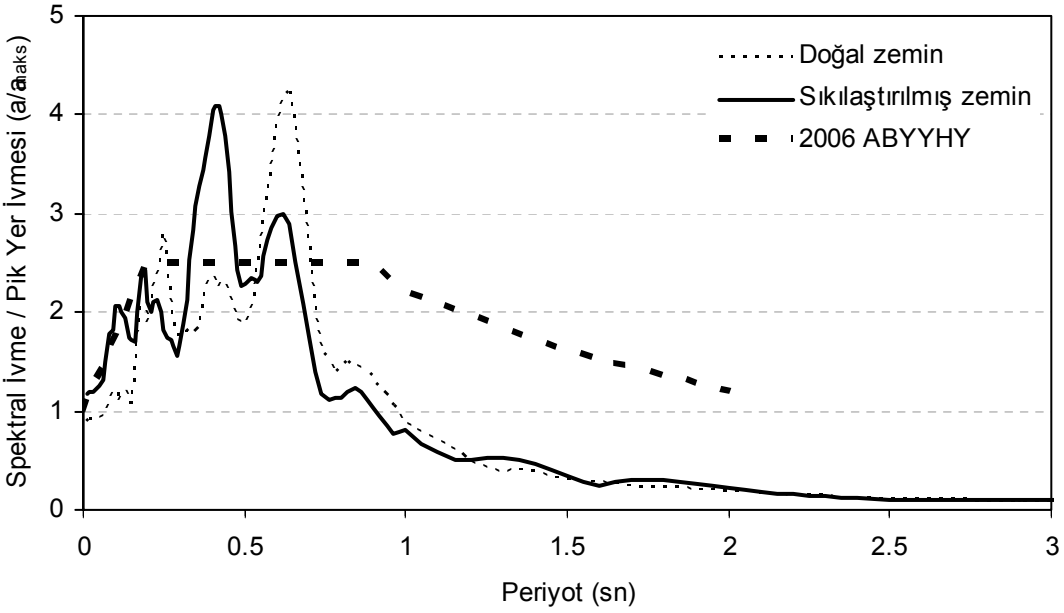
Şekil 45 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 46 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



Şekil 47 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)

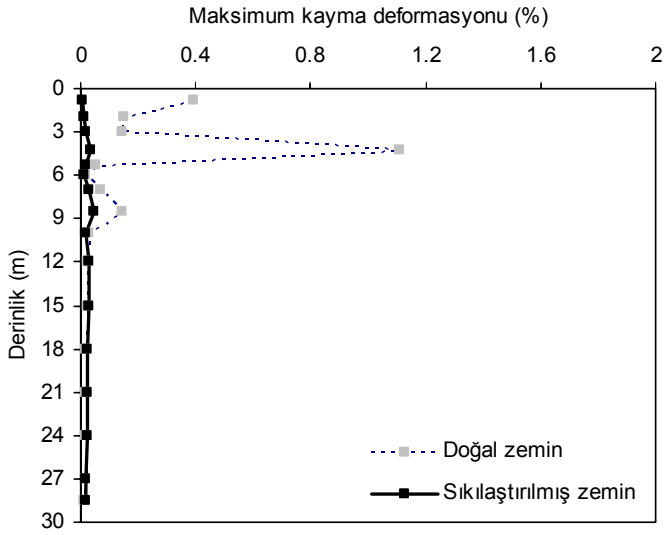


Şekil 48 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

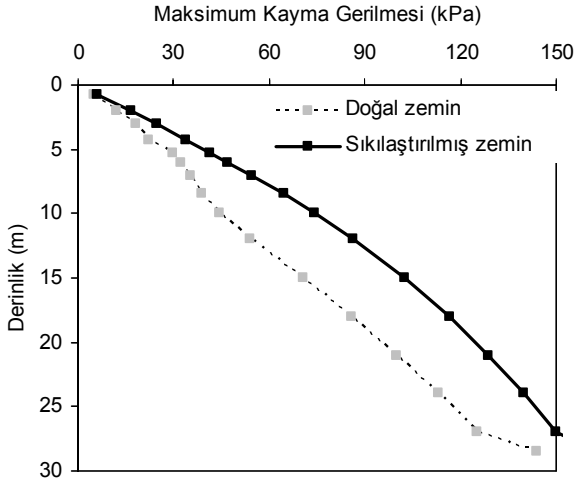
B. ZEMİN PROFİLİ “B” İÇİN ÇİZİLEN GRAFİKLER

17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi’nin Analizi

Yarımca Petkim Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

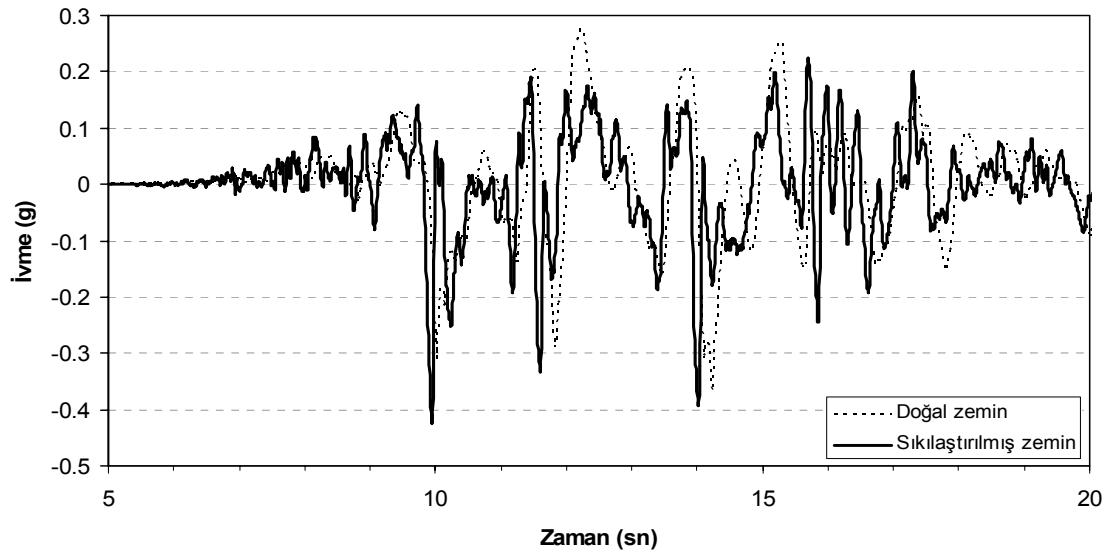


(a)

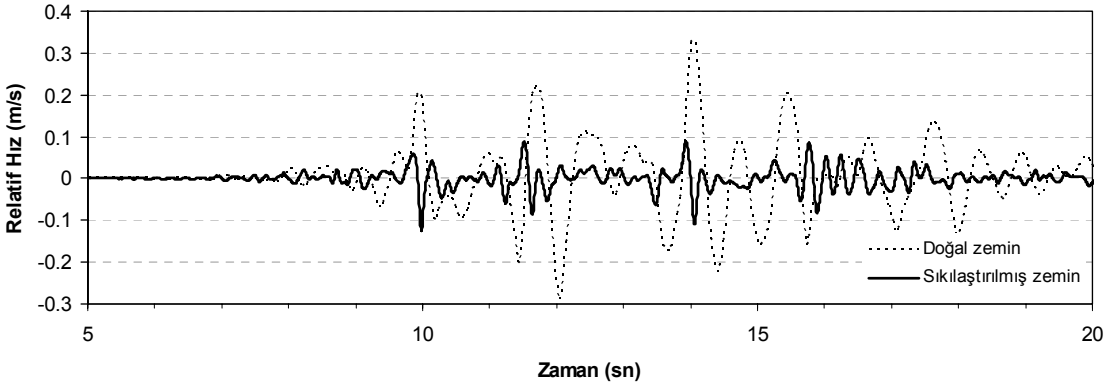


(b)

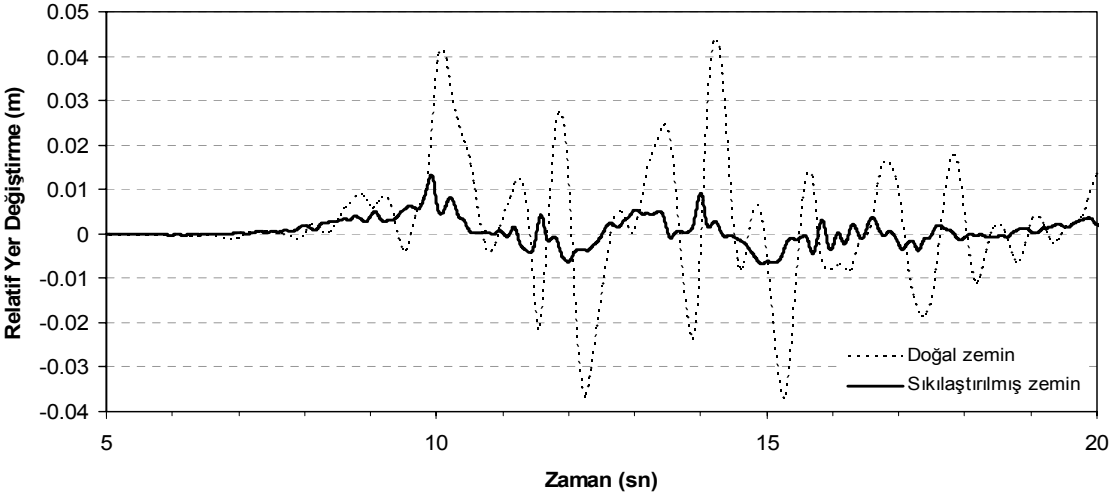
Şekil 1 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

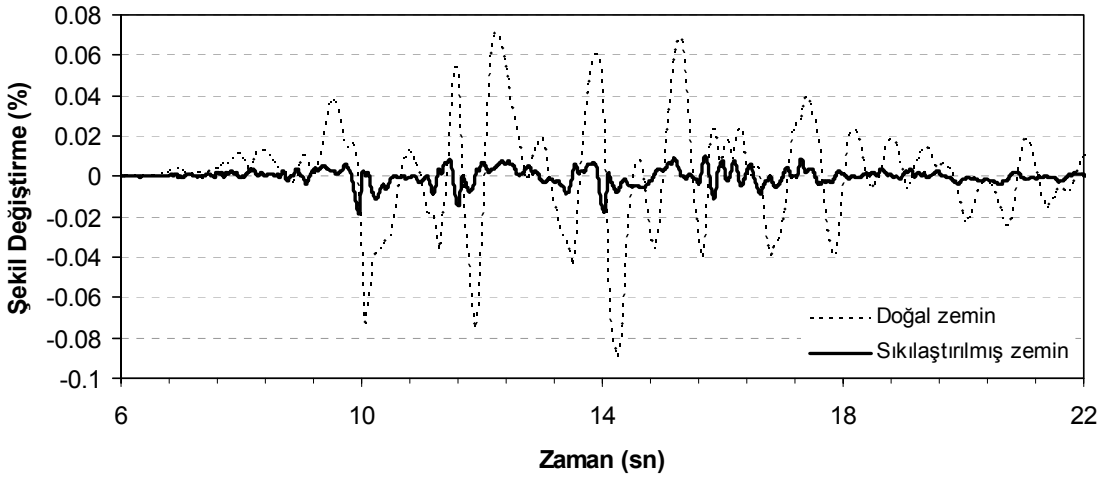


(b)

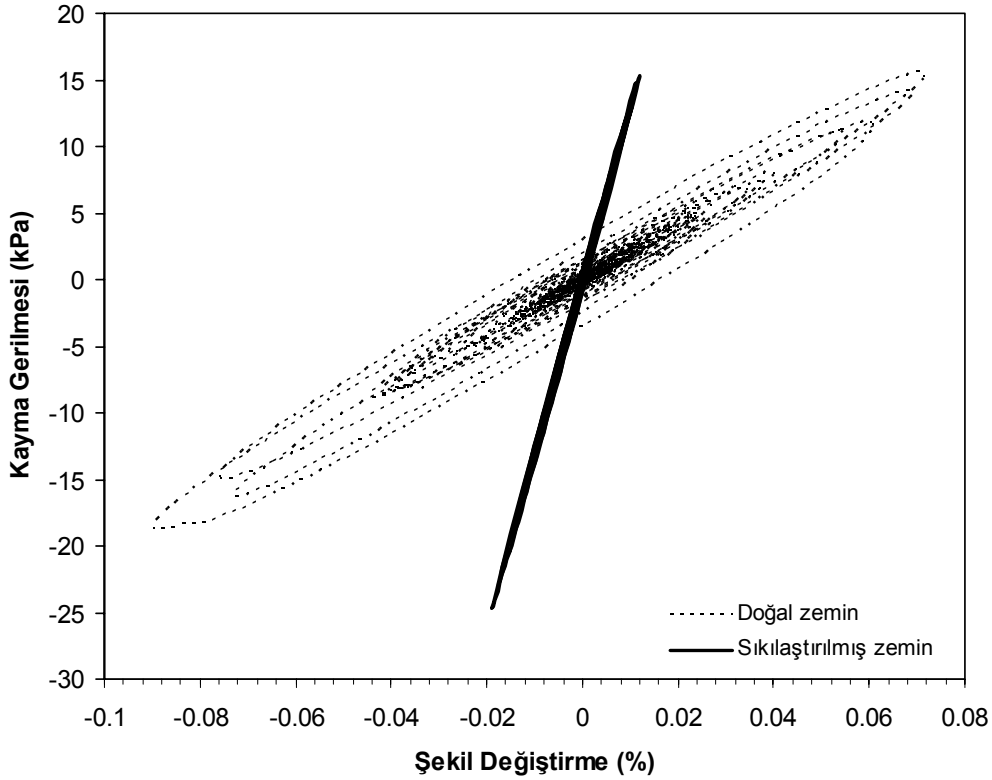


(c)

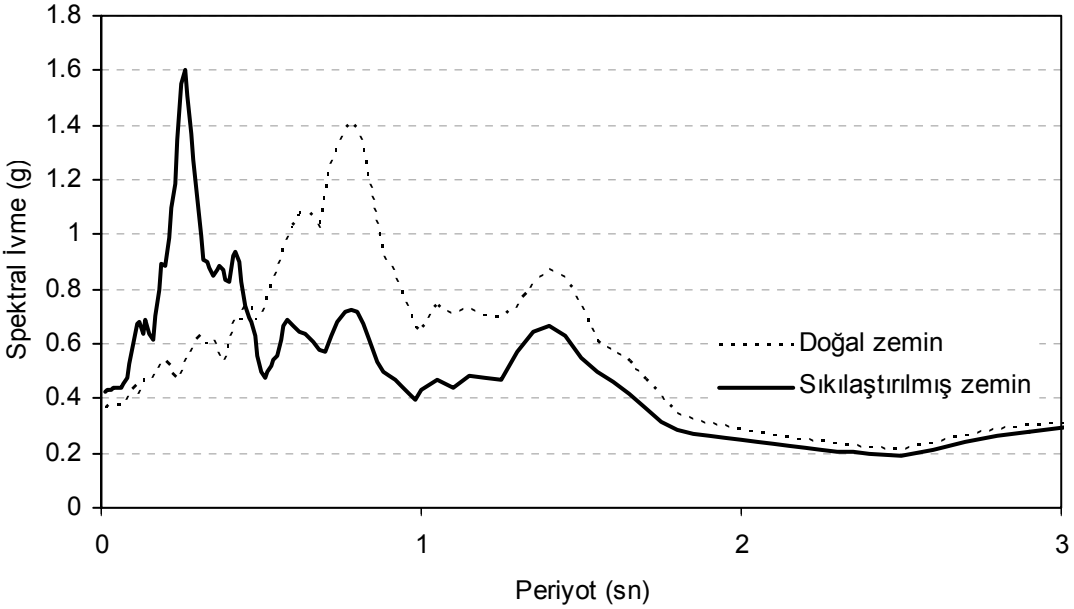
Şekil 2 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



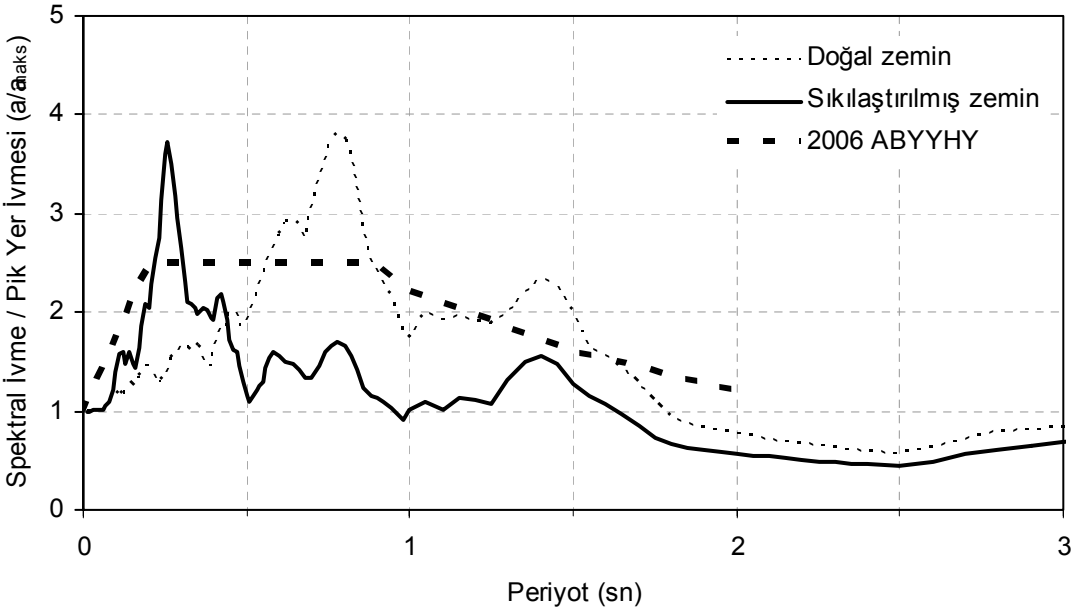
Şekil 3 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



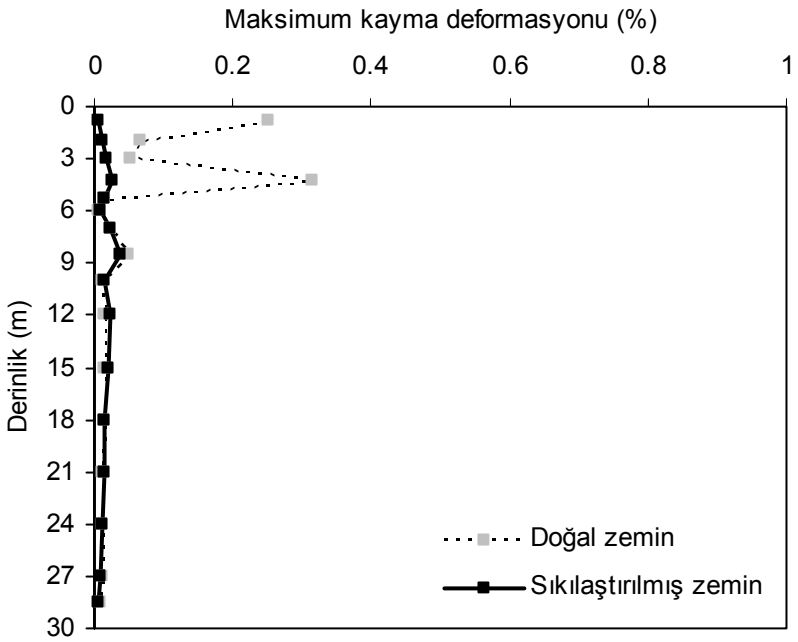
Şekil 4 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



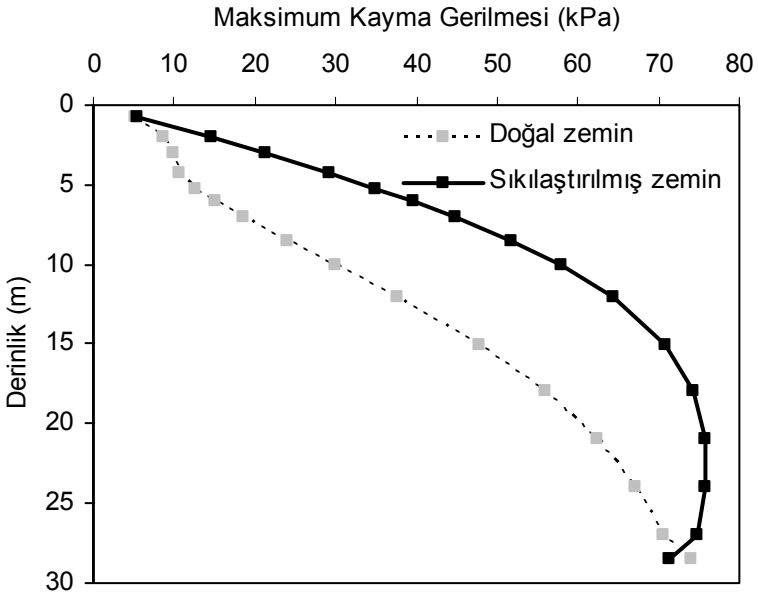
Şekil 5 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 6 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

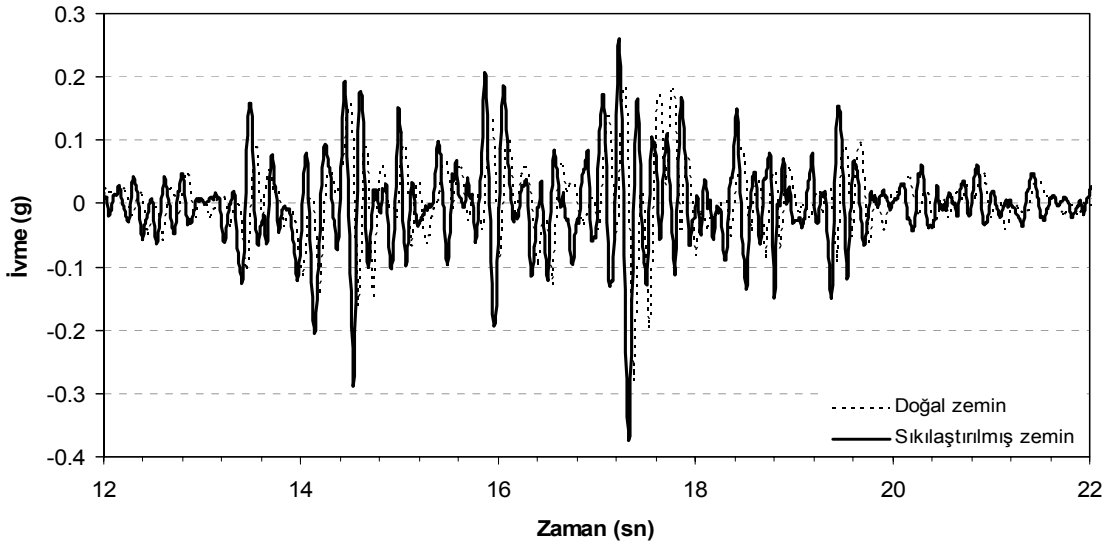


(a)

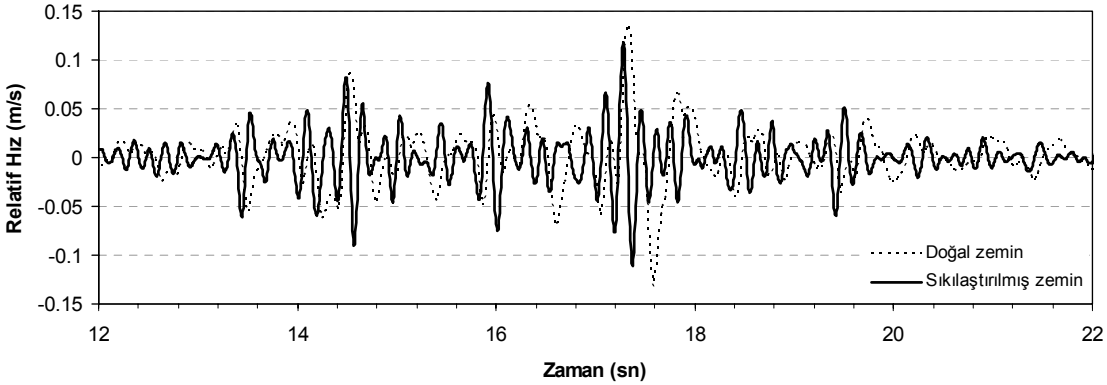


(b)

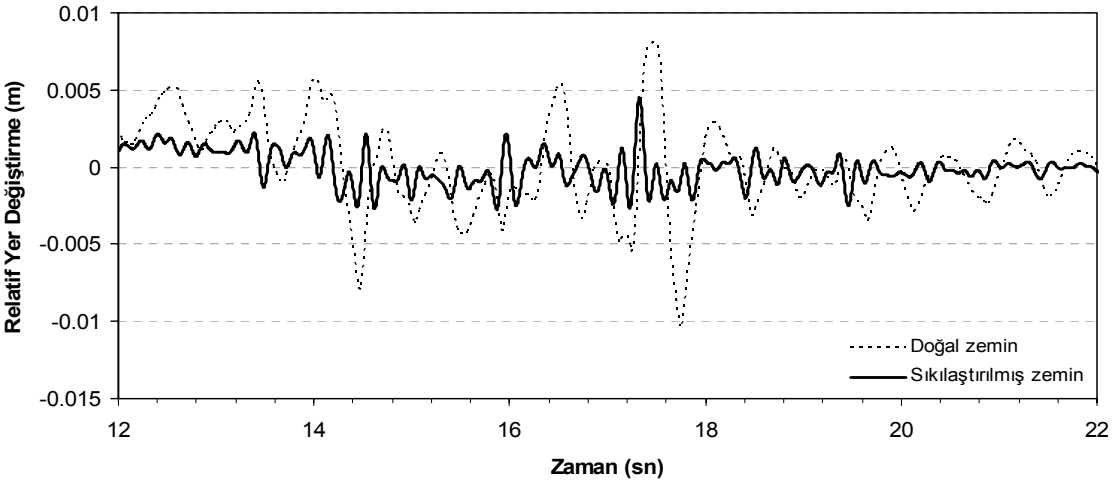
Şekil 7 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

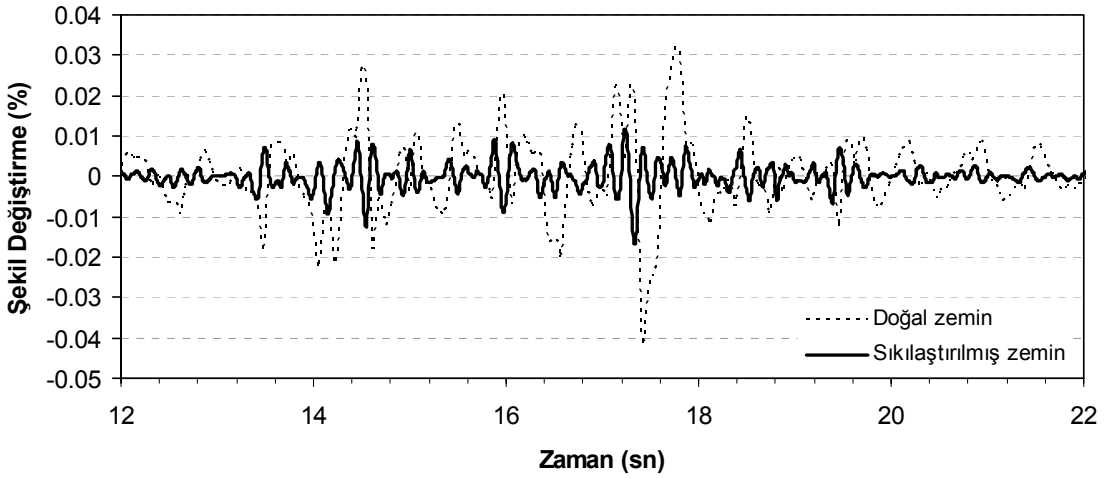


(b)

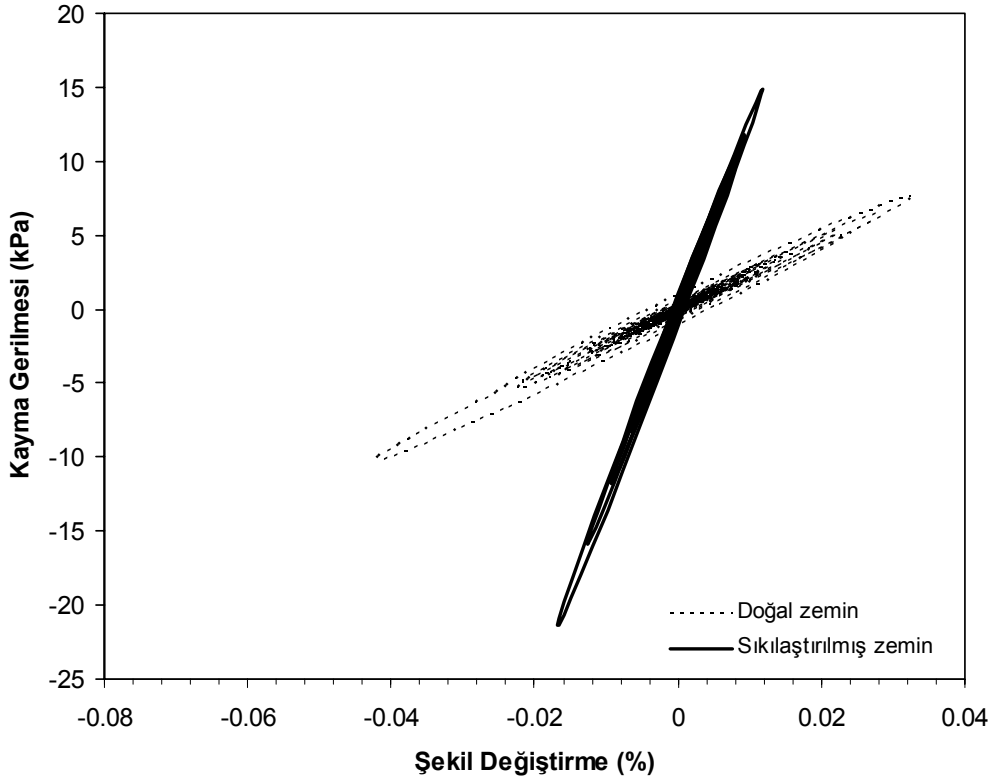


(c)

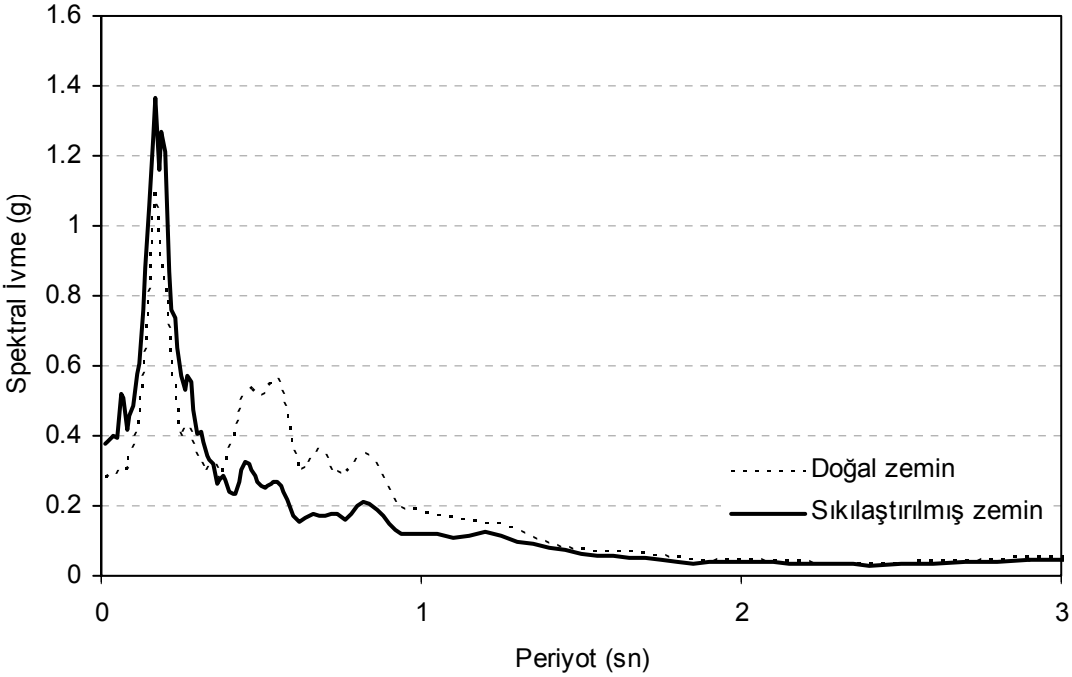
Şekil 8 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



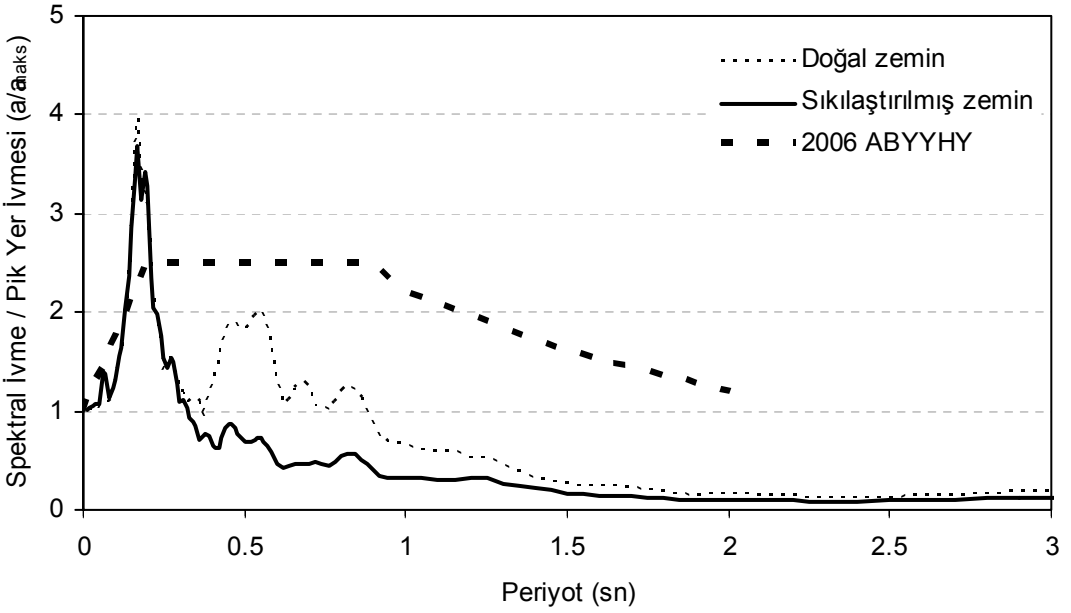
Şekil 9 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



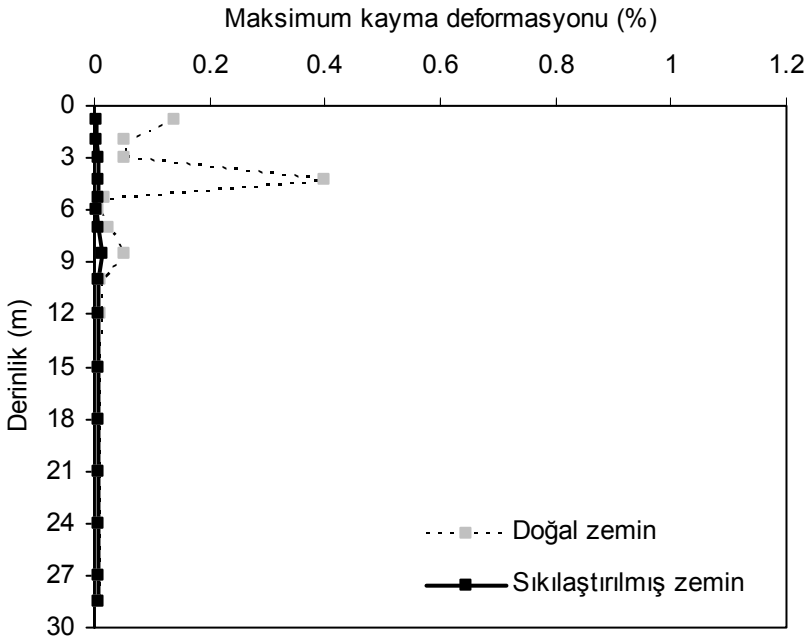
Şekil 10 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



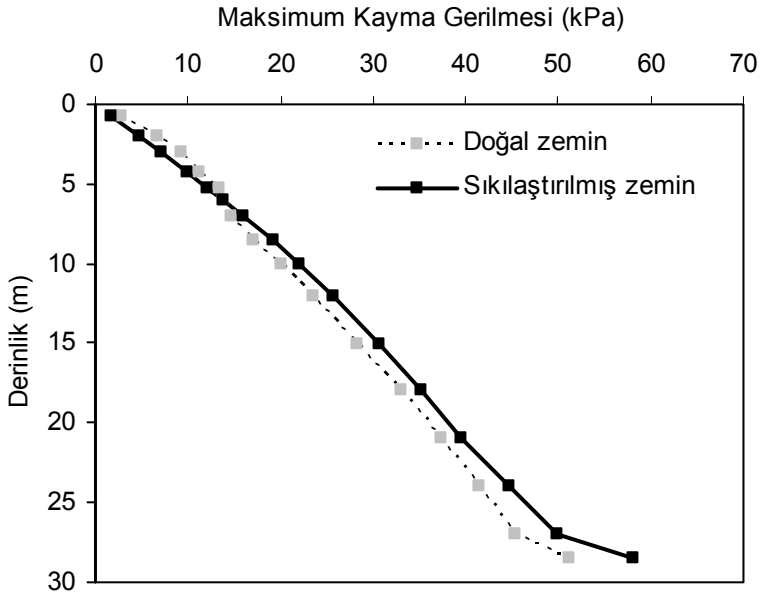
Şekil 11 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 12 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

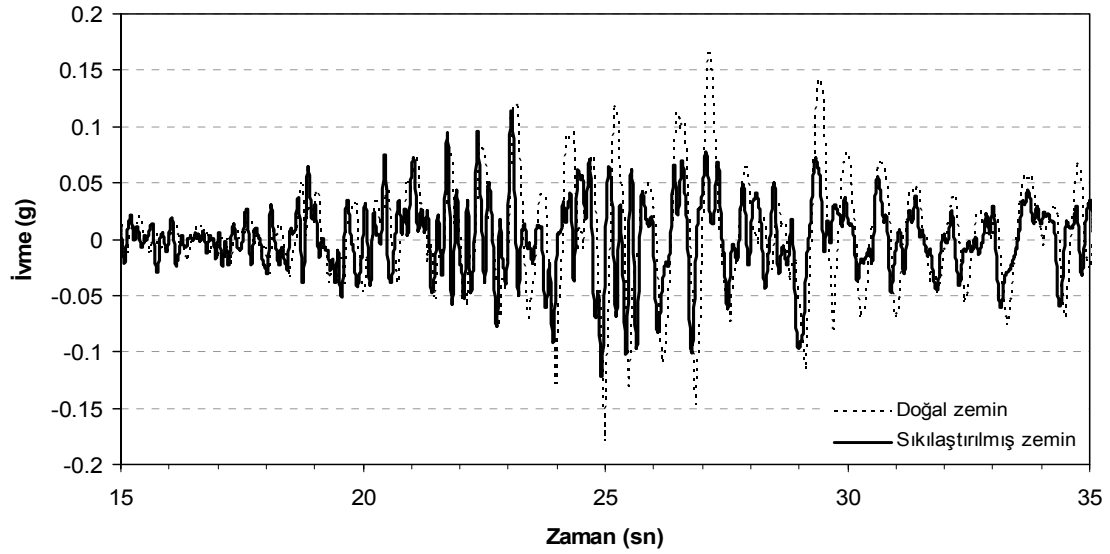


(a)

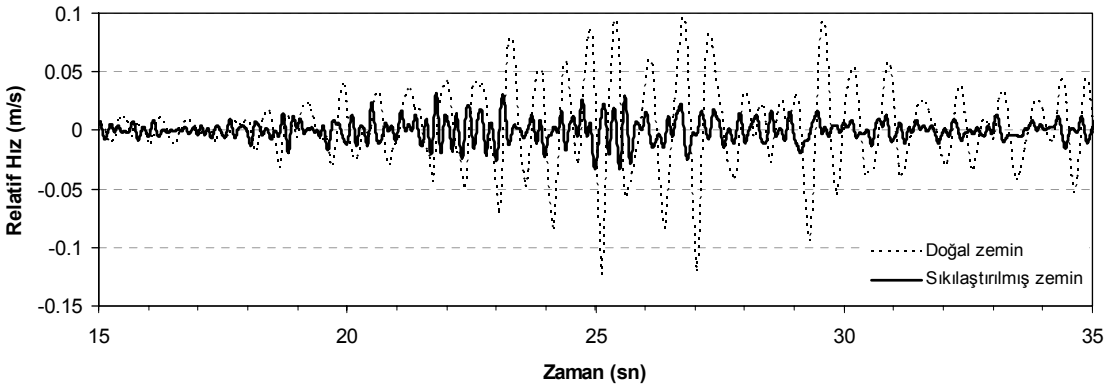


(b)

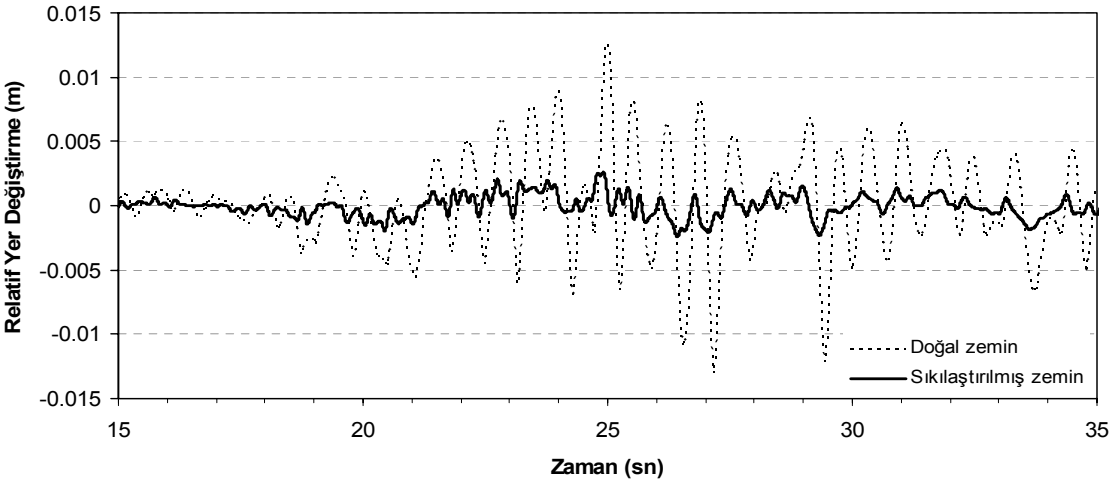
Şekil 13 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

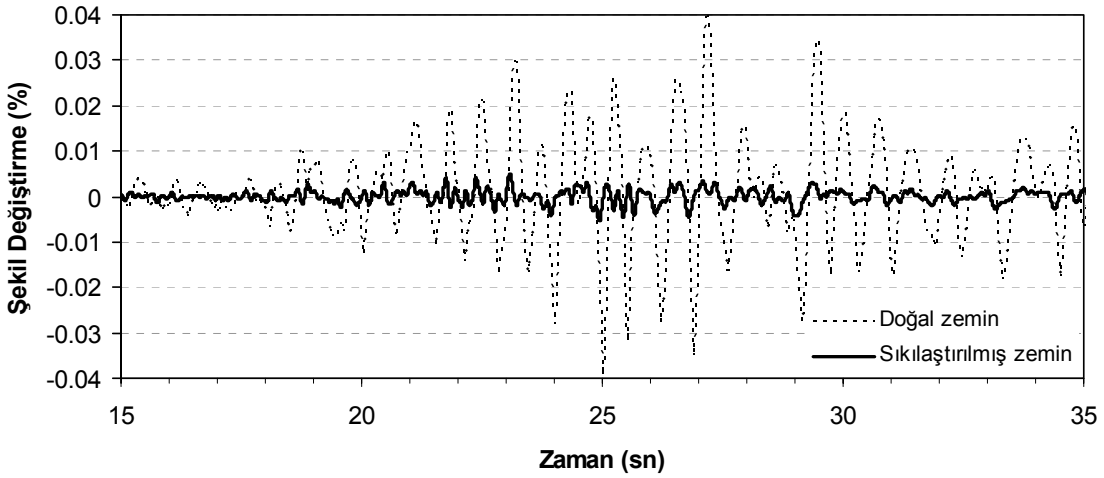


(b)

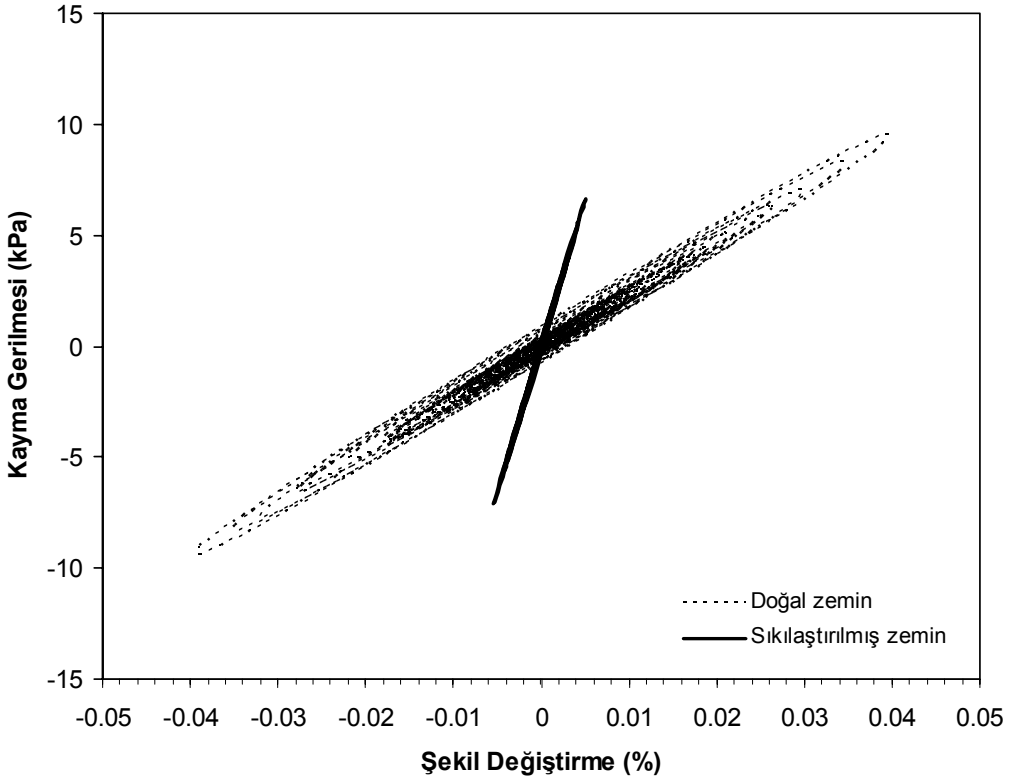


(c)

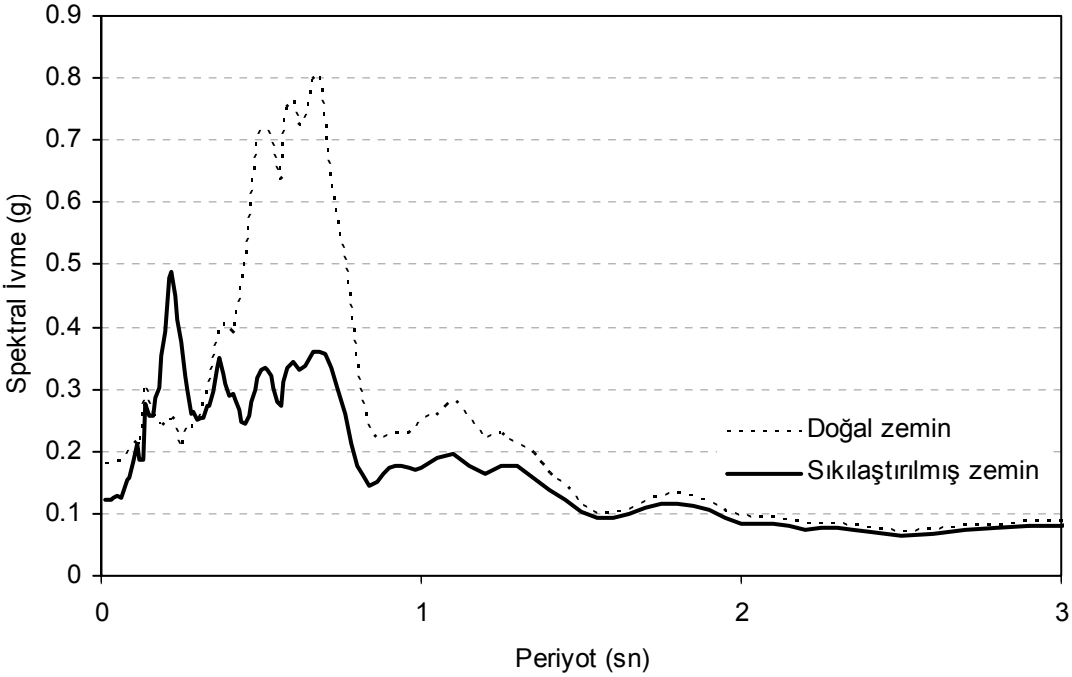
Şekil 14 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



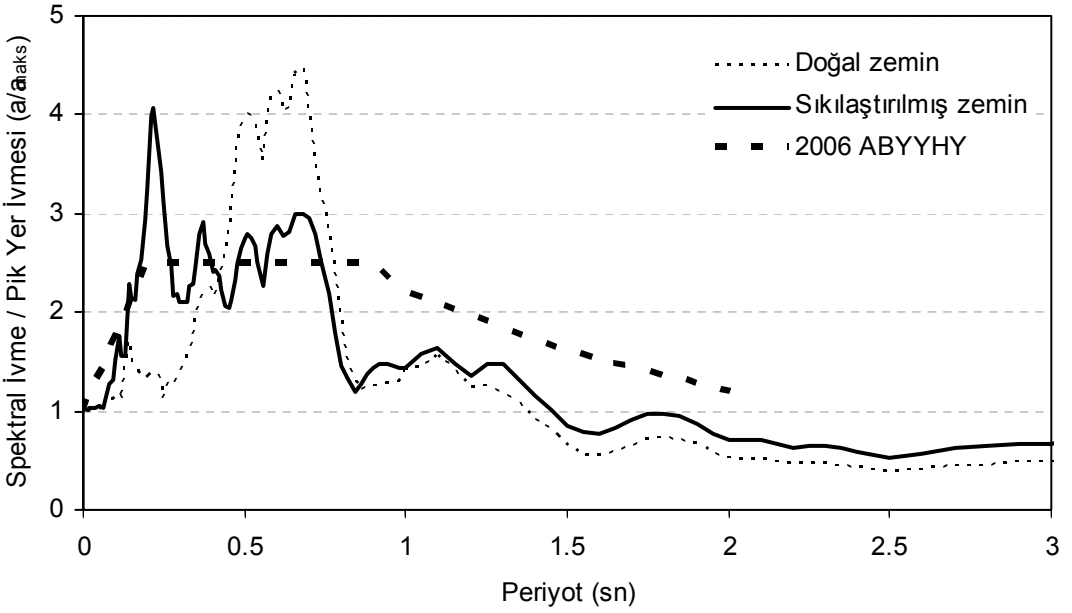
Şekil 15 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



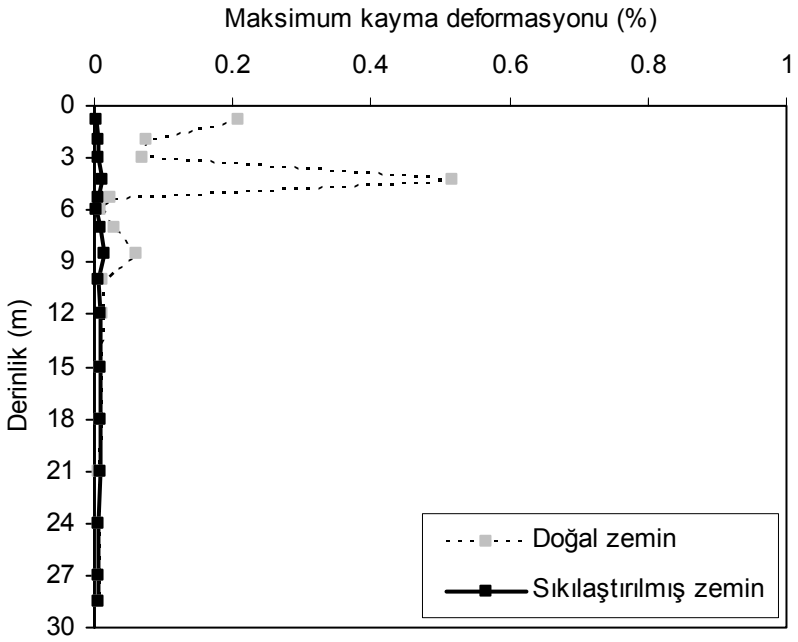
Şekil 16 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



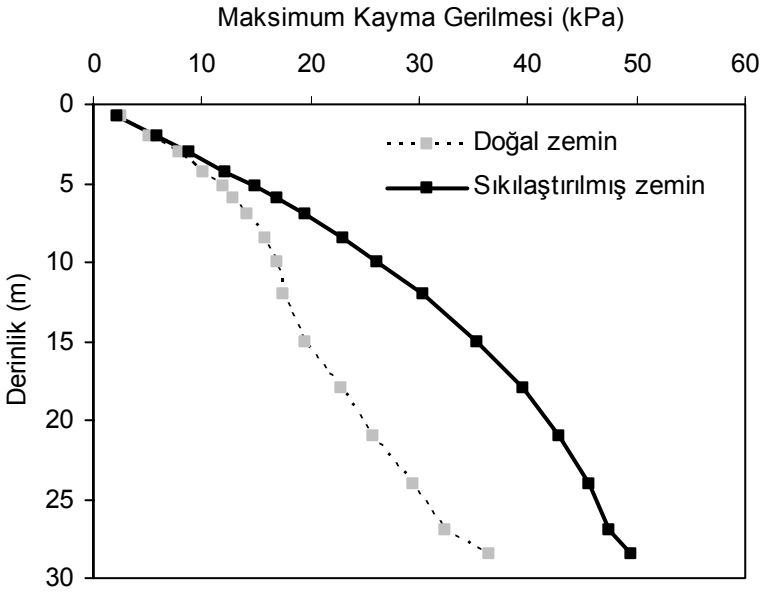
Şekil 17 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 18 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

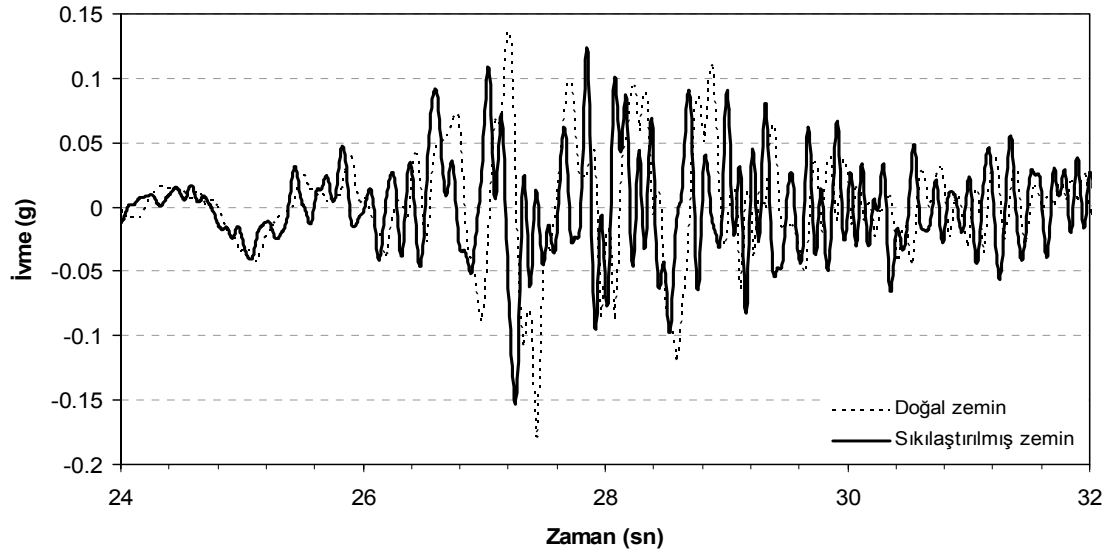


(a)

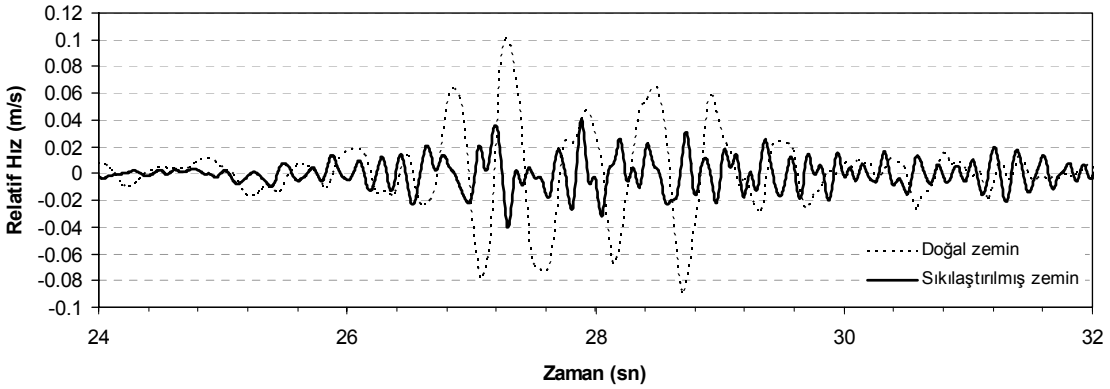


(b)

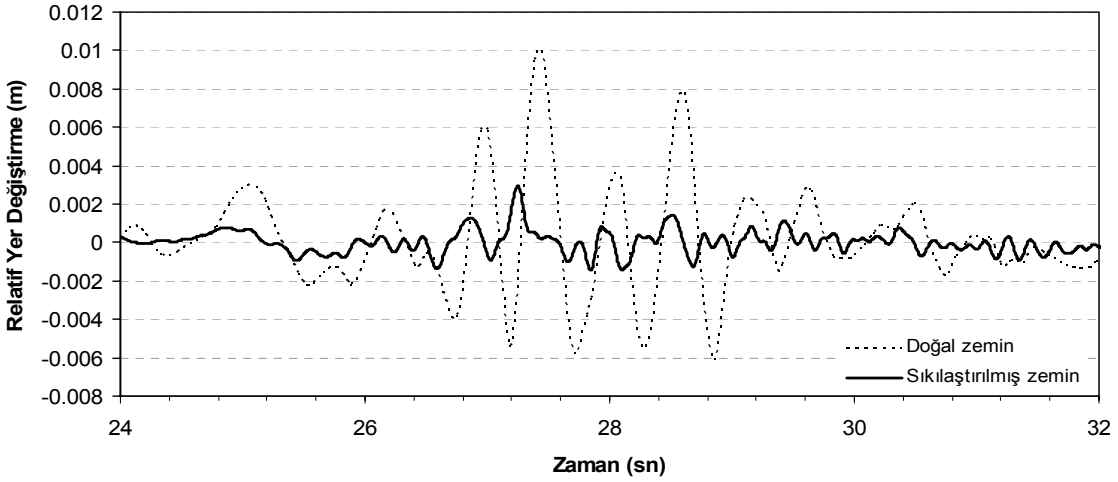
Şekil 19 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

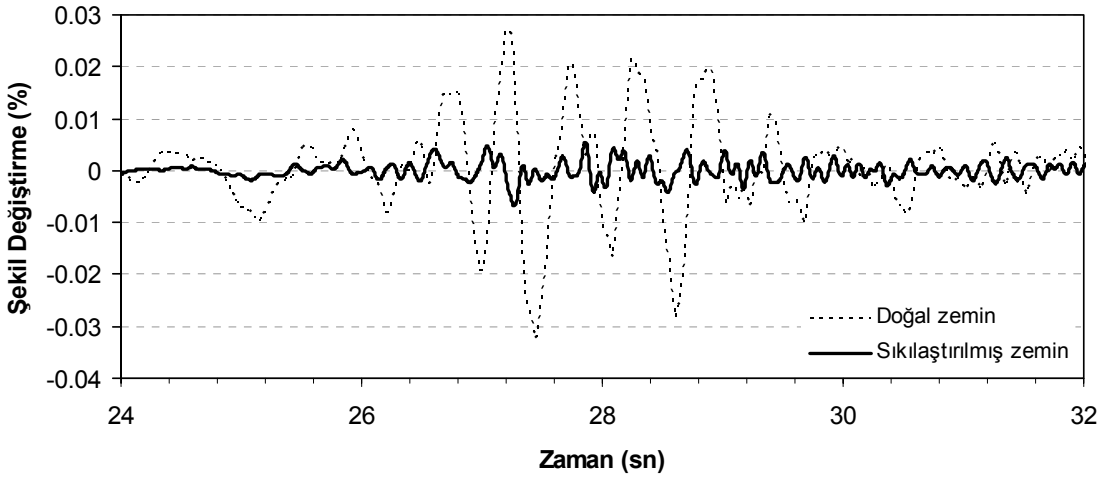


(b)

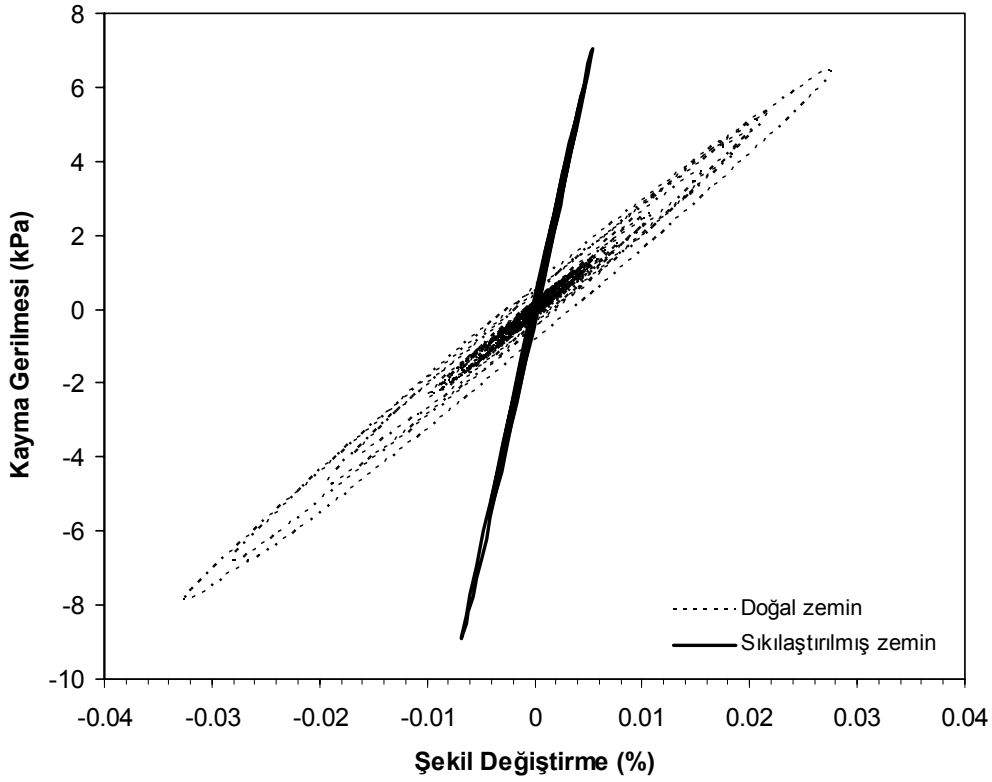


(c)

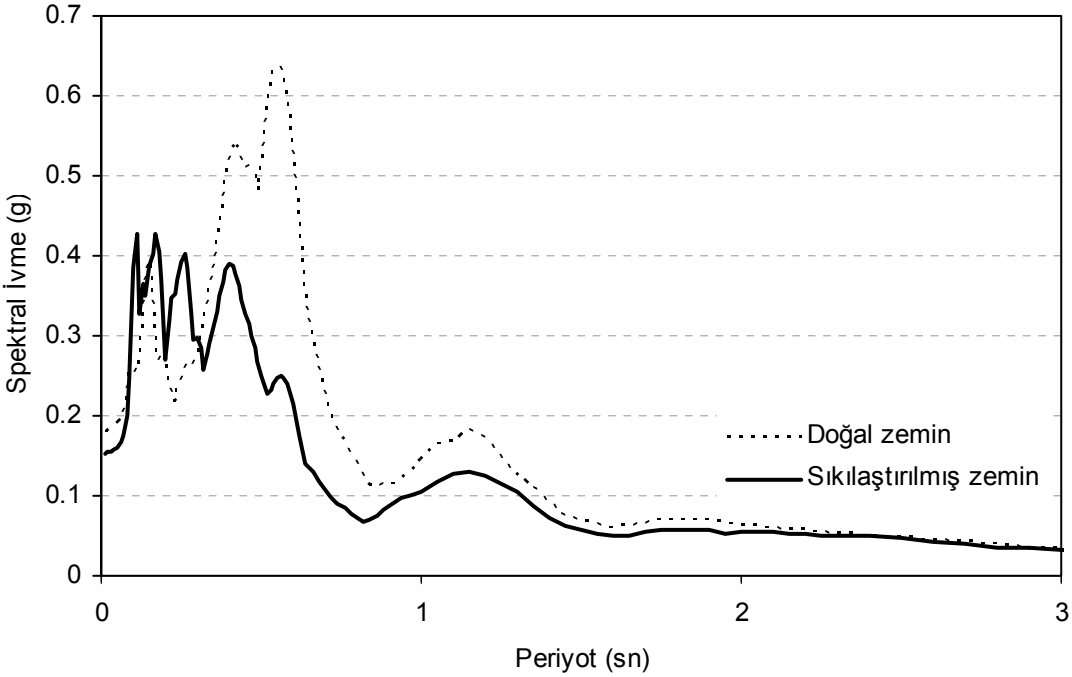
Şekil 20 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



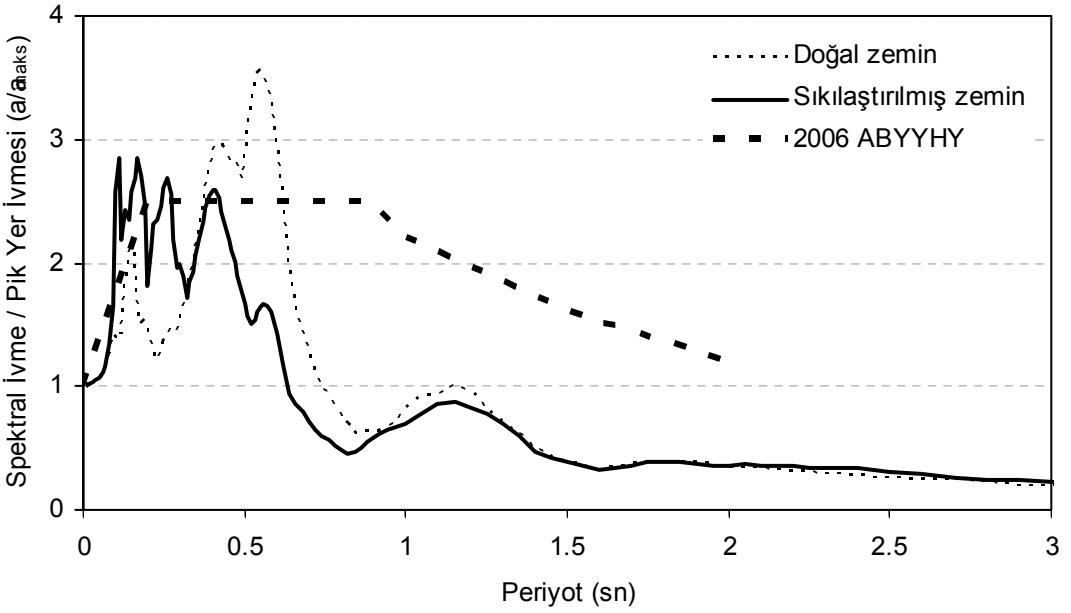
Şekil 21 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 22 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



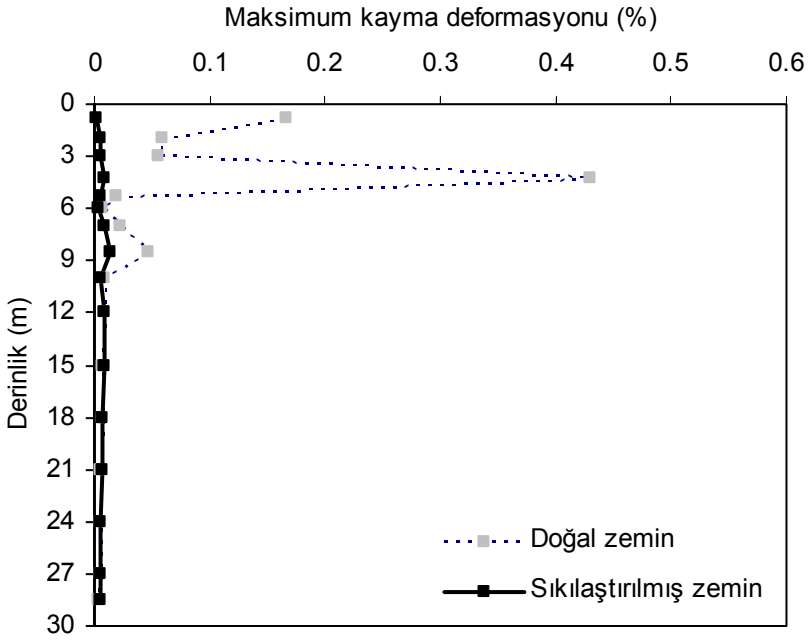
Şekil 23 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



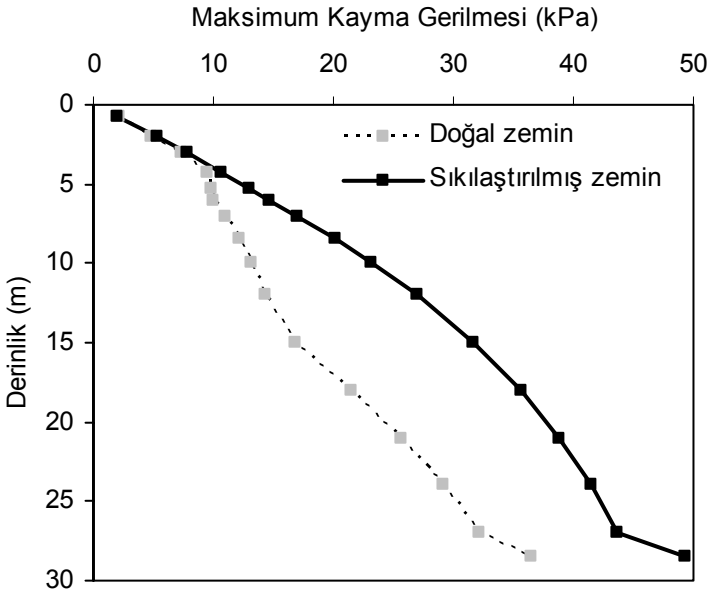
Şekil 24 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

13 Eylül 1999 Artçı Depremi'nin Analizi

Yarımca Petkim Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

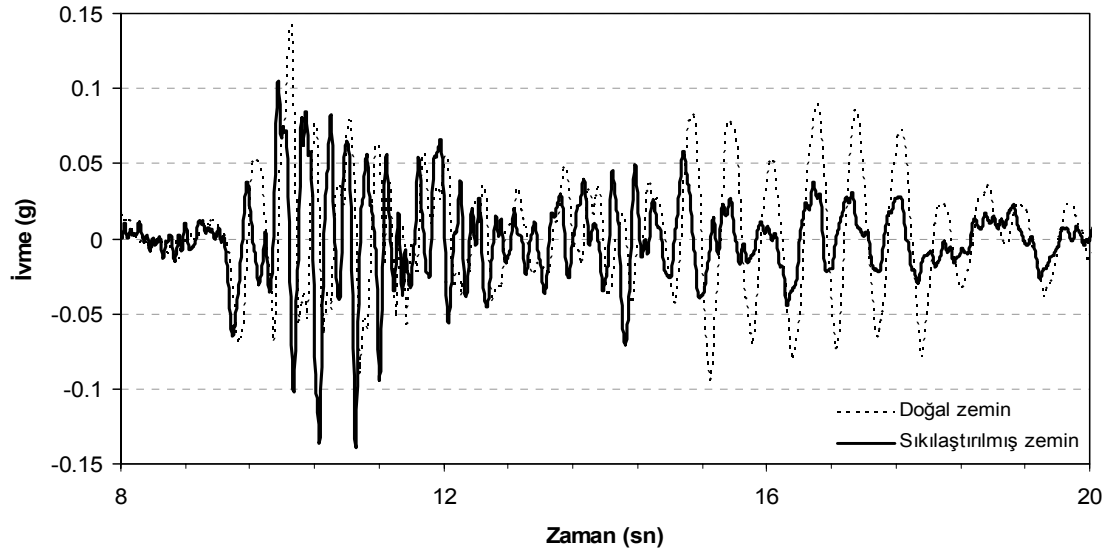


(a)

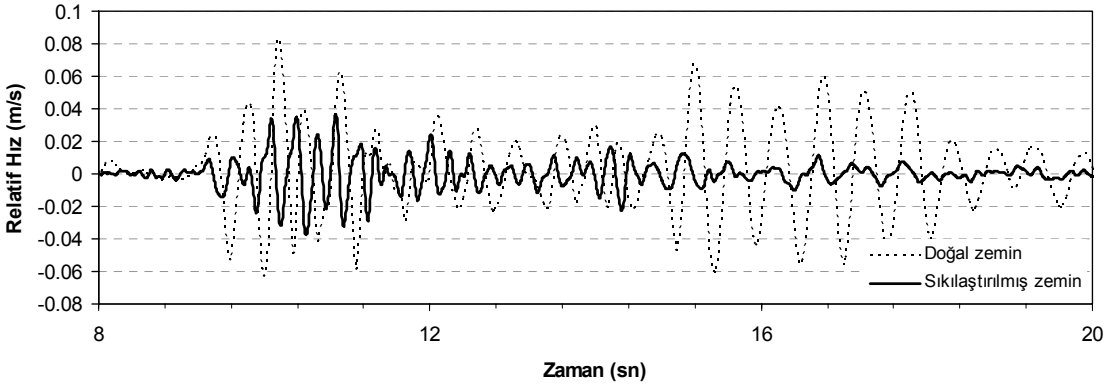


(b)

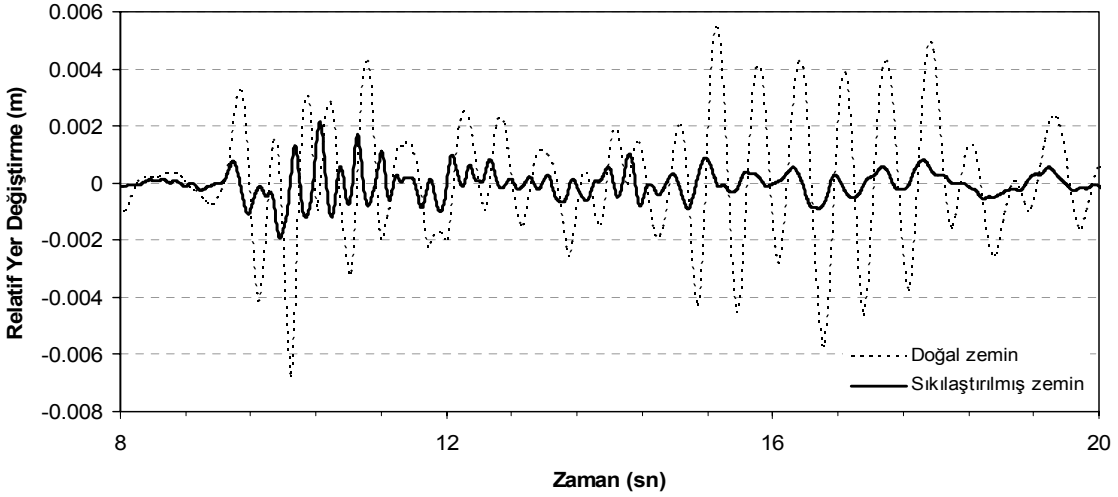
Şekil 25 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

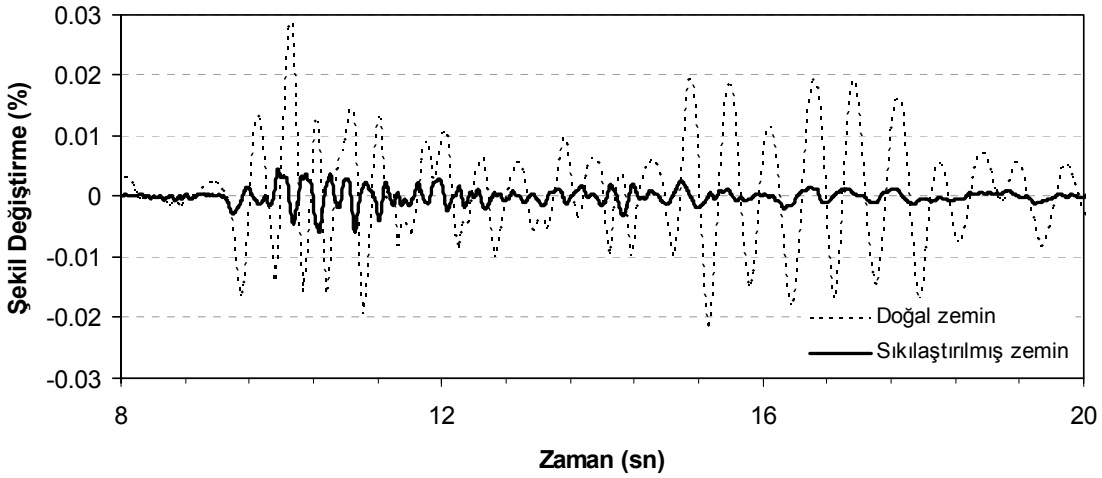


(b)

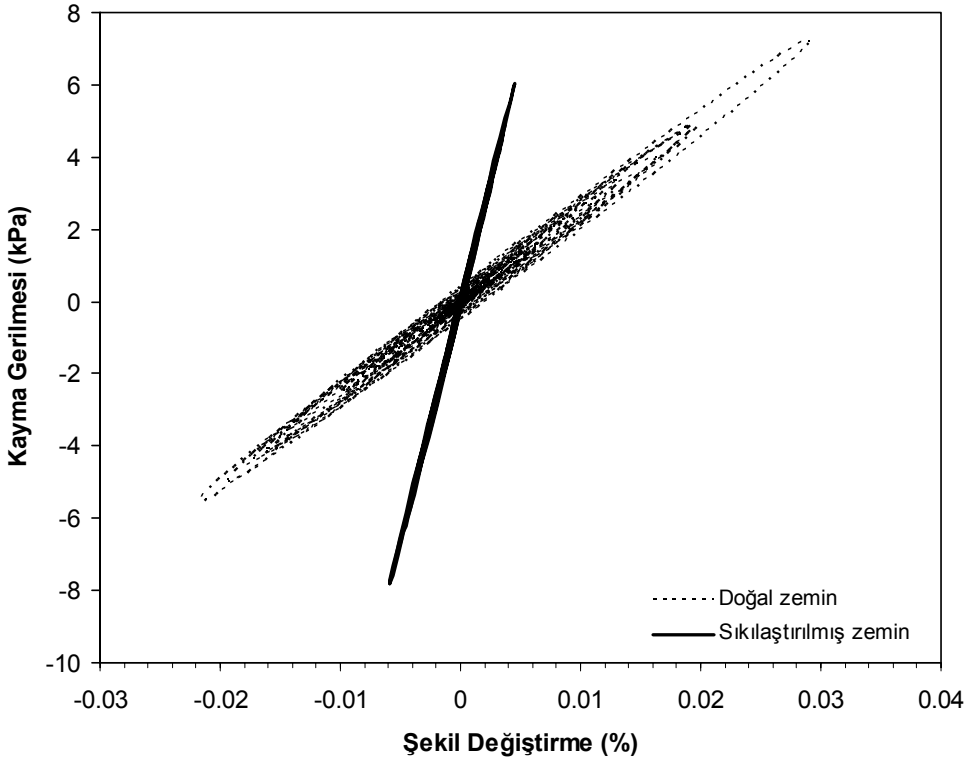


(c)

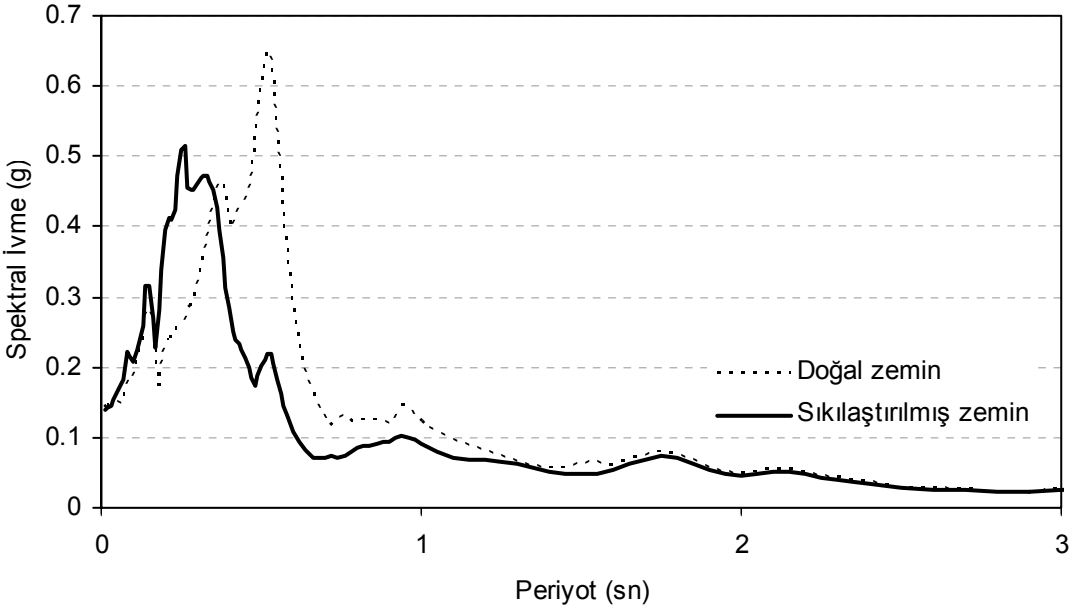
Şekil 26 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



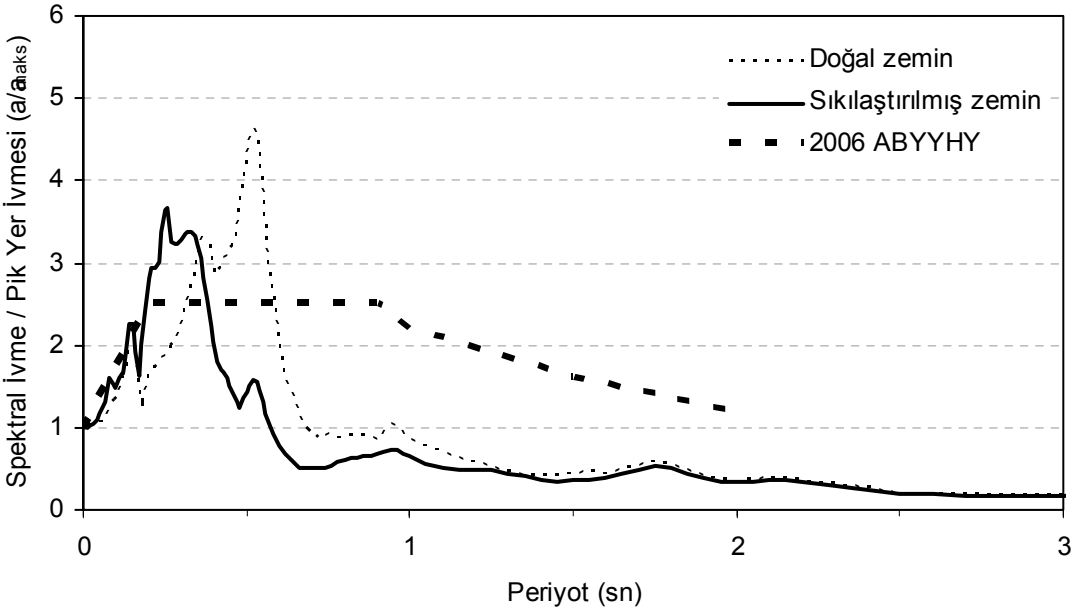
Şekil 27 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 28 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

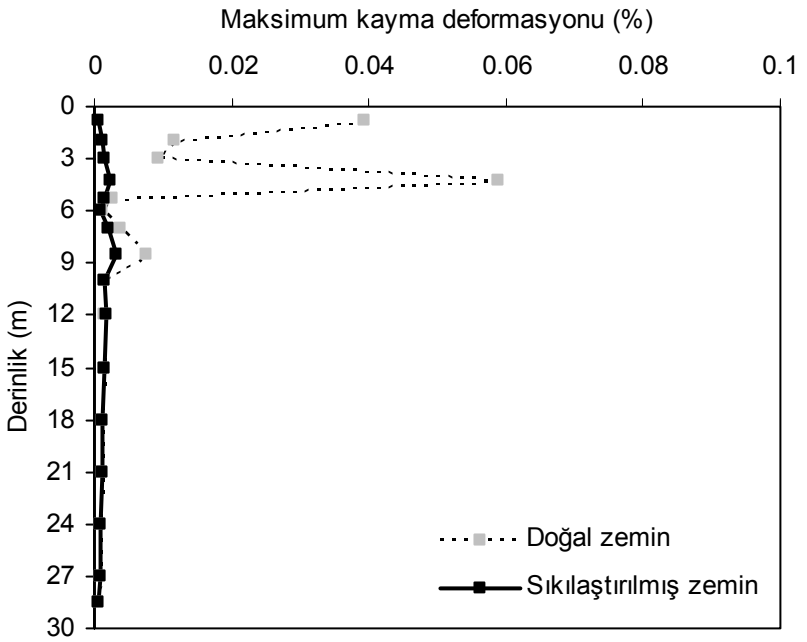


Şekil 29 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)

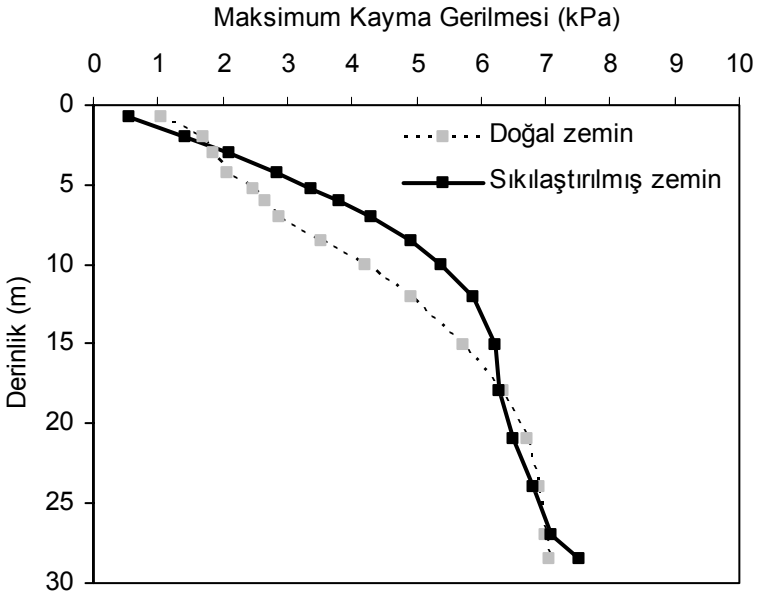


Şekil 30 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

Darıca Arçelik Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

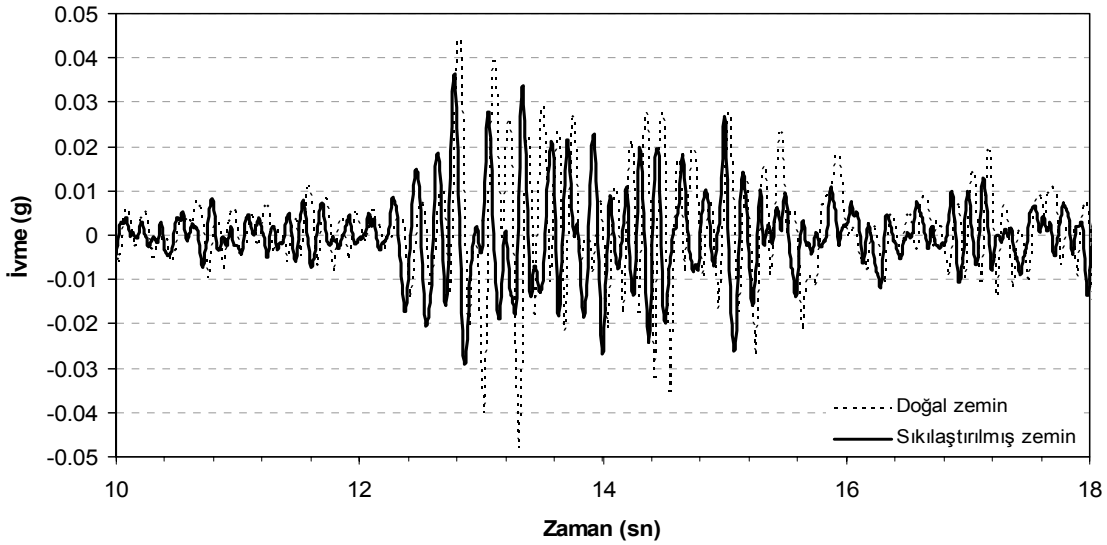


(a)

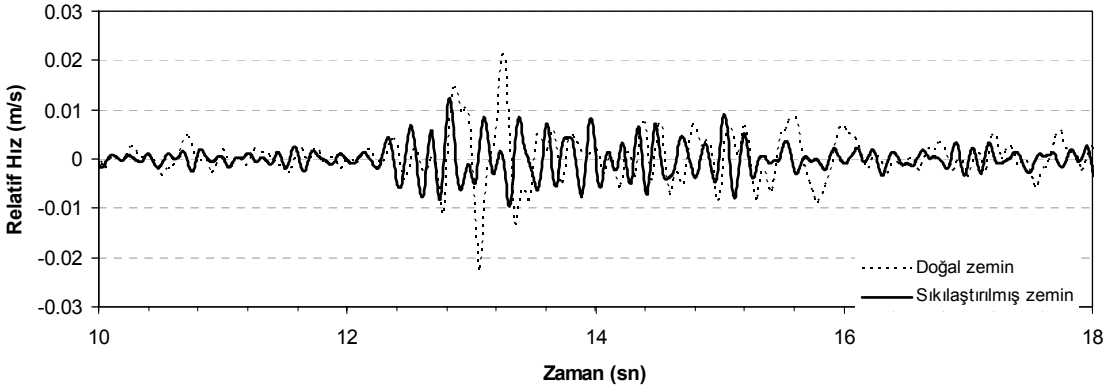


(b)

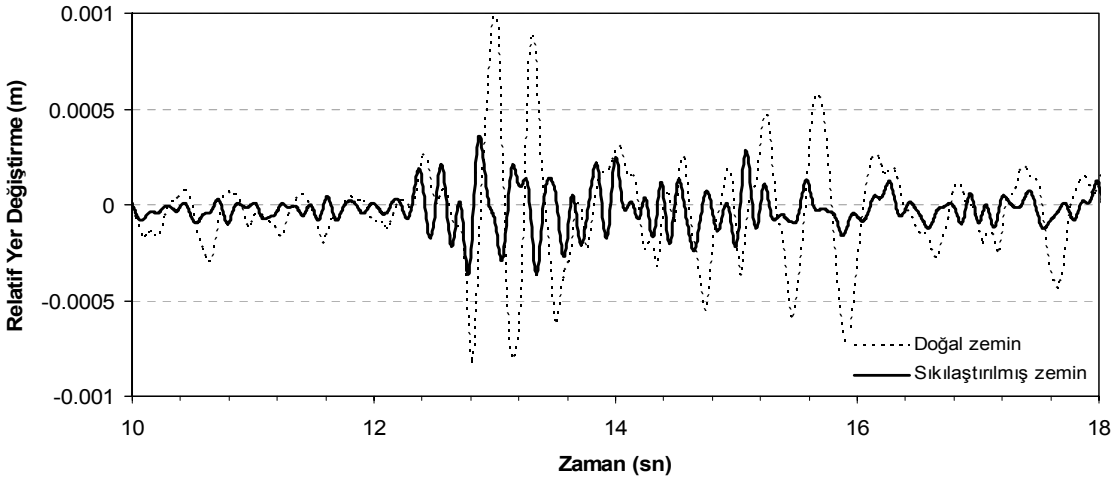
Şekil 31 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

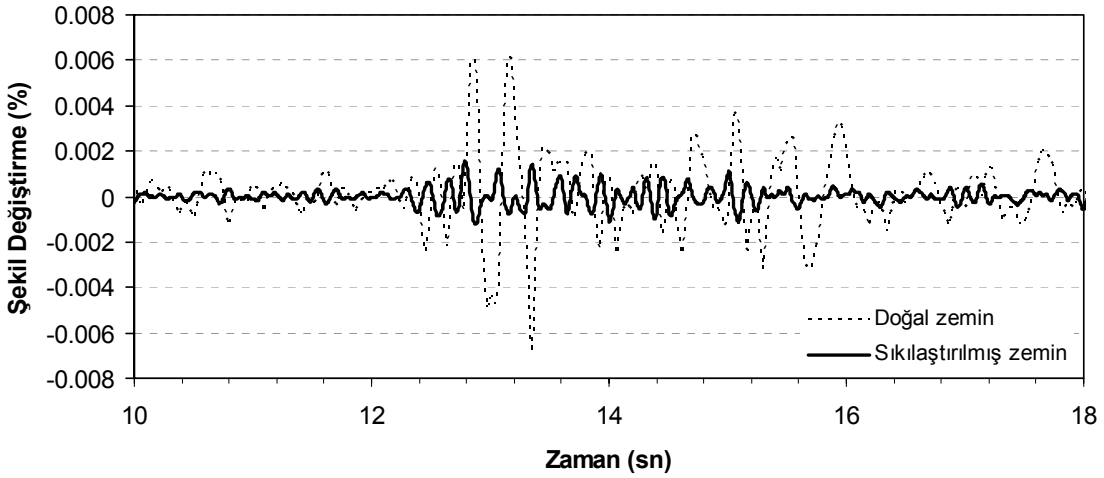


(b)

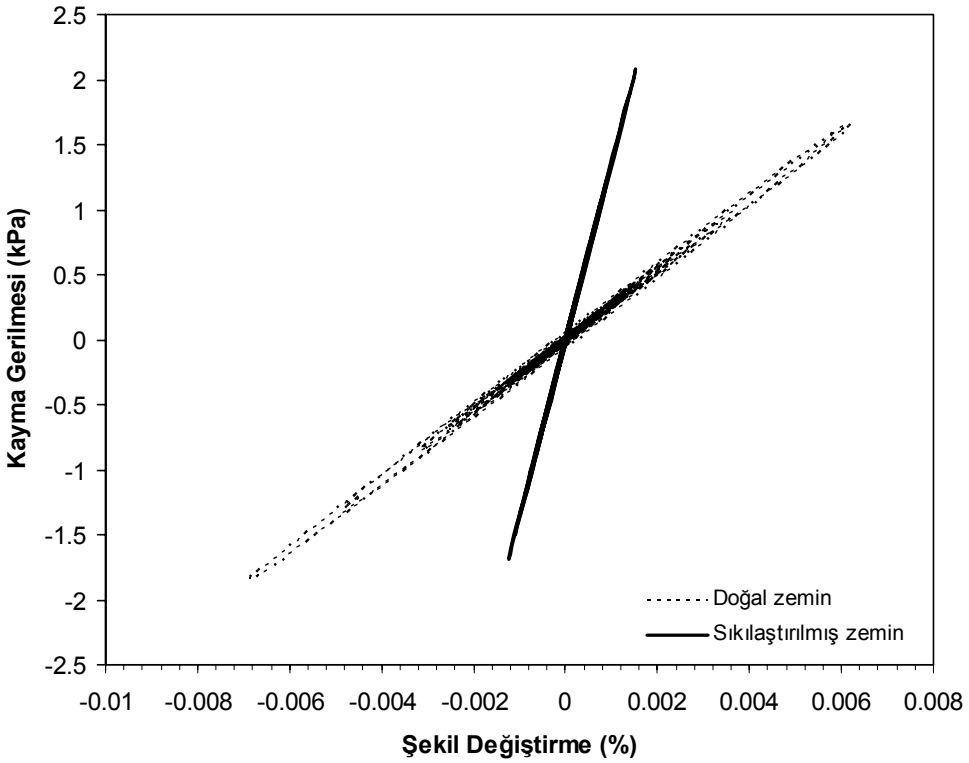


(c)

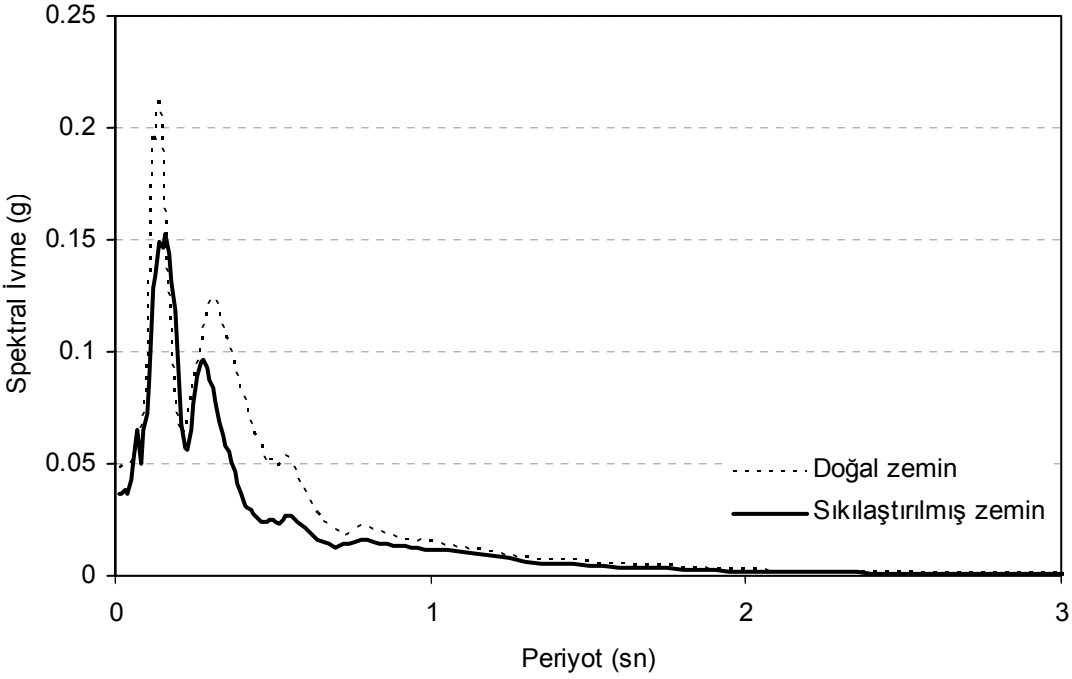
Şekil 32 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



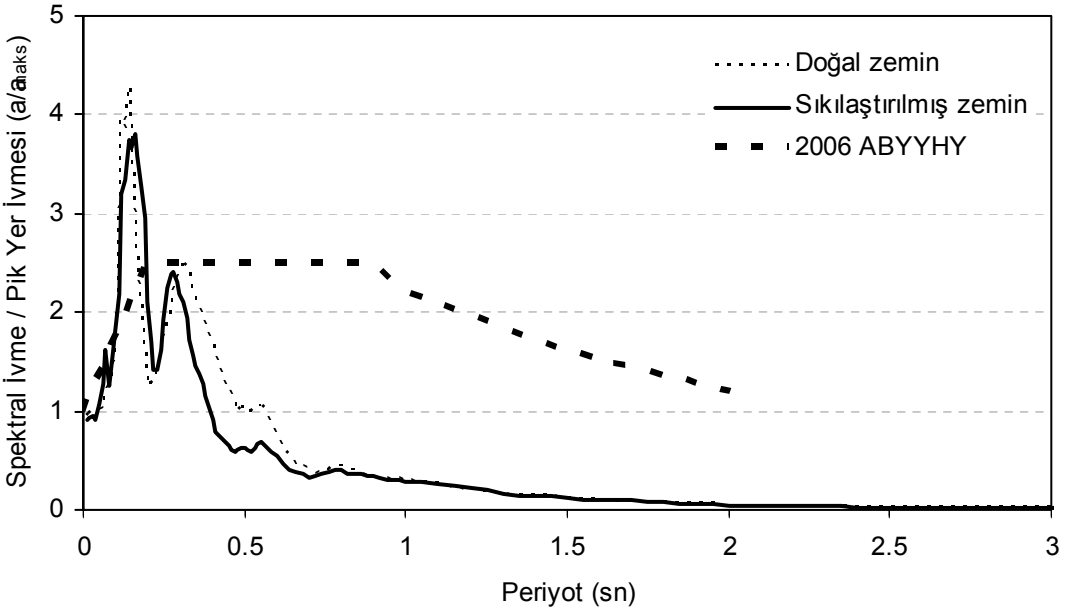
Şekil 33 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 34 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi

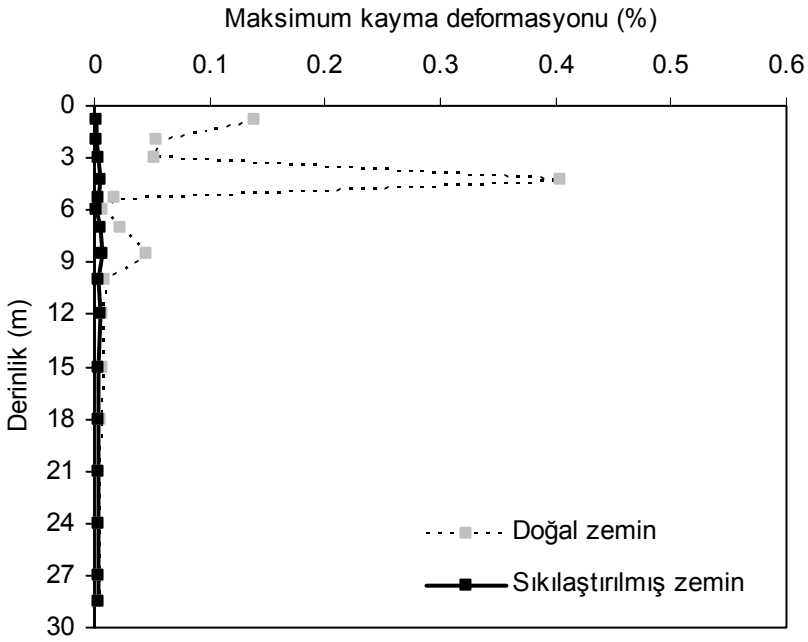


Şekil 35 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)

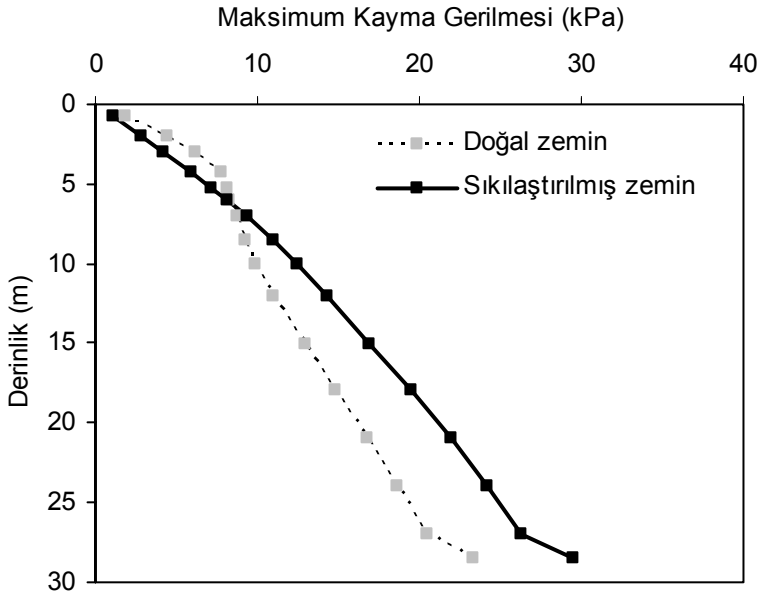


Şekil 36 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

Bursa Tofaş Fabrikası Deprem İstasyonu Verilerine Göre Analiz

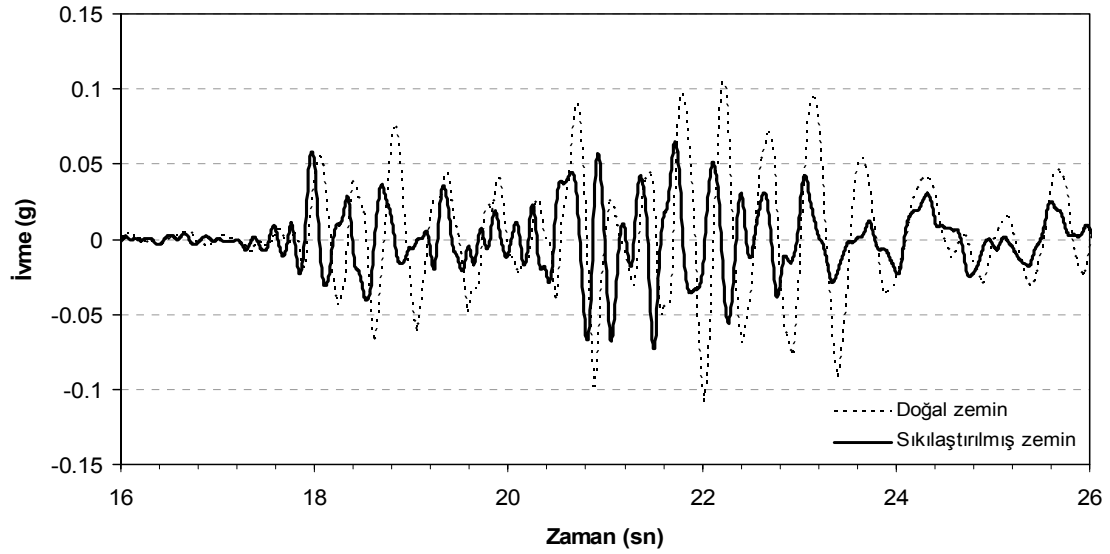


(a)

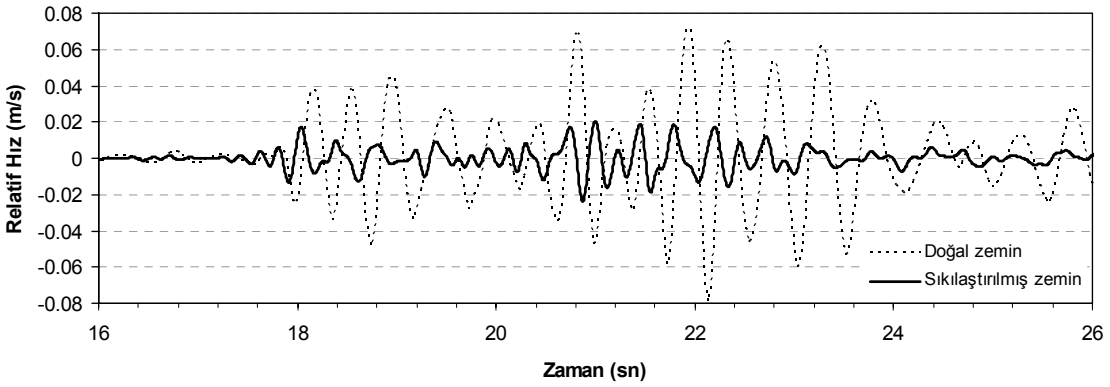


(b)

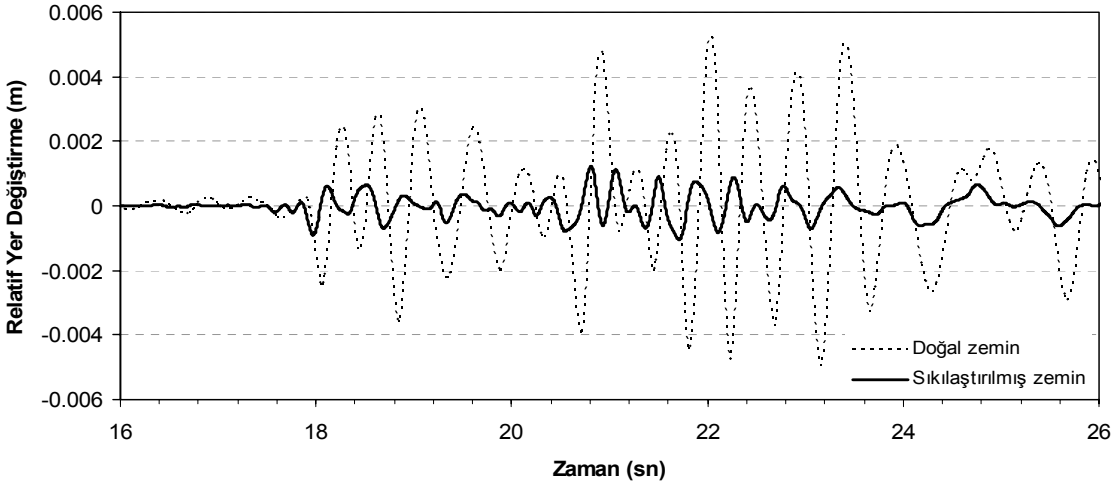
Şekil 37 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

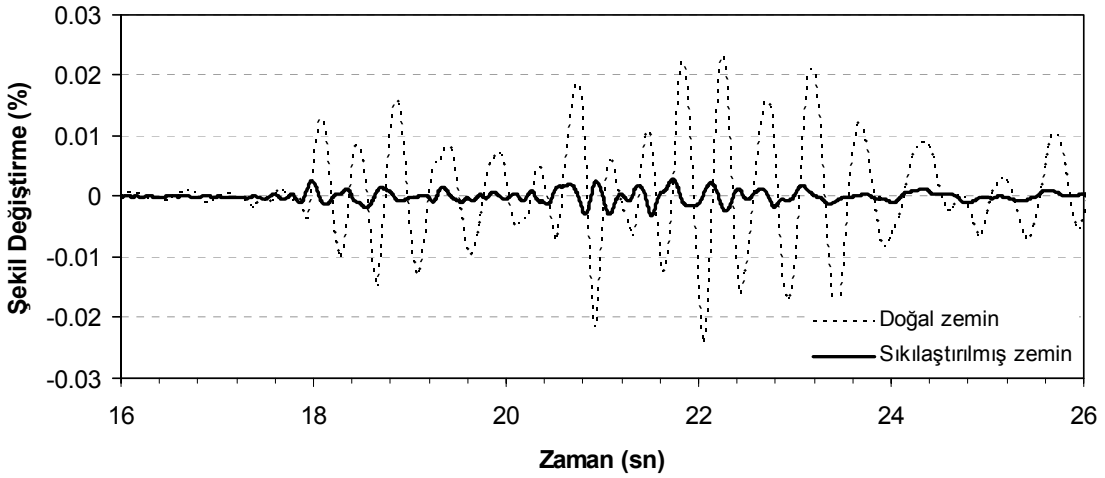


(b)

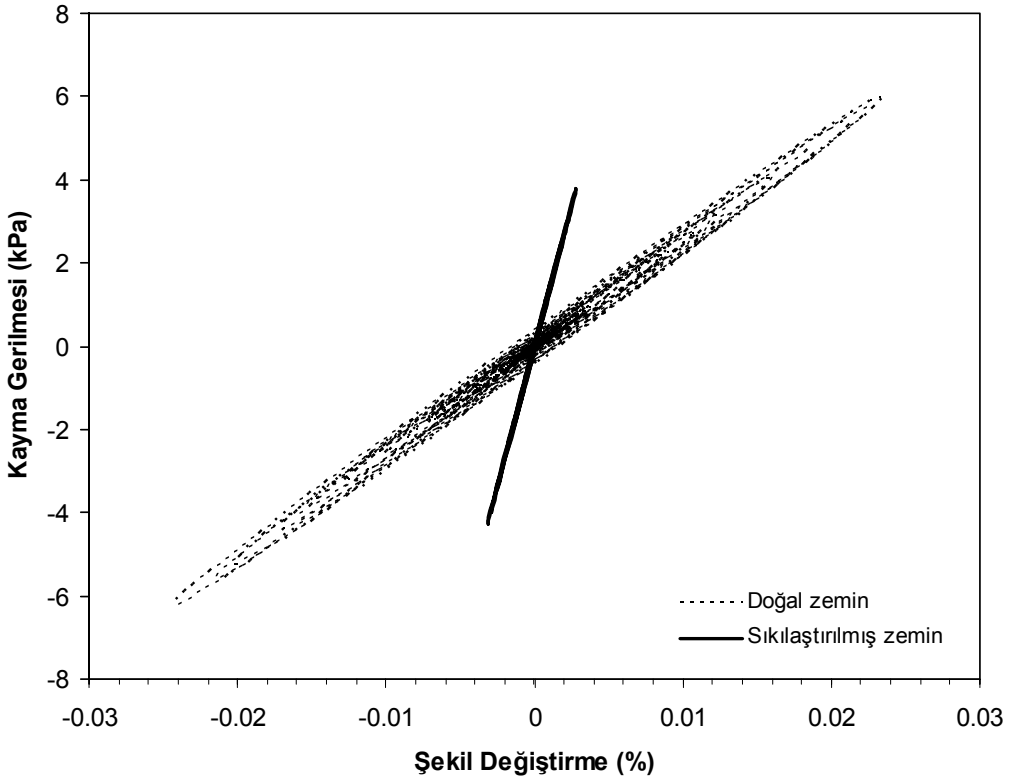


(c)

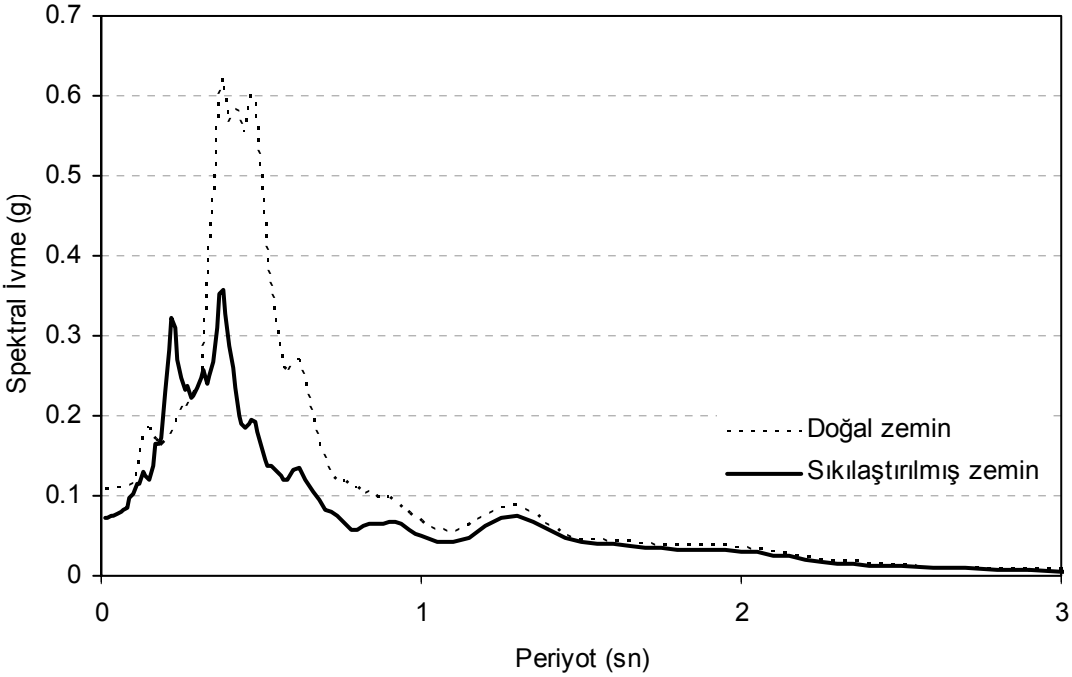
Şekil 38 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



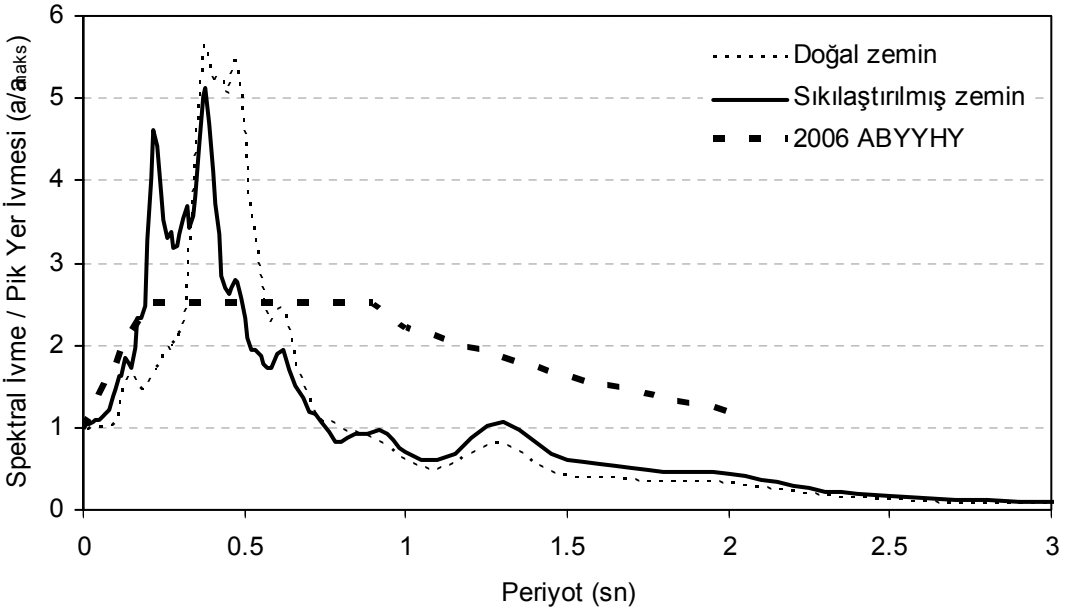
Şekil 39 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



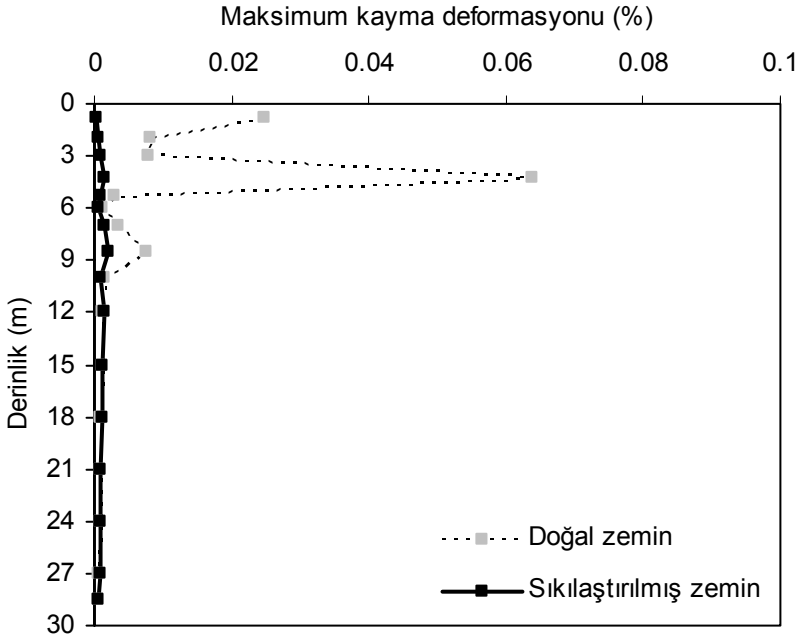
Şekil 40 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



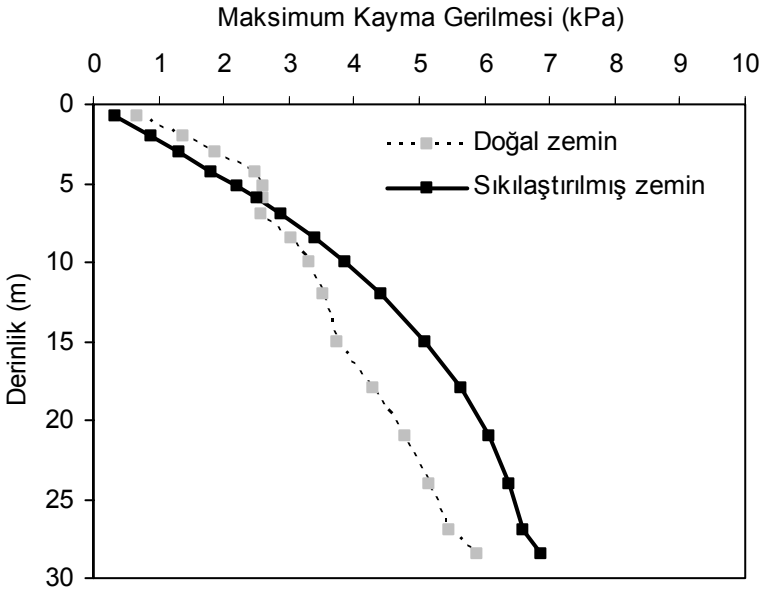
Şekil 41 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 42 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

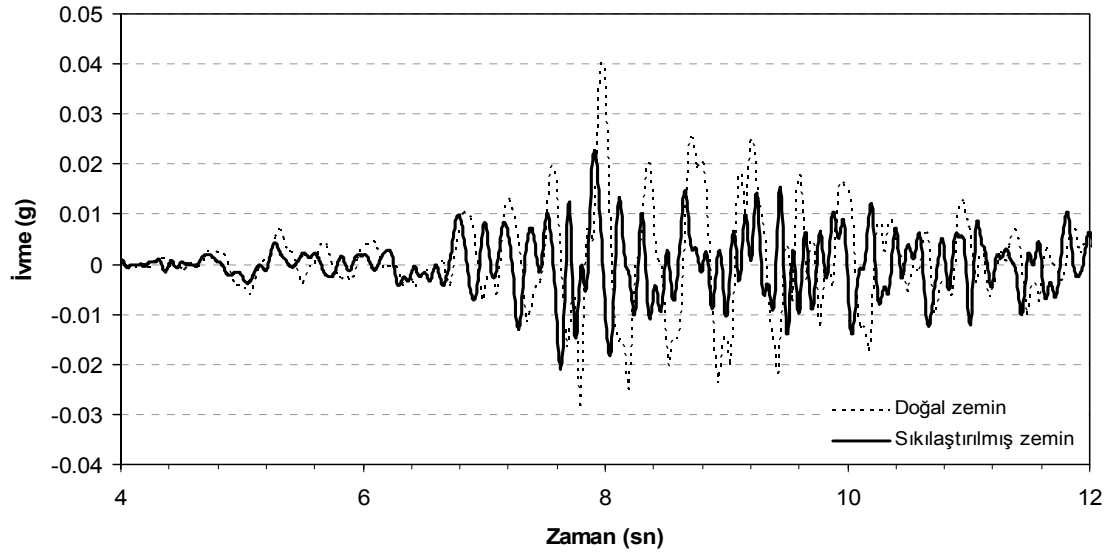


(a)

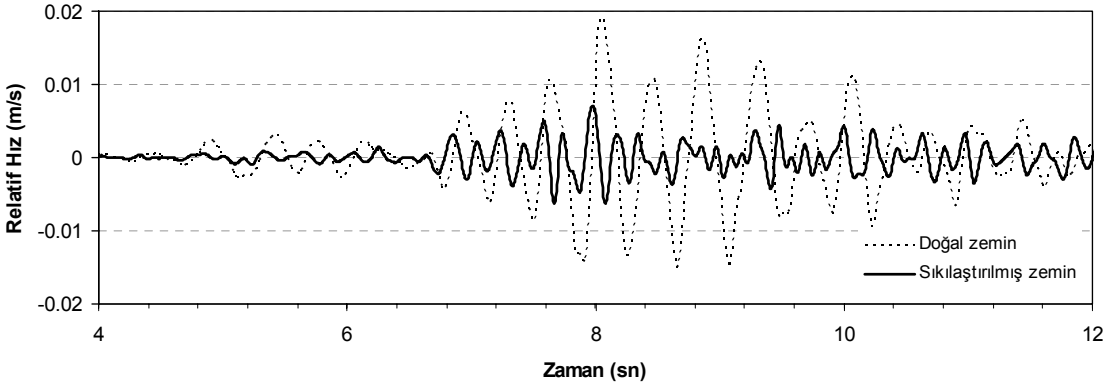


(b)

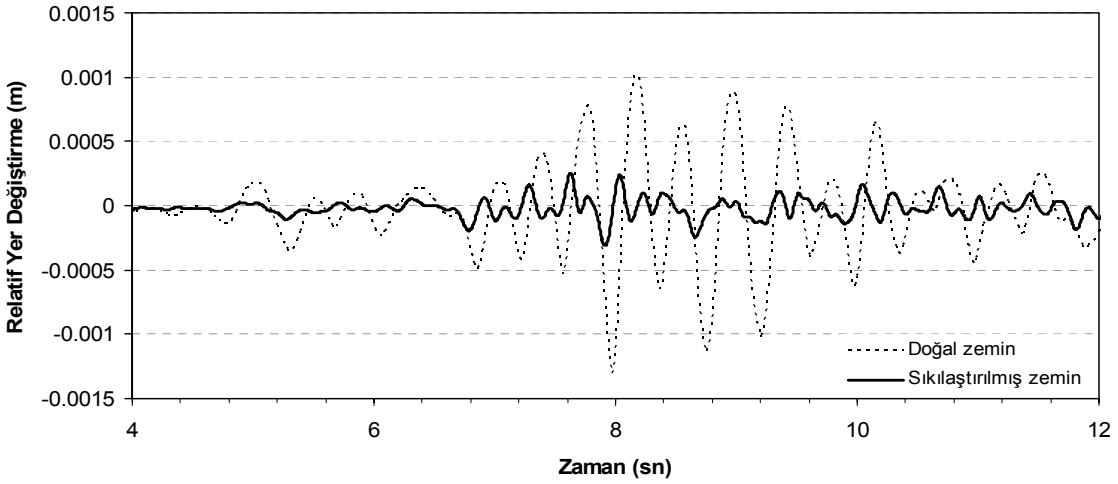
Şekil 43 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) maksimum kayma deformasyonunun derinlikle değişimi, b) maksimum kayma gerilmesinin derinlikle değişimi



(a)

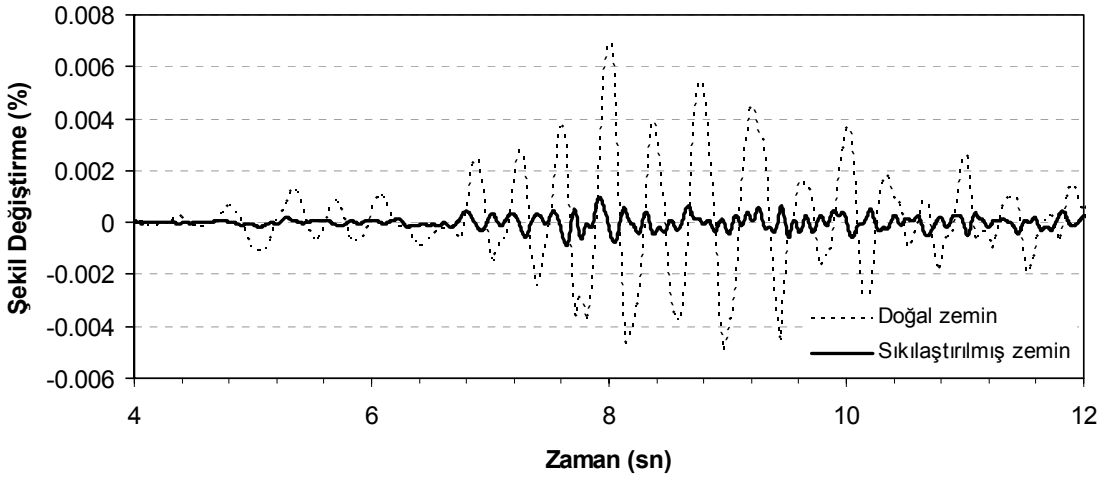


(b)

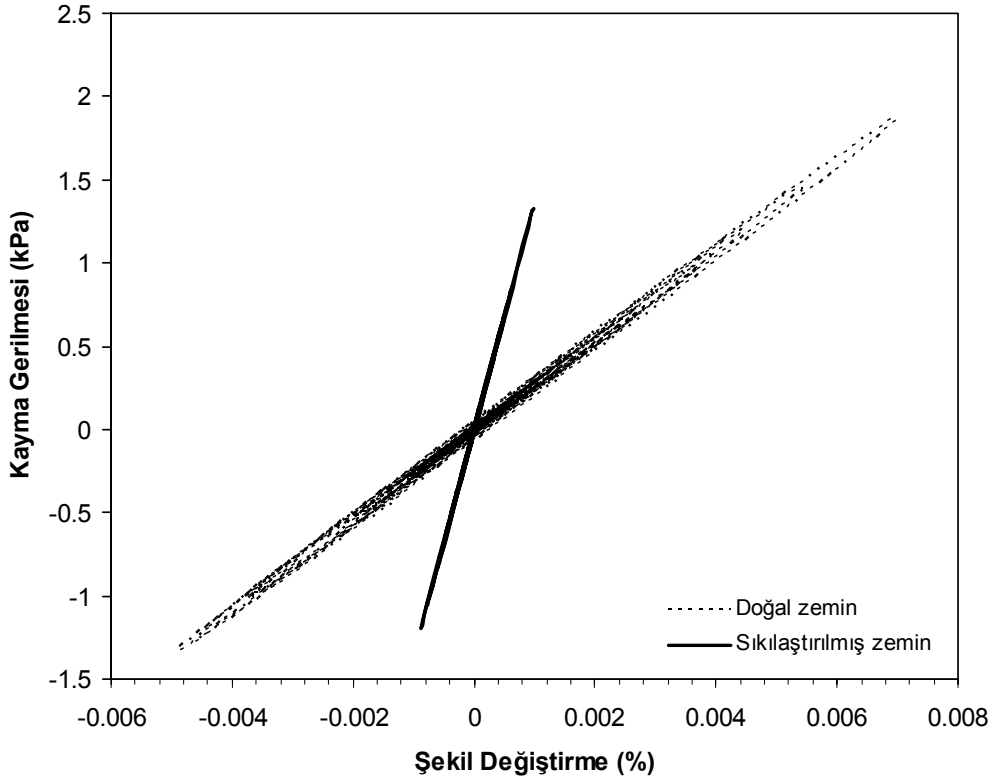


(c)

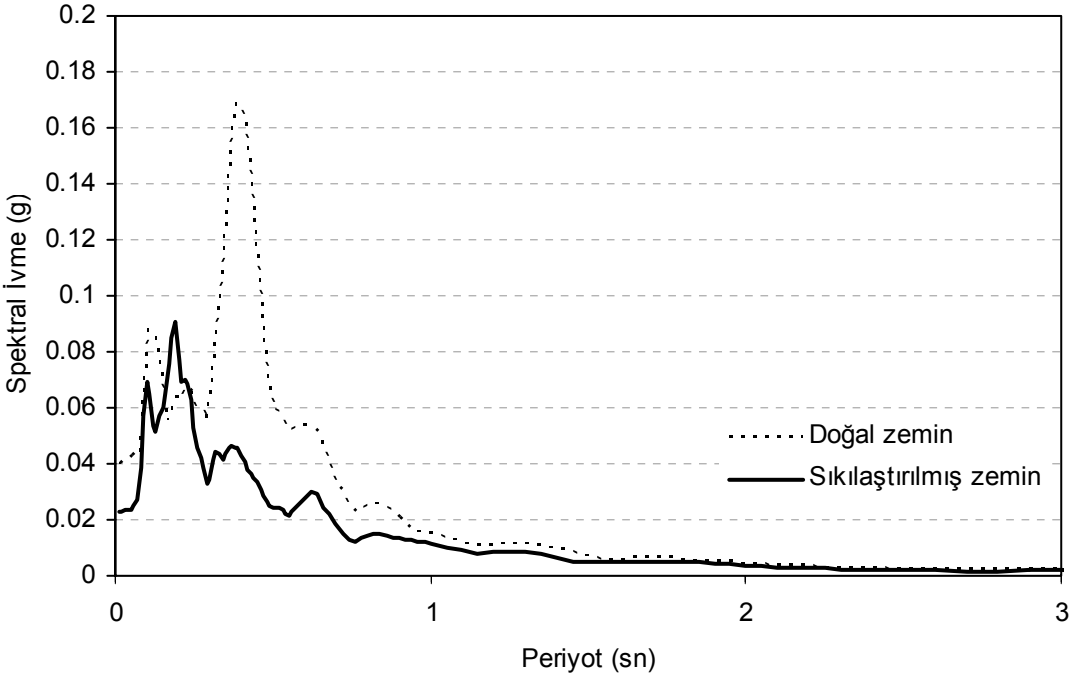
Şekil 44 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için a) ivmenin zamanla değişimi, b) relatif hızın zamanla değişimi, c) relatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



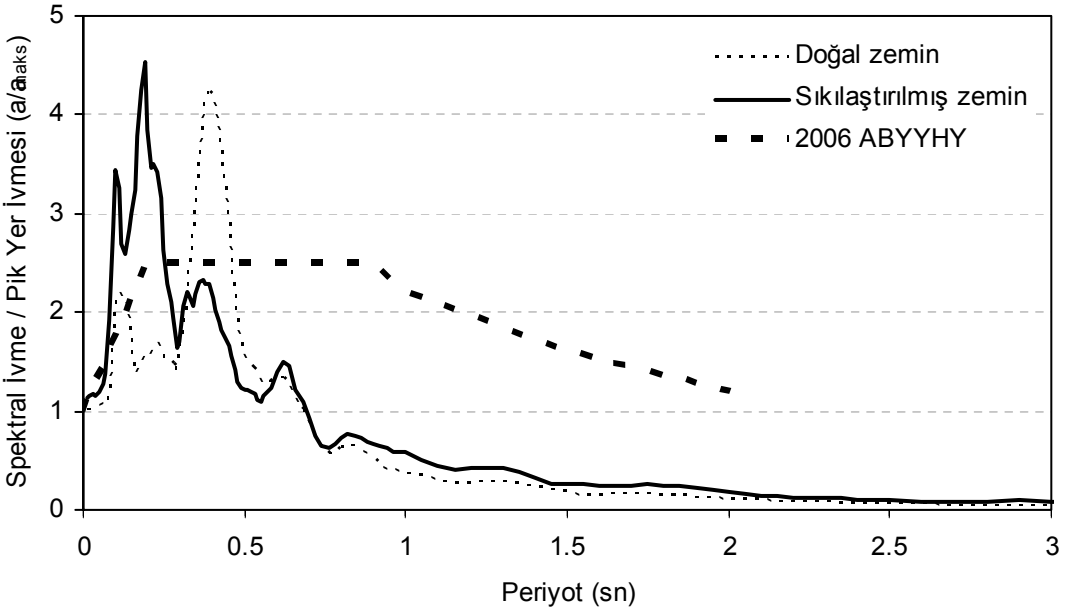
Şekil 45 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için şekil değiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 46 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için kayma gerilmesinin şekil değiştirme ile değişimi



Şekil 47 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için spektral ivmelerin periyot ile değişimi (%5 sönüm oranı için)



Şekil 48 Doğal zemin koşulları ve sıkılaştırma ile iyileştirilmiş zemin koşulları için tepki spektrumlarının (%5 sönüm oranı için) 2006 ABYYHY'de tanımlanan tasarım spektrumu ile karşılaştırılması

ÖZGEÇMİŞ

Onur MAVİTUNA, 1982 yılında İstanbul'un Kadıköy İlçesi'nde doğdu. İlköğrenimini Gazi Mustafa Kemal Paşa İlkokulu ve Büyükşehir İlköğretim Okulu'nda, ortaöğrenimini ise Yabancı Dil Ağırlıklı Bahçeşehir Atatürk Lisesi'nde tamamladı. 2000 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başladı ve Haziran 2004'de mezun oldu. 2004 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisansa başladı.