H. HASMADEN, 2014

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KAYMA ÇERÇEVELERİNDE OPTİMUM SÖNÜMLEYİCİ DAĞILIMINA ZEMİN ETKİSİ

HİLAL HASMADEN

Eylül 2014

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KAYMA ÇERÇEVELERİNDE OPTİMUM SÖNÜMLEYİCİ DAĞILIMINA ZEMİN ETKİSİ

HİLAL HASMADEN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Eylül 2014

Hilal HASMADEN tarafından 1. Danışman **Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA** ve 2. Danışman **Yrd. Doç. Dr. Ersin AYDIN** yönetiminde hazırlanan **"Kayma çerçevelerinde optimum sönümleyici dağılımına zemin etkisi"** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

(Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi)

Üye : Prof. Dr. Cafer KAYADELEN

(Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi)

Üye : Doç. Dr. Fatih İlker KARA

(Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA

(Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ersin AYDIN

(Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi)

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ..../..../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun ..../..../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../2014

Doç. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

HİLAL HASMADEN

ÖZET

KAYMA ÇERÇEVELERİNDE OPTİMUM SÖNÜMLEYİCİ DAĞILMASINA ZEMİN ETKİSİ

HASMADEN, Hilal
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Birinci Danışman : Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA
İkinci Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ersin AYDIN
Eylül 2014, 158 sayfa

Yapıya temel vasıtasıyla etkiyen sismik kuvvetlerin, deprem bölgelerindeki yapıların tasarımında kaba yaklaşımlar halinde ele alınması, ülkemizde son yıllarda yaşanan depremlerin akabinde ciddi kayıplar vermemize neden olmuştur. Bu tez çalışmasında; 3 değişik zemin türü (gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin) üzerine oturtulan standart bir yapı modeli ele alınarak belli miktardaki sönümleyicinin katlara dağılımı değişik sönüm oranları için incelenmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Yapı-zemin ilişkisi bir kayıcı ve bir dönel mesnet ile tanımlanmış, sabit kütleli, üniform kat rijitliğine sahip, 5 katlı bir yapıda sönümleyici optimizasyonu Takewaki yöntemine göre yazılan bir algoritma ile analiz edilmiştir. Malzemeler lineer elastik kabul edilmiş olup zaman tanım alanında hesap yöntemleri kullanılmıştır. Zeminin sıkılığının değişmesi halinde sönümleyicilerin katlar arasında dağılımının değiştiği gözlemlenmiştir. Farklı zemin parametrelerine göre en uygun sönümleyici dağılım miktarı bulunmuştur.

Anahtar sözcükler: Zemin-yapı etkileşimi, optimum sönümleyici dağılımı, sismik yalıtım, kum sıkılığı

SUMMARY

SOIL EFFECTS ON THE OPTIMUM DAMPER DISTRUBUTION IN SHEAR BUILDINGS

HASMADEN, Hilal
Nigde University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Professor Dr. Osman SIVRIKAYA
Co-Supervisor : Assistant Professor Dr. Ersin AYDIN

September 2014, 158 pages

That seismic forces influencing the construction through foundation are handled as rough approaches in the designation of constructions in earthquake regions has caused serious casualties following recent earthquakes in our country. In this thesis, a standard construction model settled upon 3 different types of soil (loose sand, medium dense sand and dense sand soil) has been studied and distribution of a certain amount of dampers to floors has been examined for damping rates and compared with each other. Dampers optimization in a 5-floor construction whose soil-structure relationship has been defined with swaying and rocking springs and dashpots, a constant mass and uniformed rigidity has been analyzed by means of an algorithm prepared based on Takewaki's method. Materials are considered as linear elastic and calculation methods are used in time description field. When density of sand changes, it has been observed that the distribution of dampers among floors varies. In accordance with different soil parameters, best distribution amount of dampers has been determined.

Keywords: Soil-structure interaction, optimum distribution of dampers, seismic isolation, dense of sand

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında; zemin ile yapı arasındaki rijitlik farkından ötürü oluşabilecek rölatif kat ötelemelerini izin verilebilir seviyelere düşürmek amacıyla elastik olarak mesnetli bir kayma yapı modeli, üst yapı swaying spring ve rocking spring kabulü ile alt yapı kısımları bir bütün halde ele alınarak zemin faktörlerinin etkileri, dinamik analizler yardımıyla; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin tipleri için optimum sönümleyici problemi incelenmiş ve optimum sönümleyici probleminde zemin etkileri ortaya konmuştur.

Tez çalışmam süresince her türlü maddi ve manevi desteği veren babam Ahmet HASMADEN' e, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen saygı değer hocalarım Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA' ya ve Yrd. Doç. Dr. Ersin AYDIN' a, ihtiyaç duyduğum zamanlarda kaynaklarını benimle paylaşan Erciyes Üniversitesi öğretim üyesi Sn. Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA hocama teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv

SUMMARY v

ÖN SÖZ vi

İÇİNDEKİLER DİZİNİ vii

ÇİZELGELER DİZİNİ x

ŞEKİLLER DİZİNİ xi

FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ xv

SİMGE VE KISALTMALAR xvi

BÖLÜM I. GİRİŞ 1

1.1Amaç ve Kapsam 1

BÖLÜM II. DİNAMİK ETKİ ALTINDA ZEMİN ÖZELLİKLERİ 3

2.1 Tekrarlı Yüklenen Zemin Davranışı ve Özellikleri 3

2.1.1 Eşdeğer doğrusal modeller 3

2.1.2 Tekrarlı doğrusal olmayan modeller 13

2.1.3 İleri yapıcı modeller 13

2.2 Tekrarlı Yüklenen Zeminlerin Dayanımı 13

2.2.1 Yenilme tanımları 14

2.2.2 Devirsel dayanım 15

2.2.3 Tek düze dayanım 15

2.3 Gözlenen Zemin Tepkisinin Yorumlanması 15

BÖLÜM III. ZEMİNLERİN DİMANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ . 17

3.1 Dinamik zemin Özelliklerinin Ölçülmesi 17

3.2 Arazi Deneyleri 19

3.2.1 Çok küçük/küçük deformasyon deneyleri ile 20

3.2.2 Büyük deformasyon deneyleri ile 28
3.3 Laboratuvar Deneyleri 32
3.3.1 Çok küçük/küçük deformasyon deneyleri ile 32
3.3.2 Büyük deformasyon deneyleri ile 34
3.3.3 Model deneyleri ile 36
BÖLÜM IV. ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ 39
4.1 Zemin-Yapı Etkileşimine Genel Bakış 39
4.2 Zemin-Yapı Etkileşimi Problemlerinde Çözüm Yöntemi 42
4.2.1 Direkt yöntem 43
4.2.2 Viskoz sınır şartı 44
4.3 Yerel Zemin Koşulları 46
4.3.1 Yerel zemin kalınlığı.....47
4.3.2 Zemin spektrumları 47
4.3.3 Zemin periyodu ve zemin özelliklerinin üst yapıya etkisi 48
BÖLÜM V. YAPILARIN KONTROLÜ.....50
5.1 Akıllı Binalar 51
5.2 Aktif Yapı Kontrolü 55
5.3 Pasif ve Karma Yapı Kontrolü 55
5.3.1 Pasif kontrol 55
5.3.1.1 Taban (sismik) yalıtım sistemleri 56
5.3.1.2 Pasif enerji sönümleyen sistemler 61
5.3.2 Karma (Hybrid) kontrol 65
5.4 Sismik Yalıtım 65
5.4.1 Sismik yalıtımın sağladığı avantajlar 66
5.4.2 Sismik yalıtımın sağladığı teknik avantajlar 66
5.5 Sismik Yalıtımın Kullanım Alanları 68

BÖLÜM VI. KAYMA ÇERÇEVELERİNDE SÖNÜMLEYİCİLER ÜZERİNEYAPILAN ÇALIŞMALAR 70
BÖLÜM VII. KAYMA ÇERÇEVELERİNDE OPTİMUM SÖNÜMLEYİCİ DAĞILIMINA ZEMİN ETKİSİ 74
7.1 Problemin Formülasyonu 74
7.1.1 Tepe yerdeğiştirmesi için sönüm optimizasyonu 81
7.1.2 Tepe yerdeğiştirmesi için optimum sönüm kriterleri 82
7.1.3 Sönüm optimizasyonunda tepe yerdeğiştirmesi için çözüm algoritması 83
7.2 Sayısal Örnek 86
7.2.1 Analizler ve Yorumlar 88
BÖLÜM VIII SONUÇLAR ve ÖNERİLER 103
KAYNAKLAR 102
Ek-A 114
Ek-B 139
ÖZ GEÇMİŞ 158

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Dış etkilerin normal ve aşırı konsolide zeminlerde maksimum kayma modülü üzerine etkisi 6
Çizelge 2.2. G_{maks} ile arazi deney parametreleri arasındaki ampirik ilişkiler 7
Çizelge 2.3. Dış etkilerin (belirli bir birim deformasyon seviyesinde) normal ve aşırı konsolide zeminlerde kayma modülü oranı üzerine etkisi 9
Çizelge 2.4. Dış etkilerin (belirli bir birim deformasyon seviyesinde) normal ve aşırı konsolide zeminlerde sönümleme oranı üzerine etkisi 11
Çizelge 3.1. v_s ile SPT-N değeri arasındaki korelasyonlar 29
Çizelge 3.2. v_s ile q_c arasındaki ilişkiler 30
Çizelge 3.3. Zemin gruplarına bağlı olarak SPT-N, D_r, q_u, v_s 32
Çizelge 4.1 Zemin büyütmelerinin zemin türlerine göre değişimi 46
Çizelge 5.1 Yapı kontrol sistemlerinin sınıflandırılması 55
Çizelge 7.1. Uygulamada kullanmak üzere seçilen v_s, ν, G, ρ değerleri 87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kayma modülleri ve sönüm oranı 4
Şekil 2.2. G_{sec}'ın kayma birim deformasyonu ile tipik değişimini gösteren omurga eğrisi 5
Şekil 2.3. Çimentolanmamış silis kumlarında CPT uç direncinden G_{maks}' ın hesaplanması 8
Şekil 2.4. Plastisitesi farklı ince daneli zeminlerin modül azalım eğrileri..... 9
Şekil 2.5. Kumlu ve killi zeminlerde "kayma modülü oranı" ile "kayma deformasyonu" arasındaki ilişki 10
Şekil 2.6. İnce daneli zeminlerin sönümleme oranlarının devirsel kayma birim deformasyonu ve plastisite indisi ile değişimi 11
Şekil 2.7. Zeminlerin sönüm oranının birim kayma seviyesi ile değişimi 12
Şekil 2.8. Kumlu ve killi zeminlerde "sönüm" ile "kayma deformasyonu" arasındaki ilişki 12
Şekil 2.9. Devirsel yükleme sürecinde zemin daneleri arasında gelişen hareketler ... 14
Şekil 2.10. Ortalama ve devirsel kayma gerilmesi ile kayma birim deformasyonunun tanımları 14
Şekil 2.11. Değişik zeminlerin devirsel dayanım oranının devir sayısı ile değişimi .. 15
Şekil 3.1. Değişen deformasyon seviyelerinde değişik geoteknik yapılar, arazi ve laboratuvar deneylerinin Kayma Modülüne (G) etkisi 18
Şekil 3.2. Sismik jeofizik deneyleri için darbesel örselenme geliştirmenin değişik yöntemleri: (a) Sığ derinlikte patlama, (b) düşey çarpma, (c) yatay çarpma 20
Şekil 3.3. (a) Gelen ve yatay katman sınırından yansıyan P dalgasının ışın izi, (b) doğrudan ve yansımış dalgaların varış zamanlarındaki değişim 21
Şekil 3.4. Sismik kırılma deney düzeneği..... 22
Şekil 3.5. Dinamik olarak titreşen bir pabucun yakınında zemin yüzeyinde Rayleigh dalgasından kaynaklanan deformasyon 22
Şekil 3.6. Bir YDSA deneyinde kaynak ve alıcıların tipik düzeni 23
Şekil 3.7. YDSA testinden deneysel dispersiyon eğrisi 23

Şekil 3.8. Kuyudan kuyuya sismik deneyi: (a) iki kuyu düzenini kullanarak doğrudan ölçüm, (b) üçkuyu düzenini kullanarak aralık ölçümü 25
Şekil 3.9. (a) sismik kuyu yukarı, (b) sismik kuyu aşağı deneyi 26
Şekil 3.10. San Fransisco Körfez bölgesinde bir kuyu aşağı deneyine ait varış zamanı eğrisi 26
Şekil 3.11. Askıda Loglama Deneyi 27
Şekil 3.12. (a) SPT örnekleyicisi, (b) SPT örtü kalınlığı düzeltme faktörü 28
Şekil 3.13. (a) Sismik koni özelliği de olan tipik CPT (Baldi vd., 1988) , (b) CPT deneyinden elde edilen kayıtlar 30
Şekil 3.14. Marchetti düz dilatometresinin önden ve yandan görünüşü 31
Şekil 3.15. Tipik Rezonant kolon deney düzeneği: (a) yükleme sisteminin tepeden görünümü, ve (b) yükleme sistemi ve zemin numunesinin profil görünümü 33
Şekil 3.16. Piyezoelektrik bender elemanı. Pozitif voltaj elemanın bir tarafa; negatif voltajda da diğer tarafa eğilmesine neden olur 34
Şekil 3.17. Tipik üç eksenli düzeneği 35
Şekil 3.18. NGI tekrarlı basit kesme düzeneği. Zemin numunesi tek donatılı kauçuk membran içindedir 35
Şekil 3.19. İçi boş silindir düzeneği 36
Şekil 3.20. Dinamik zemin basıncı deneyinde kullanılan zemin hazneli sarsma tablası 37
Şekil 3.21. Bir geoteknik santrifüjünün enine kesiti 38
Şekil 3.22. G ve γs arasındaki ilişki 38
Şekil 4.1. Dinamik Sınırsız Ortam-Yapı Etkileşimi 40
Şekil 4.2. Katlı bir sistemde zeminin (a) rijit (b) zemin kayma dalgası hızı 50 m/s olması durumunda ilk beş mod şeklinin ve frekansının değişimi 42
Şekil 4.3. Zemin modelleme şekilleri 42
Şekil 4.4. Zemin yapı etkileşim analiz metotları 43
Şekil 4.5. Zemin yüzeylerinin kesilmesi 43
Şekil 4.6. Direkt Yöntem'de sınır şartları 45
Şekil 4.7. Yerel zemin kalınlığının maksimum temel kesme kuvvetine etkisi 47
Şekil 4.8. Değişik zeminler için spektral ivme periyot ilişkisi 48

Şekil 5.1. Akıllı bina şeması A: Uyumsal yapılar, B: Duyumsal yapılar, C: Kontrollü yapılar, D: Aktif yapılar, E: Akıllı yapılar 53
Şekil 5.2. Düşük sönümlü doğal kauçuk mesnet 58
Şekil 5.3. Kauçuk esaslı sismik izolatör 58
Şekil 5.4. "SCOUGAL" Yüksek sönümlü kauçuk mesnet 59
Şekil 5.5. Sürtünme esaslı izolatörün çalışma prensibi 60
Şekil 5.6. Metal sönümleyici tiplerinin yerleştirilmesi 62
Şekil 5.7. Sumitomo sürtünme aygıtının kurulumu 62
Şekil 5.8. Pall sürtünme aygıtı 63
Şekil 5.9. Visko-Elastik Sönümleyici modeli 63
Şekil 5.10. Viskos sönümleyici modeli 64
Şekil 5.11. Ayarlanmış kütle sönümleyici modeli 64
Şekil 5.12. Sismik yalıtımın yapıldığı bir binada, sismik yalıtılmış kattan sonraki katlarda farklı deplasmanlar oluşmaz 67
Şekil 6.1. Kazıklı temele sahip esnek alt ve üst yapının birlikte modeli 71
Şekil 6.2. Üst katta yerleştirilen kütleli sönümleyici yay sistemi ile zemin yüzeyinin birlikte modeli 72
Şekil 6.3. Zemin ile yapının birlikte modellenmesi 73
Şekil 7.1. Zemin-yapı profili 74
Şekil 7.2. Yapı modelinin deformasyon şekli 79
Şekil 7.3. Bir yapıya ait sönümsüz haldeki açısal frekansın katlar arası öteleme transfer fonksiyonu genliği ve yaptığı tepe 82
Şekil 7.4. Yapı-zemin etkileşimli 5 katlı kayma çerçevesi modeli 87
Şekil 7.5. $W=1.10^6$ Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı 88
Şekil 7.6. $W=5.10^6$ Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı 89
Şekil 7.7. $W=15.10^6$ Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı 89

Şekil 7.8. W=20.10^6 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı 90
Şekil 7.9. W=1.10^7 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı 90
Şekil 7.10. W=5.10^7 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı 90
Şekil 7.11. W=15.10^7 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı 91
Şekil 7.12. W=20.10^7 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı 91
Şekil 7.13. W=1.10^6 lık sönüm için sönümleyicili (a) ve sönümleyicisiz (b) analizden 1. kata ait toplam yerdeğiştirme ve ivmenin zemin cinsleriyle karşılaştırılması 93
Şekil 7.14. W=1.10^7 lık sönüm için sönümleyicili (a) ve sönümleyicisiz (b) analizden 1. kata ait toplam yerdeğiştirme ve ivmenin zemin cinsleriyle karşılaştırılması 94
Şekil 7.15. W=15.10^7 lık sönüm için sönümleyicili (a) ve sönümleyicisiz (b) analizden 1. kata ait toplam yerdeğiştirme ve ivmenin zemin cinsleriyle karşılaştırılması 95
Şekil 7.16. El Centro deprem datası..... 96
Şekil 7.17. Zemin sınıfına ve toplam sönüm katsayışarına göre optimum sönümleyici dağılımı 100
Şekil 7.18. Zemin sınıfına ve toplam sönüm katsayışarına göre optimum sönümleyici dağılımı 101
Şekil 7.19. Zemin sınıfına ve toplam sönüm katsayışarına göre optimum sönümleyici dağılımı 102

FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 5.1. GERB viskosönümleyici 60
Fotoğraf 5.2. Normal yapıda farklı deplasman dolayısıyla kolon-kiriş davranışı 67
Fotoğraf 5.3. Sismik yalıtımlı yapı ile normal yapının karşılaştırması 67
Fotoğraf 5.4. Yokohoma/ Japonya 68
Fotoğraf 5.5 Atatürk Hava Limanı Dış Hatlar Terminali/ İstanbul 69

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	**Açıklama**
A	: Etkili alan
c	: Efektif sönüm
C	: Sistemin sönüm matrisi
C_B	: Yapının sönüm matrisi
c_{di}	: Sönüm katsayıları
$\overline{c_{di}}$	: Her bir sönümleyicinin sönüm katsayısı için bilinen üst sınır değer
C_d	: Eklenen sönümleyicilere ait bilinmeyen sönüm matrisi
c_R	: Açısal yay sönüm katsayısı
C_R	: Zeminin açısal sönüm matrisi
c_s	: Doğrusal yay sönüm katsayısı
C_S	: Zeminin doğrusal sönüm matrisi
CyT-CAU	: Drenajsız, konsolide üç eksenli deneyi
D	: Sönümleme oranı
D_{maks}	: Maksimum sönüm oranı
D_r	: Rölatif sıkılık (%)
e	: Boşluk oranı
E	: elastisite modülü
E_D	: Dilatometre modülü
f	: Amaç fonksiyonu
$f_{,i}$	: Amaç fonksiyonunun birinci dereceden türev değerleri
f_s	: Çeper sürtünmesi
G_{tan}	: Tanjant kayma modülü
G_{sec}	: Sekant kayma modülü
G	: Kayma modülü
G_{maks}	: Maksimum kayma modülü
$G_{ur,c}$	:Tekrarlı PMT'den düzeltilmiş boşaltma-yükleme

	modülü
G_{ur}	: PMG'nin boşaltma-yükleme kısmının sekant modülü
H	: Zeminden yükseklik
h	: Kat yüksekliği
I_D	: Materiyal indisi
I_p	: Plastisite indisi
I_{R0}	: Temel kütle atalet momenti
I_R	: Kat kütle atalet momenti
K	: Sistemin rijitlik matrisi
K_B	: Yapının rijitlik matrisi
K_D	: Yatay gerilme indisi
k_R	: Açısal yay rijitlik katsayısı
K_R	: Zeminin açısal rijitlik matrisi
k_s,	: Doğrusal yay rijitlik kat sayısı
K_S	: Zeminin doğrusal rijitlik matrisi
m	: Katların kütlesi
M	: Sistemin kütle matrisi
M_B	: Yapının kütle matrisi
M_{BR}	: Açısal yaya ait kütle matrisi
M_{BS}	: Doğrusal yaya ait kütle matrisi
m_0	: Temele ait kütle
m	: Katların kütlesi
m_0	: Temele ait kütle
N	: Tekrarlı yük sayısı
p_o	: Membranın kalkış basıncı
p_1	: Membran merkezinin 1,1 mm hareket ettiği basınçlar
P	: Birincil yüzey dalgası
q_c	: Uç direnci
q_u	: Basınç direnci
r	: Yapının oturma alanının eşdeğer teğet çemberin yarıçapı
r	: Etki vektörüdür

R	: Korelasyon katsayısı
S	: İkincil yüzey dalgası
SPT-N	: 30 cm'lik kısmı çakmak için gerekli darbe sayısı
T	: Periyot
t_g	: Jeolojik yaş
u	: Yapının malzeme kaynaklı iç yapısında oluşan deplasman
u_6	: Yapının zeminden kaynaklanan yatay deplasmanı
u_7	: Temel dönmesinden kaynaklanan açısal deplasman
U(t)	: Zaman bağlı deplasman
$U_{da}(\omega)$	: Yerdeğiştirme vektörünün Fourier dönüşümü
v_s	: Zeminin kayma dalga hızı
W	: Toplam sönüm
$\overline{W}$	: Sönümleyicilerin sönüm katsayılarının toplamı için verilen bir üst sınır değer
X	: Transfer fonksiyonu
X_5	: Tepedeki göreli deplasman
X_6	: Zeminin yatay deplasmanı
X_7	: Zeminin açısal deplasmanı
α	: Empedans katsayısı
ϕ	: Faz farkı
γ	: Tekrarlı deformasyonun büyüklüğü
$\dot{\gamma}$	: Birim deformasyon hızı
γ_c	: Kayma birim deformasyon genliği
ζ_o	: Yapısal sönüm
λ	: Tekrarlı birim deformasyon genliği
ν	: Poisson oranı
ρ	: Dane yoğunluğu
σ_m'	: Efektif çevre basıncı
σ_o'	: Ortalama asal efektif gerilme

σ_v'	: Düşey efektif gerilme
τ_c	: Kayma gerilmesi
τ_{ort}	: Ortalama kayma gerilmesi
τ_{dev}	: Devirsel kayma gerilmesi
$u(t)$	: Yerdeğiştirme vektörü
$\dot{u}(t)$	: Hız vektörü
$\ddot{u}(t)$	: İvme vektörü
$\ddot{u}_g(t)$	: Yer ivmesi
ω	: Doğal frekans

Kısaltmalar	**Açıklama**
AKO	: Aşırı konsolide oranı
CPT	: Koni penetrasyon deneyi
DMT	: Dilatometre deneyi
PMT	: Presiyometre deneyi
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
SEM	: Sonlu elemanlar metodu
ZYE	: Zemin yapı etkileşimi

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Depremlerin neden olduğu hasarların dağılımı ve karakteri üzerinde zeminlerin tekrarlı yüklere verdiği tepkinin kuvvetli bir etkisi söz konusudur. Bu tepki büyük ölçüde zeminin mekanik özellikleri tarafından kontrol edilir. Çok değişik özelliklere sahip olan zeminler ve bu zeminlerin deprem etkisi altında göstereceği davranışı tahmin etmek oldukça zor bir problemdir.

Deprem esnasında yapıya gelen kuvvetler, yapının rijitliğinin değiştiği kolon-döşeme geçişlerine etki etmektedir. Bu hassas noktalarda yapının kütle ve rijitlik merkezlerinin konumlanmalarına bağlı olarak, deprem etkisi ile rölatif kat ötelemelerini minimize etmek amacıyla, temel ile temele ilişik kolonlar arasında sönümleyici elemanlar kullanılması bilinen bir çözüm yöntemidir.

Deprem etkisi altındaki yapı tasarımının son yıllarda ulaştığı noktada, yapıların dış etkilere karşı rijitlik, dayanım ve özellikle sönüm özelliklerini değiştiren; pasif, aktif ve yarı aktif sistemler geliştirilmiştir. Bu elemanların optimizasyonları pek çok bilimsel çalışmaya konu olmaktadır. Pasif sönümleyicilerin optimizasyonu gerek yapısal davranışın daha iyileştirilmesi, gerekse ekonomik sebeplerden dolayı, deprem bölgelerindeki yapılar için oldukça önemli bir konudur. Literatürde zemin özellikleri genellikle ihmal edilerek sadece üst yapı davranışları göz önüne alınmaktadır. Zeminin özelliklerini dikkate alan çalışma oldukça sınırlıdır.

Bu tez çalışmasında; zemin-yapı arasındaki rijitlik farkından ötürü yapıya gelecek taban kesme kuvvetini, yapıyı kayıcı mesnetler üzerine oturtmak suretiyle, sürtünme enerjisi haline çevirmek ve bunun sonucu olarak da rölatif kat ötelemelerini izin verilebilir seviyelere düşürmek amacıyla elastik olarak mesnetli bir kayma yapı modeli, üst yapı doğrusal ve açısal yay ile alt yapı kısımları bir bütün halde ele alınarak, yani zemin ve yapı beraber modellenerek, yapının doğal sönümünde lokal optimizasyona, zemin faktörlerinin etkileri dinamik analizler yardımıyla; gevşek, orta

sıkı ve sıkı kum zemin tipleri için optimum sönümleyici problemi incelenmiş ve optimum sönümleyici probleminde zemin etkileri ortaya konmuştur.

Bu tez çalışması, yedi bölümden oluşmakta olup; birinci bölümde tezin amacı ve kapsadığı alanlar, ikinci bölümde dinamik etki altındaki zemin özellikleri, üçüncü bölümde zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi, dördüncü bölümde zemin yapı etkileşimi problemlerini tanıma ve çözüm metodlarına ilişik temel bilgiler, beşinci bölümde sismik yalıtım, altıncı bölümde konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar hakkında kısa literatür derlemesi, yedinci bölümde kayma çerçevelerinde optimum sönümleyici dağılımına zeminin etkisini gösteren sayısal bir uygulama, sekizinci bölümde ise sonuç ve önerilerden bahsedilmektedir.

BÖLÜM II

DİNAMİK ETKİ ALTINDA ZEMİN ÖZELLİKLERİ

2.1 Tekrarlı Yüklenen Zemin Davranışı ve Özellikleri

Zeminin dinamik özellikleri; yoğunluk ve gerilme şartlarına ek olarak zeminin yapısı, yaşı, gerilme deformasyon tarihçesi ve çimentolanma gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Zemin rijitliğinin; tekrarlı birim deformasyon genliği (λ), boşluk oranı (e), ortalama asal efektif gerilme (σ'_{ort}), plastisite indisi (I_p), aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ve tekrarlı yük sayısı (N) gibi faktörlere bağlı olduğu, laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlarla ortaya konmuştur. Ancak tekrarlı yükler altında zemin davranışının daha iyi açıklanabilmesi amacıyla üç model geliştirilmiştir. Bu modeller; eşdeğer doğrusal modeller, tekrarlı doğrusal olmayan modeller ve ileri yapıcı modellerdir (Kramer, 2003).

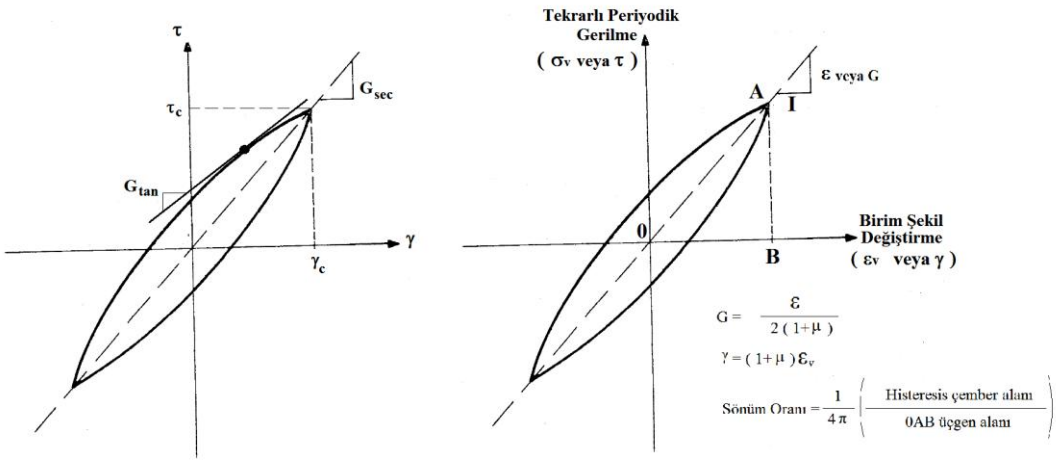
Bu modellerin daha iyi anlaşılabilmesi için taneli madde davranışının temel özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Zeminin özel elastik partiküllerden oluştuğu varsayımı ile düşük deformasyon zemin davranışları açıklanabilmektedir. Zemin partikülleri arasındaki etkileşimlerin analizi ile mikro mekanik modeller geliştirilmektedir (Kramer, 2003).

2.1.1 Eşdeğer doğrusal modeller

Eşdeğer doğrusal modeller, simetrik tekrarlı yüklemeye maruz zeminlerin histerez döngüsü sergilediğini ve bu döngünün iki önemli özelliğinin eğim ve genişlik olduğunu belirtmektedir. Döngünün eğimi zeminin rijitlik derecesine bağlıdır. Zeminin rijitlik derecesi yükleme sırasında herhangi bir noktada tanjant kayma modülü (G_{tan}) olarak tanımlanmakta ve döngü sırasında sürekli değişmektedir. Döngünün genel eğimi sekant kayma modülü (G_{sec}) olarak kabul edilir ve kayma gerilmesi (τ_c), kayma birim deformasyon genliği (γ_c) olmak üzere;

$$G_{sec} = \tau_c / \gamma_c \tag{2.1}$$

şeklinde ifade edilir. Eşdeğer doğrusal modeller zeminlerin doğrusal olmayan davranışını modellemede yaklaşık bir model olduğundan kalıcı deformasyon veya gerilme problemlerinde kullanılamamaktadır. Model, tekrarlı yüklemeden sonra birim deformasyonun daima sıfıra döneceğini ifade etmektedir (Şekil 2.1).

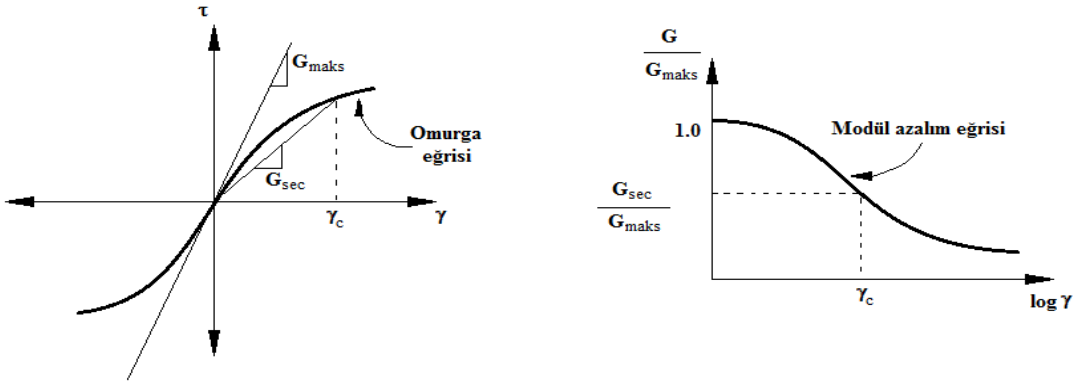


Şekil 2.1. Kayma modülleri ve sönüm oranı (Özaydın, 1982)

Eşdeğer doğrusal modeller; kayma modülü (G), maksimum kayma modülü (G_{maks}) ve sönümleme oranı (D) ifadelerini şu şekilde açıklamaktadır. Bir elemanın sekant kayma modülü (G_{sec}) tekrarlı kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak değişmektedir. Ancak bu değişim ters orantılı olup birim deformasyon genliği artarken sekant kayma modülü azalmaktadır (Şekil 2.2). Farklı tekrarlı birim deformasyon genliklerinin histeriz döngülerinin uç noktaları birleştirilerek omurga eğrisi oluşturulur ve bu eğrinin orijindeki eğimi maksimum kayma modülü G_{maks}'ı ifade eder. Tekrarlı eşik kayma deformasyonunun altındaki birim deformasyonlarda enerjinin histeriz sönümlenmesi teorik olarak beklenmemesine karşın deneysel araştırmalar sonucunda düşük birim deformasyon değerlerinde de enerji sönümlemeleri gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu araştırmalar sönümleme oranının hiçbir zaman sıfır olmadığı ve birim deformasyon genliği ile arttığını göstermiştir (Kramer, 2003).

Kayma modülü (G): Laboratuvar deneyleri göstermiştir ki, zemin rijitliğini etkileyen faktörler; tekrarlı deformasyonun büyüklüğü (γ), boşluk oranı (e), efektif gerilme (σ_v'), rölatif sıkılık (D_r), ortalama asal efektif gerilme (σ_o'), plastisite indisi (I_p), aşırı

konsolidasyon oranı (AKO) ve tekrarlı çevrim sayısı (N) dır. Bir zemin elemanı için secant kayma modülü (G_{sec}), kayma deformasyonunun büyüklüğüne dayalı olarak değişmektedir. Düşük deformasyon seviyelerinde secant kayma modülü yüksek iken deformasyon arttıkça azalır. Farklı tekrarlı deformasyon büyüklüklerine ait histerezis halkaların uç noktalarının oluşturduğu geometrik eğri, omurga eğrisi olarak tanımlanmaktadır. Bu eğrinin orijindeki (deformasyonun sıfır olduğu andaki) eğimi kayma modülünün maksimum değerine (G_{maks}) karşılık gelir. Daha büyük deformasyonlarda ise kayma modülü oranları (G/G_{maks}) 1'den daha düşük değerlere düşer (Şekil 2.2). Dolayısıyla bir zemin elemanının rijitliğinin tanımlanmasında; maksimum kayma modülü (G_{maks}) ve kayma modülü oranının (G/G_{maks}), deformasyona ve diğer parametrelere dayalı olarak değişiminin düşünülmesi gerekir. Kayma modülü oranının kayma deformasyonu ile değişimi grafik olarak modül azalım eğrisi ile tanımlanır (Kramer, 2003).



Şekil 2.2. G_{sec}'ın kayma birim deformasyonu ile tipik değişimini gösteren omurga eğrisi (Kramer, 2003)

Dış etkilerin normal ve aşırı konsolide zeminlerde maksimum kayma modülü üzerindeki etkilerinin kısa bir özeti Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Dış etkilerin normal ve aşırı konsolide zeminlerde maksimum kayma modülü üzerine etkisi (Kramer, 2003)

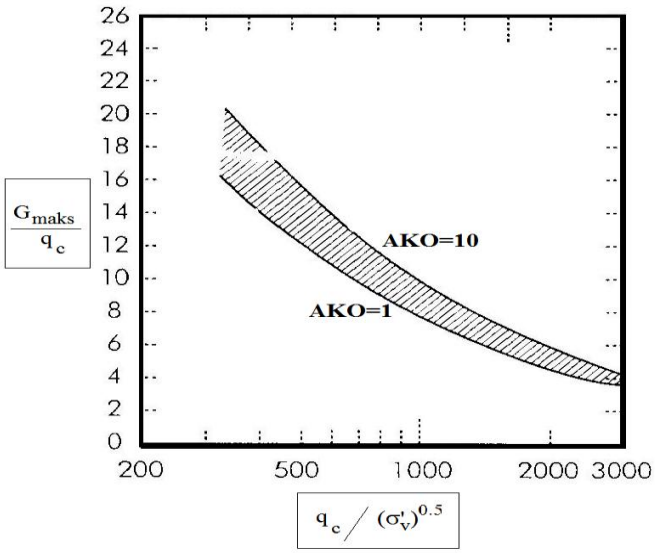
Artan Özellik	G_{maks}
Efektif çevre basıncı, σ_m'	σ_m' ile birlikte artar
Boşluk oranı, e	e ile birlikte azalır
Jeolojik yaş, t_g	t_g ile artar
Çimentolanma, c	c ile artar
Aşırı konsolidasyon oranı, AKO	AKO ile artar
Plastisite indisi, I_p	AKO>1 ise I_p ile artar; AKO=1 ise yaklaşık olarak sabit kalır.
Birim deformasyon hızı, $\dot{\gamma}$	Plastik olmayan zeminlerde bir etkisi yoktur; plastik zeminlerde $\dot{\gamma}$ ile artar. ($\dot{\gamma}$ ' nın bir logaritmik devrinde yaklaşık %10' a kadar artar.)
Tekrarlı çevrim sayısı, N	Büyük γ_c' lerin N kez tekrarından sonra azalır fakat daha sonra killerde zamanla toparlar; kumlarda N ile artar.

Çizelge 2.2'de farklı zemin tipleri için G_{maks}'ı belirlemede kullanılan korelasyonlar verilmiştir. Ayrıca Şekil 2.3'de silis kumları için q_c ile G_{maks} arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. G_{maks} ile arazi deney parametreleri arasındaki ampirik ilişkiler (Kramer, 2003)

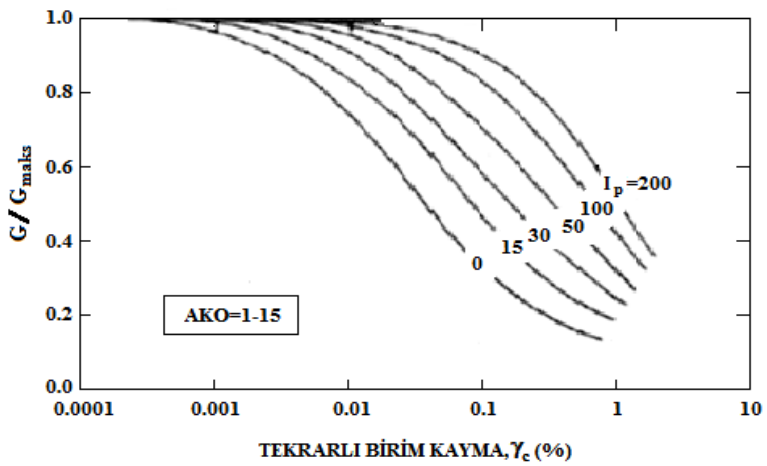
Yerinde deney	Bağıntı	Zemin Türü	Kaynaklar	Açıklamalar
SPT	$G_{maks} = 20.000(N_1)_{60}^{0.333}(\sigma_m^{'})^{0.5}$	Kum	*Ohta ve Goto (1976), Seed vd. (1986)*	*G_{maks} ve $\sigma_m^{'}$ birimi lb/ft^2*
	$G_{maks} = 325N_{60}^{0.68}$	Kum	*Imai ve Tonouchi (1982)*	*G_{maks} birimi kips/ft^2*
CPT	$G_{maks} = 1634(q_c)^{0.250}(\sigma_v^{'})^{0.375}$	Kuvars kumu	*Rix ve Stokoe (1991)*	*G_{maks} , q_c ve $\sigma_{v'}$ birimi kPa; İtalya'daki arazi deneylerine ve ve kalibrasyon oda deneylerine dayalı*
	Şekil 2.3	Silis kumu	*Baldi vd. (1986)*	*G_{maks} , q_c ve $\sigma_{v'}$ birimi kPa; İtalya'daki arazi deneylerine dayalı*
	$G_{maks} = 406(q_c)^{0.695}e^{-1.130}$	Kil	*Mayne ve Rix (1993)*	*G_{maks} , q_c ve $\sigma_{v'}$ birimi kPa; Dünyanın değişik yerlerine ait verilere dayalı*
DMT	$G_{maks} / E_D = 2,72 \pm 0,59$	Kum	*Baldi vd. (1986)*	*Oda kalibrasyon deneylerine bağlı*
	$G_{maks} / E_D = 2,2 \pm 0,7$	Kum	*Bellotti vd. (1986)*	*Arazi deneylerine dayalı*
	$G_{maks} = \frac{530}{(\sigma_v^{'} / p_a)^{0.25}} \frac{\gamma_D / \gamma_w - 1}{2,7 - \gamma_D / \gamma_w} K_0^{0.25}(p_a \sigma_v^{'})^0$	Kum, Silt, Kil	*Hryciw (1990)*	*G_{maks} , q_a ve σ_v' birimleri aynı; γ_D : zeminin dilatometreden belirlenen birim ağırlığı; arazi deneylerine dayalı*

PMT	$3,6 \le (G_{maks} / G_{ur,c}) \le 4,8$	Kum	*Bellotti vd. (1986)*	*$G_{ur,c}$; tekrarlı PMT'den düzeltilmiş boşaltma-yükleme modülü*
	$G_{maks} = 1,68 G_{ur} / \alpha_p$	Kum	*Byrne vd. (1991)*	*G_{ur}; PMG'nin boşaltma-yükleme kısmının sekant modülü; α: boşaltma-yükleme şartlarına bağlı bir faktör; teoriye ve arazi deneylerine dayalı*



Şekil 2.3. Çimentolanmamış silis kumlarında CPT uç direncinden G_{maks}' ın hesaplanması (Kramer, 2003)

Kayma Modülü Oranı (G/G_{maks}): Geoteknik deprem mühendisliğinin ilk yıllarında kaba ve ince daneli zeminlerin kayma modülü azalım davranışlarının ayrı olduğu düşünülürken; son çalışmalar göstermiştir ki, plastik ince daneli zeminler ile plastik olmayan kaba daneli zeminlerin davranışları arasında kademeli bir geçiş bulunmaktadır (Şekil 2.4 ve 2.5).

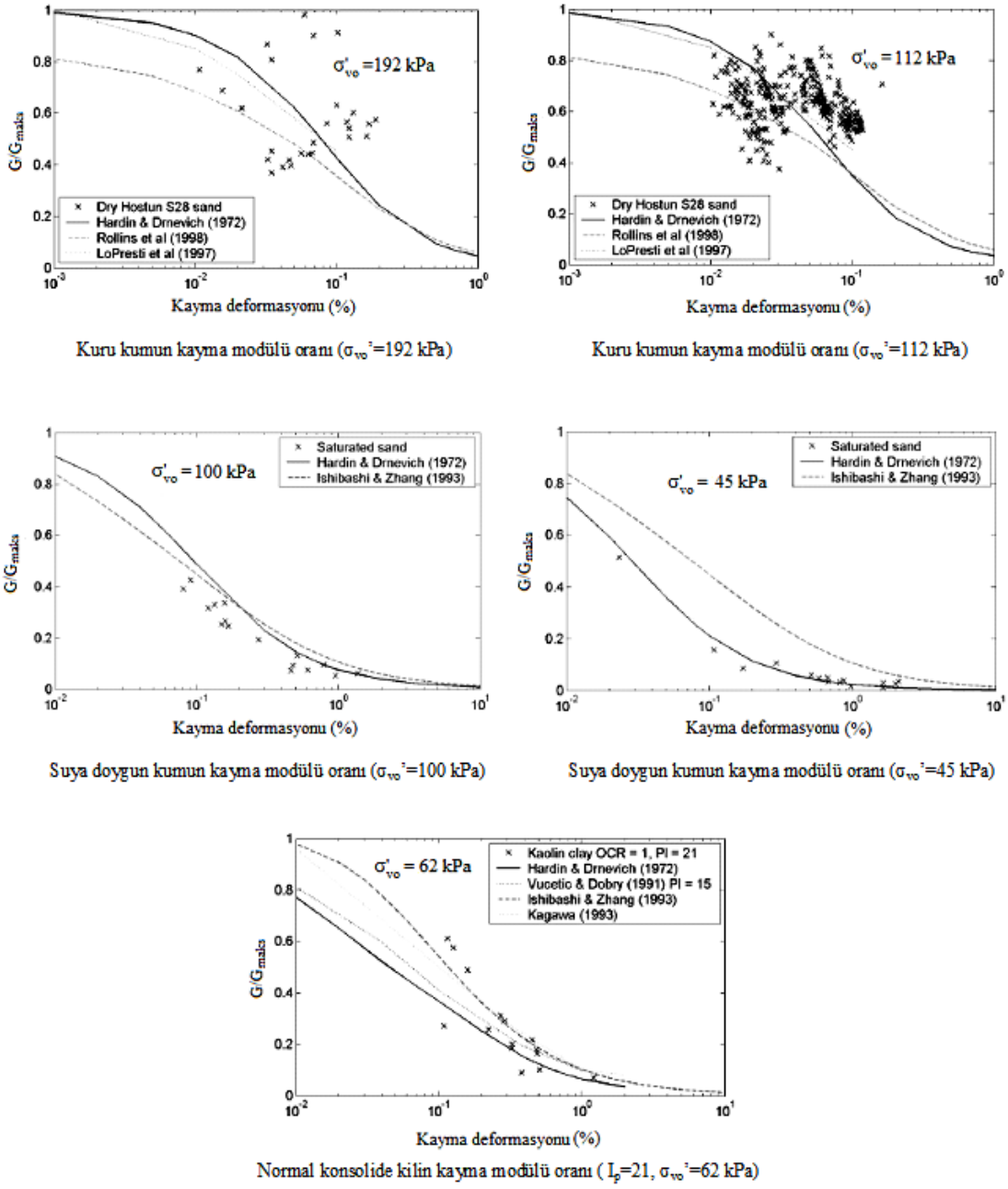


Şekil 2.4. Plastisitesi farklı ince daneli zeminlerin modül azalım eğrileri (Vucetic ve Dobry, 1991)

Dış etkilerin normal ve aşırı konsolide zeminlerde kayma modülü oranı üzerindeki etkilerinin kısa bir özeti Tablo 2.3' de verilmiştir.

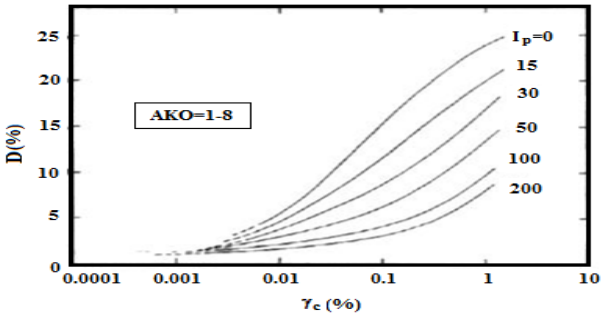
Çizelge 2.3. Dış etkilerin (belirli bir birim deformasyon seviyesinde) normal ve aşırı konsolide zeminlerde kayma modülü oranı üzerine etkisi (Kramer, 2003)

Artan Özellik	**G/G_{maks}**
Efektif çevre basıncı, σ_m'	σ_m' ile birlikte artar; artan I_p ile birlikte etki azalır.
Boşluk oranı, e	e ile birlikte artar
Jeolojik yaş, t_g	t_g ile artabilir
Çimentolanma, c	c ile artabilir
Aşırı konsolidasyon oranı, AKO	Etkilenmez
Plastisite indisi, I_p	I_p ile artar
Tekrarlı birim deformasyon, γ_c	γ_c ile azalır
Birim deformasyon hızı, $\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma}$ ile G artar fakat G ve G_{maks} aynı $\dot{\gamma}$'da ölçülürse G/G_{maks} muhtemelen etkilenmez.
Tekrarlı çevrim sayısı, N	Killerde büyük γ_c'nin N kez tekrarından sonra azalır (G_{maks} N devirden önce ölçülür), kumlarda (drenajlı şartlarda) artabilir veya (drenajsız şartlarda) azalabilir.



Şekil 2.5. Kumlu ve killi zeminlerde "kayma modülü oranı" ile "kayma deformasyonu" arasındaki ilişki (Brennan vd. 2004)

Sönüm oranı (D): Sönüm oranı; tekrarlı deformasyonun büyüklüğü (γ), boşluk oranı (e), efektif gerilme (σ_v'), rölatif sıkılık (D_r), ortalama asal efektif gerilme (σ_m'), plastisite indisi (I_p), aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ve tekrarlı çevrim sayısı (N) gibi parametreler bağlıdır. Kayma modülü azalımı gibi, plastik karakteristiklerden etkilenmektedir. Yüksek oranda plastik zeminlerin sönüm oranı aynı tekrarlı deformasyon seviyesi için düşük plastisiteli zeminlere oranla daha düşüktür (Şekil 2.6).



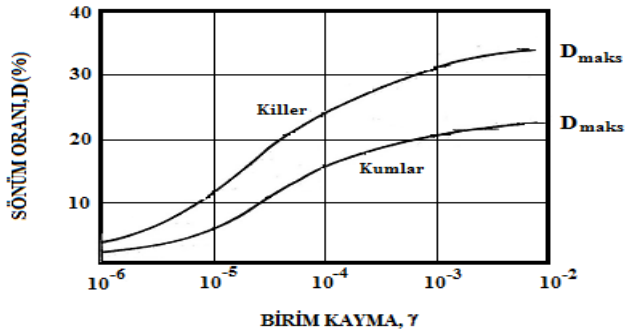
Şekil 2.6. İnce daneli zeminlerin sönümleme oranlarının devirsel kayma birim deformasyonu ve plastisite indisi ile değişimi (Vucetic ve Dobry, 1991)

Dış etkilerin normal ve aşırı konsolide zeminlerde sönümleme oranı üzerindeki etkilerinin kısa bir özeti Tablo 2.4' de verilmiştir.

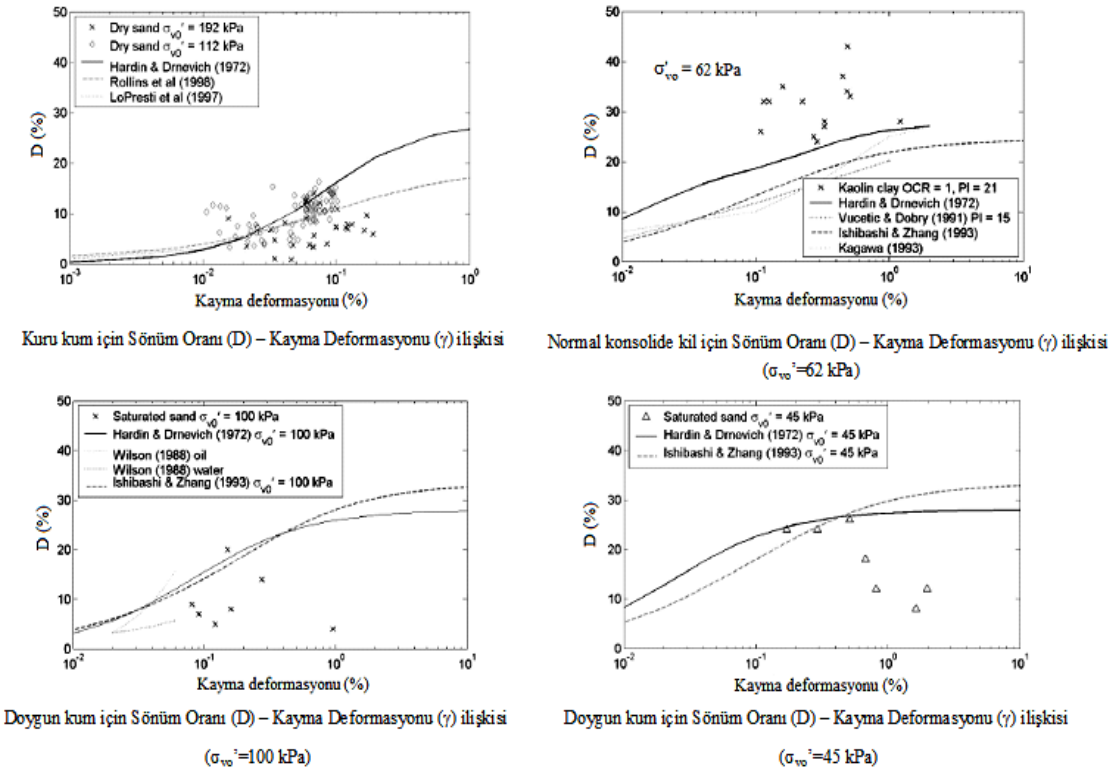
Çizelge 2.4. Dış etkilerin (belirli bir birim deformasyon seviyesinde) normal ve aşırı konsolide zeminlerde sönümleme oranı üzerine etkisi (Kramer, 2003)

Artan Özellik	D
Efektif çevre basıncı, σ_m'	σ_m' ile birlikte azalır; artan I_p ile birlikte etki azalır.
Boşluk oranı, e	e ile birlikte azalır
Jeolojik yaş, t_g	t_g ile azalır
Çimentolanma, c	c ile azalabilir
Aşırı konsolidasyon oranı, AKO	Etkilenmez
Plastisite indisi, I_p	I_p ile azalır
Tekrarlı birim deformasyon, γ_c	γ_c ile artar
Birim deformasyon hızı, $\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma}$ ile sabit kalır veya artabilir
Tekrarlı çevrim sayısı, N	Orta derece γ_c ve N değerlerinde önemli değildir.

Sönüm oranı değeri, birim kayma mertebesi arttıkça artmaktadır. Sönüm oranının birim kayma seviyesi ile değişimi kumlar ve killer için deneysel eğriler ile belirlenebilmektedir (Şekil 2.7 ve 2.8).



Şekil 2.7. Zeminlerin sönüm oranının birim kayma seviyesi ile değişimi (Özaydın, 1982)



Şekil 2.8. Kumlu ve killi zeminlerde "sönüm" ile "kayma deformasyonu" arasındaki ilişki (Brennan vd., 2004)

Sönüm türleri, aşağıda belirtilen şekilde mevcuttur.

- Viskoz sönüm,
- Yapısal sönüm,
- Coulomb sönümü,
- Negatif sönüm,
- Geometrik sönüm.

Bunlardan viskoz sönüm ve yapısal sönüm doğrudan malzemenin içyapısı ile ilgilidir (Özaydın, 1982).

2.1.2 Tekrarlı doğrusal olmayan modeller

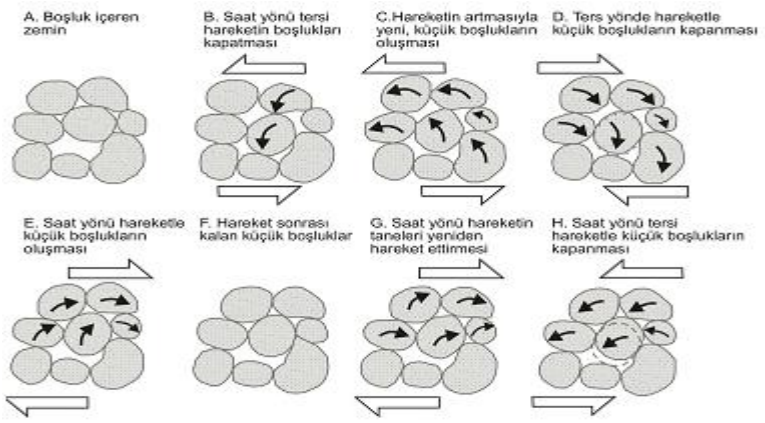
Tekrarlı doğrusal olmayan modeller zemin kayma dayanımını boşluk suyu basınçlarıyla birlikte, drenajsız tekrarlı yükleme altında efektif gerilmedeki değişimleri de ortaya koyabilmektedir. Omurga eğrisi, boşaltma yükleme davranışı ve rijitlik düşüsü gibi ortak temeller üzerine kurulan bu modellerde düzensiz yükleme, yoğunlaşma, boşluk suyu basıncı değişimi gibi etkiler modellenmeye çalışılmıştır. Zemin tepkisini hesaplama modellerinde kullanıldığında, deprem sarsıntısı sırasında baslık suyu basıncı oluşumunun, değişiminin ve sönümlenmesinin belirlenmesine imkan vermektedir (Kramer, 2003).

2.1.3 İleri yapıcı modeller

İleri yapıcı modeller genel başlangıç gerilme şartları, gerilme izleri, asal gerilme eksenleri, tekrarlı yükleme, birim deformasyon hızları, drenajlı ve drenajsız zemin davranışı ilkeleri üzerine geliştirilmiştir. İleri yapıcı modeller zeminlerin tekrarlı yükleme davranışlarını genelleştirmeye imkân vermesine rağmen çok fazla parametreye ihtiyaç olduğunda kullanımı sınırlıdır (Kramer, 2003).

2.2 Tekrarlı Yüklenen Zeminlerin Dayanımı

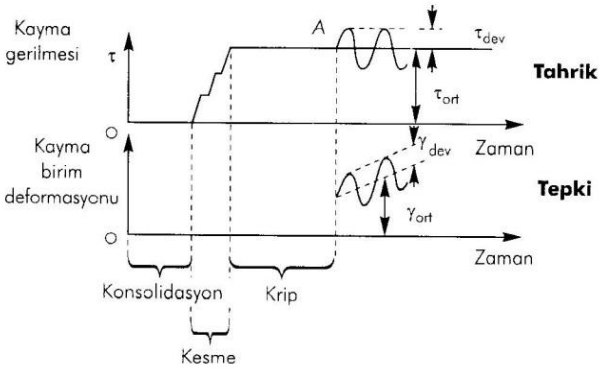
Tekrarlı yükleme altındaki zeminlerin sınır dayanımlarının bilinmesi, şev stabilitesi, temel dizaynı, istinat yapıları dizaynı problemlerinde hayati öneme sahiptir (Şekil 2.9). Zemine ait davranışı incelemede; drenajlı ve drenajsız şartlardaki, iri daneli kohezyonsuz zemin ile ince daneli kohezyonlu zemin numunelerini kullanmak en iyi sonuca ulaştıracaktır. Zira deprem anında drenaj olabilen çoğu zemin, sık yüklemeye maruz kalması neticesinde drenajsız olarak yüklenmeye maruz kalmaktadır (Kramer, 2003).



Şekil 2.9. Devirsel yükleme sürecinde zemin daneleri arasında gelişen hareketler (Youd 1977; Hazırbaba, 2005)

2.2.1 Yenilme tanımları

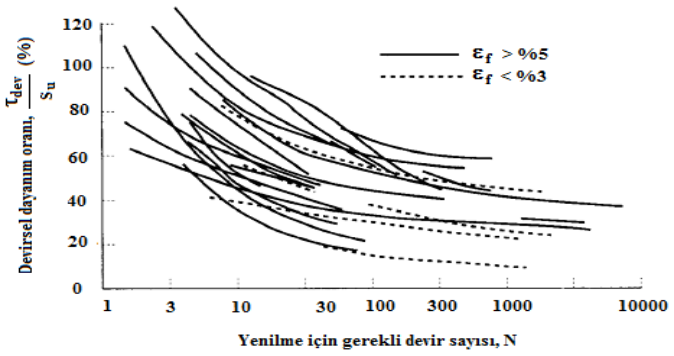
Bir zemin elemanının dayanımı tipik olarak "yenilme" noktasında mobilize olan kayma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Fakat yenilmenin çok değişik tanımlanma şekilleri vardır. Arazideki yenilmeler genellikle deney sistemlerinin izin verdiği deformasyonların üzerinde gerçekleşmektedir. Deformasyonlar zeminin belirli bir hacmine etkiyen birim deformasyonların bir sonucu olarak geliştiğinden, bir zemin elemanının herhangi bir noktasındaki yenilme çoğu zaman bir sınırlayıcı birim deformasyon ile tanımlanmaktadır. "Devirsel dayanım" tekrarlı yükleme sırasında tekrarlı ve/veya ortalama birim deformasyonun sınır değerine dayalıdır. "Tekdüze dayanım", tekrarlı yükleme durduktan sonra mobilize olan nihai statik dayanımdır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Ortalama ve devirsel kayma gerilmesi ile kayma birim deformasyonunun tanımları (Goulois vd., 1985)

2.2.2 Devirsel dayanım

Tekrarlı ve kalıcı deformasyon seviyeleri, çok sayıdaki geoteknik deprem mühendisliği problemlerinde ilgi konusudur. Bunlar, dalga yüklerine maruz kalan denizsel yapıların temel tasarımında da önemlidir. Bir zemin elemanının devirsel dayanımı, ortalama kayma gerilmesi τ_{ort} ile devirsel kayma gerilmesi τ_{dev} arasındaki ilişkiye bağlıdır (Kramer, 2003). Yenilme tanımı tekrarlı kayma birim deformasyonunun (γ) belirli bir seviyesi için (genelde %3) yapıldığı zaman, τ_{ort} /s_u şeklinde tanımlanan devirsel dayanım oranı artan devir sayısı ile birlikte azalır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Değişik zeminlerin devirsel dayanım oranının devir sayısı ile değişimi (Lee ve Focht, 1976)

2.2.3 Tek düze dayanım

Deprem sarsıntısı sona erdikten sonra şevlerin ve istinad duvarlarının statik duraylılığı ile temellerin kapasitesinin değerlendirilmesi konusu geoteknik deprem mühendisliğinde bir diğer önemli problemi oluşturmaktadır (Kramer, 2003).

Doygun bir zeminin nihai (rezidüel, yüksek birim deformasyon) drenajsız kayma dayanımı, zeminin boşluk oranı ve yapısı tarafından kontrol edilmektedir.

2.3 Gözlenen Zemin Tepkisinin Yorumlanması

Dinamik yüklere veya depremlere maruz kalan, bire-bir ölçekli ve aletle teçhiz edilmiş yapıların tepkisinin yorumlanması, dinamik zemin özellikleri ve diğer geoteknik

deprem mühendisliği parametreleri hakkında çok önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu yaklaşım için düşey diziler şeklinde ya da yakın aralıklarla yerleştirilmiş cihazlarla çok iyi şekilde donanmış zemin ve sahalar gereklidir. Dinamik zemin özelliklerini (özellikle de kayma modülü ve sönümleme oranını) tespit etmede, böyle sahalardaki zeminlerin tabanındaki veya yüzeyindeki gerçek hareketler, hesaplanan hareket ile gerçek hareketler arasında en iyi uyumu veren uygun zemin tepki modelleri ile birlikte kullanılmaktadır. Açık bir şekilde görüleceği gibi, bu yaklaşımda gerekli olan yer hareketini üretecek bir depreme gereksinim vardır ve dinamik zemin özelliklerinin ölçülebildiği deformasyon seviyeleri deprem tarafından oluşturulan deformasyonlar tarafından kontrol edilmektedir (Kramer, 2003).

BÖLÜM III

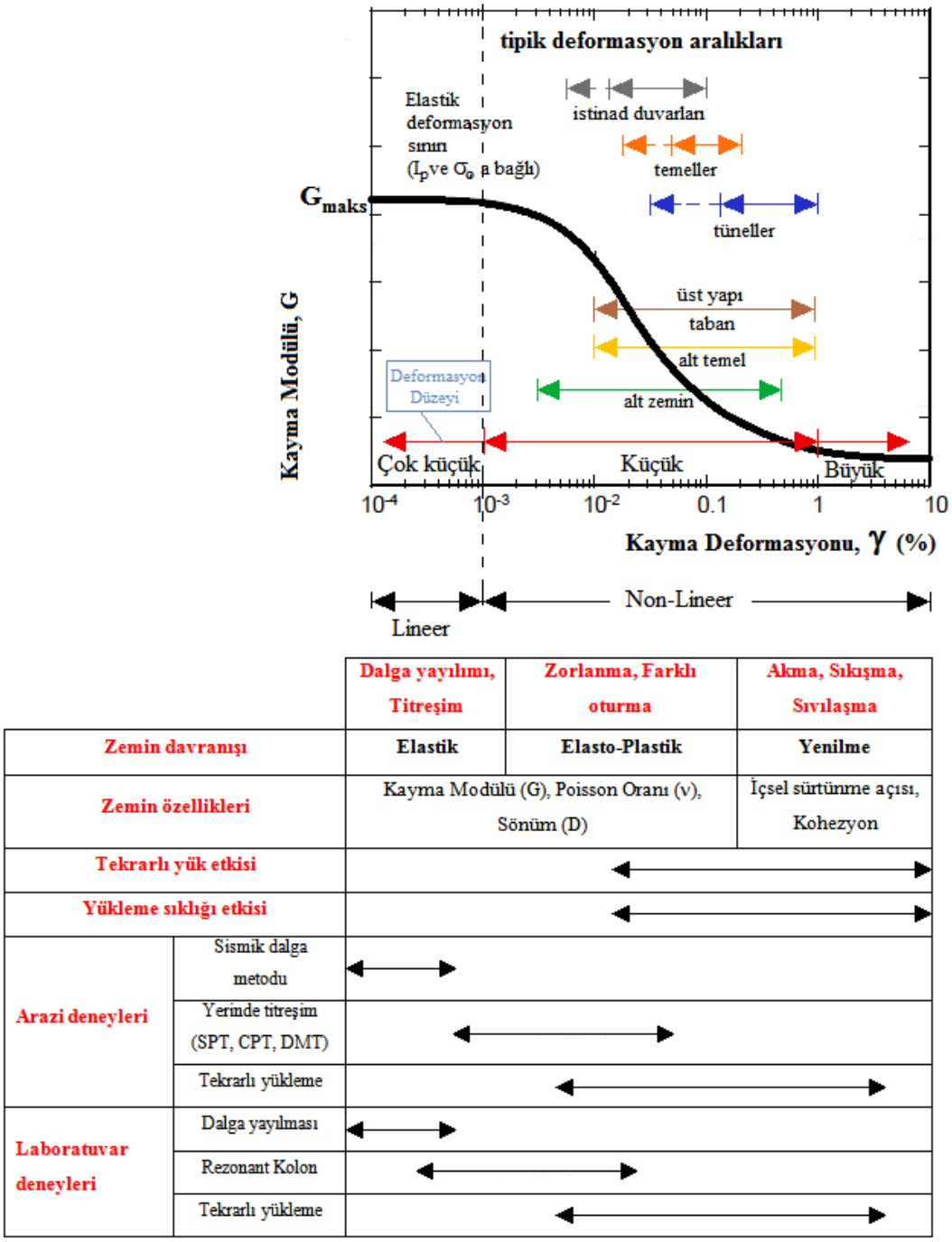
ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.1 Dinamik Zemin Özelliklerinin Ölçülmesi

Deprem mühendisliği problemleri ele alınırken, zeminlerin dinamik özelliklerinin ölçülmesi problemin çözümünde en önemli basamağı teşkil etmektedir. Problemlerin çeşitliliği, bir kısmı daha yüksek deformasyon sevilerindeki özellikleri ölçmede kullanılıyor olsa da çoğu düşük deformasyon seviyelerindeki özellikleri ölçmek için tasarlanmış olan değişik türde laboratuvar ve arazi yöntemlerinin geliştirilmesine sebep olmuş ve her bir problemin kendine has hassasiyetleri olması bakımından uygulanabilecek yöntemlerin birbirlerine karşı avantajları ve dezavantajları söz konusudur (Şekil 3.1).

Dalga yayılmasını etkileyen zemin özellikleri ve diğer düşük deformasyon kavramları rijitlik (G), sönümleme (D), poisson oranı (ν) ve yoğunluğu (ρ) kapsar. Bunlar arasında rijitlik ve sönümleme en önemlileridir. Diğerlerinin etkisi daha az olup, değer olarak genellikle dar bir aralığa düşme eğilimindedirler. Zeminler doğrusal olmayan elemanlar olduğundan, bu durum sadece düşük deformasyon seviyelerinde geçerli olmayıp orta ve yüksek deformasyonlarda da geçerlidir. Yüksek deformasyon seviyelerinde devirsel yük sayısı ve hızının kayma dayanımı üzerindeki etkisi de önemli olabilir. Yüksek deformasyon seviyelerinde ayrıca hacim değişim özellikleri de önemlidir (Kramer, 2003).

Dinamik zemin özellikleri konusunda herhangi bir inceleme yapılırken, ölçümü yapılan özellikler de bazı kaçınılmaz belirsizliklerin bulunacağı hatırdan çıkarılmamalıdır. Belirsizliğin kaynakları zeminlerin kendine özgü özellikleri (çökeldikleri jeolojik ortamın bir sonucu), doğal anizotropi (zemin yapısının veya “dokunun” bir fonksiyonu), sonradan gelişen anizotropi (anizotrop gerilme şartları altında oluşur), sondaj ve numune alımı sırasındaki örselenme, arazi ve yorumlama hatalarıdır (Kramer, 2003).



Şekil 3.1. Değişen deformasyon seviyelerinde değişik geoteknik yapılar, arazi ve laboratuvar deneylerinin Kayma Modülüne (G) etkisi (Sawangsuriya vd., 2005)

Çok küçük/küçük ve büyük deformasyon deneyleri ile arazi ya da laboratuvar deneyleri sonucunda doğrudan ya da ampirik bağıntılar yardımıyla, kayma dalgası hızı (v_s) bulunup zeminin yoğunluğuna (ρ) bağlı olarak maksimum kayma modülü belirlenir.

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

3.2 Arazi Deneyleri

Arazi deneyleri zemin özelliklerinin yerinde ölçülmesine izin verir. Zeminin dinamik özelliklerinin arazide ölçülmesinin çok sayıda faydası vardır.

- Numune alınmasına gerek yoktur; numune alımı sırasında karşılaşılan ve numunenin gerilme, kimyasal, termal ve yapısını değiştiren şartlar ortadan kalkmış olur.
- Arazi deneylerinin çoğu büyük hacimli zemin kütleleri üzerinde yapılır; ölçülen özelliğin küçük ve temsilci olmayan numune üzerinde yapılmasından ileri gelen hatalar minimuma iner.
- Deney sırasında oluşturulan zemin deformasyonları, incelenen problemde ve özellikle de termal tasarım problemlerindeki dalga yayılması için söz konusu olan deformasyonlar ile benzerlik arz eder. Ancak, arazi testleri ile yerinde gözlem şartlarının etkisini incelemek kolay değildir ve ayrıca boşluk suyunun drenajı kontrol edilmektedir. Yalnız teorik analizler veya ampirik korelasyonlardan dolaylı olarak tanımlanır.

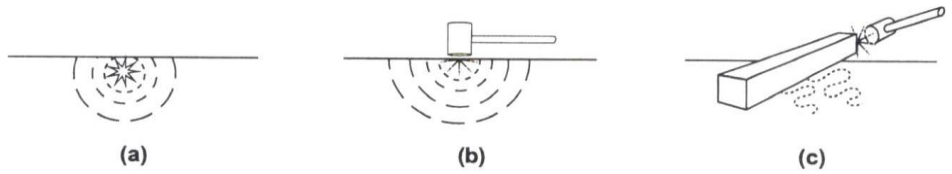
Arazi deneylerinin bazıları zemin yüzeyinde yapılabilirken bazıları da kuyu açılmasını veya ölçüm cihazının zemin içine sürülmesini gerektirir. Yüzeydeki deneyler genellikle düşük maliyetlidir ve kısa bir zaman aralığında yapılabilir. Sondaj ve numune almanın veya penetrasyonun zor olduğu malzemelerde özellikle çok yararlıdırlar. Kuyu deneylerinde bilginin kuyudan doğrudan elde edilmesi şeklinde bir avantaj söz konusudur. Bu sayede zemin özelliklerinin görsel olarak ve laboratuvarda tanımlanması, su tablasının konumunun belirlenmesi ve benzeri bilgilerin elde edilmesi mümkündür. Ayrıca kuyu deneylerinin yorumlanması yüzey deneylerine kıyasla daha doğrudan işlemdir (Kramer, 2003).

3.2.1 Çok küçük/küçük deformasyon deneyleri ile

Genellikle zeminlerde önemli düzeyde bir doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyona neden olmayacak şekilde küçük birim deformasyon düzeylerinde yapılır. Kayma birim deformasyonları (γ) tipik olarak %0,001'in altında ($\gamma<10^{-5}$) kabul edilir.

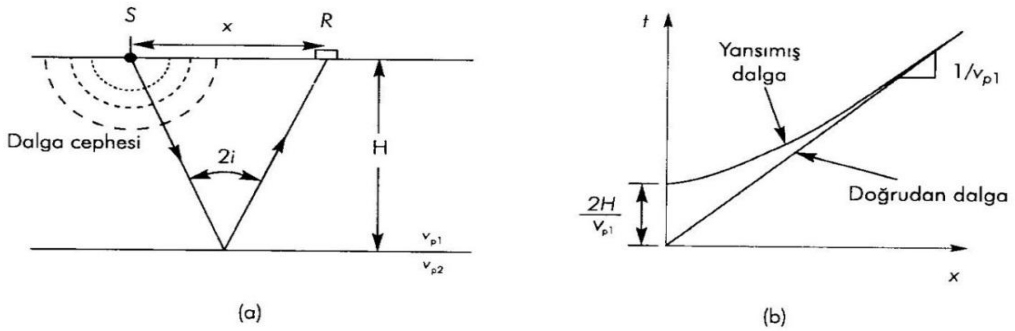
Küçük birim deformasyon zemin modülleri ile kolaylıkla ilişkilendirilebilen cisim dalgası hızının ölçümü söz konusudur. Bir kısmında ise, frekansları ve/veya dalga boyları küçük birim deformasyon modüllerini hesaplamada kullanılan düzenli dalga geliştirilmesi söz konusudur (Kramer, 2003).

Sismik jeofizik deneyleri, dinamik zemin özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir yeri olan arazi deneylerini oluşturur. Sismik deneylerde gerilme dalgalarının oluşturulması ve bir veya daha fazla noktada yapılan ölçümlerden bunların davranışlarının yorumlanması söz konusudur. Sismik deneylerin çoğunda, kaynakta bir dalgalar "palsı" oluşturur ve bunun daha uzaktaki ölçüm noktalarına varış zamanları kaydedilir (Şekil 3.2). Enerjisi, balyoz ile zemin yüzeyine çarpmadan, gömülmüş patlayıcılara kadar değişen bir aralığa sahip olan kaynakta genellikle P, S ve yüzey dalgaları oluşturur. Bunların her birinin göreceli genliği, palsın oluşturulma şekline bağlıdır. Patlayıcı kullanılan veya düşey yönde çarpma yapılan kaynaklarda egemen tür P dalgalarıdır. SH (yatay düzlemsel hareket) dalgaları en etkin şekilde genellikle zemine sıkıca oturtulmuş bir kirişin ucuna yatay çarpma yapılarak elde edilir.



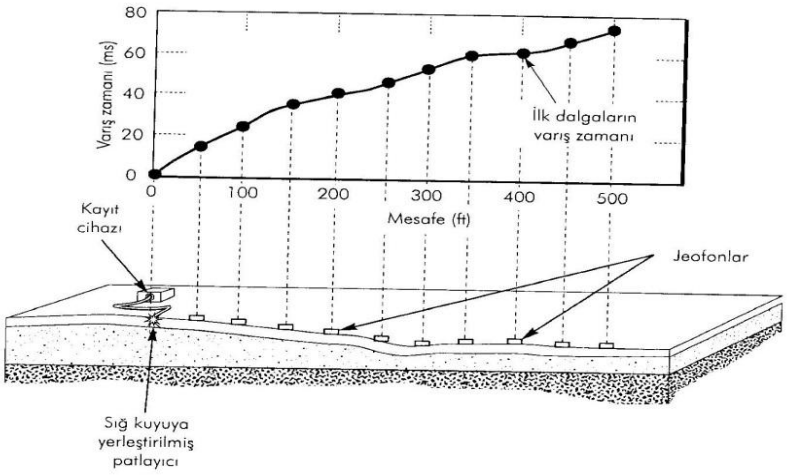
Şekil 3.2. Sismik jeofizik deneyleri için darbesel örselenme geliştirmenin değişik yöntemleri: (a) Sığ derinlikte patlama, (b) düşey çarpma, (c) yatay çarpma (Kramer, 2003)

- **Sismik yansıma deneyi:** Sismik yansıma deneyleri, zemin katmanlarının dalga iletim hızı ve kalınlıklarının yer yüzeyinden veya kıyı ötesi ortamlarda ölçülmesine izin verir (Şekil 3.3). Yansıma deneyinin en kullanışlı olduğu uygulamalar, büyük ölçekli araştırmalar ve/veya çok derin stratigrafik çalışmalardır. Sığ zemin stratigrafisinin belirlenmesinde çok ender olarak kullanılır (Kramer, 2003).



Şekil 3.3. (a) Gelen ve yatay katman sınırından yansıyan P dalgasının ışın izi, (b) doğrudan ve yansımış dalgaların varış zamanlarındaki değişim. Kaynak-alıcı mesafesi arttıkça çözünürlükteki güçlükler de çoğalmaktadır (Kramer, 2003).

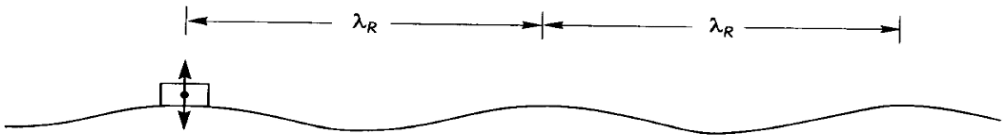
- **Sismik kırılma deneyi:** Sismik yansıma deneyinden elde edilen verilere ek olarak deprem mühendisliği uygulamalarında çok büyük önemi olan ana stratigrafik değerlerin sınırları ortaya konmaktadır. Kaynakta mekanik veya patlayıcı şeklinde olan pals, zemin yüzeyine yakın bir noktaya yerleştirilir. Genellikle jeofon şeklinde olan bir dizi alıcı bir hat üzerine yerleştirilir. Bir alıcı da kaynağa yerleştirilir. Pals yükün uygulanması ile birlikte tüm alıcılardan kayıt alınır. Bu kayıtlardan her jeofona gelen ilk dalgaların geliş zamanları kaydedilir ve kaynak-jeofon meselesinin bir fonksiyonu olarak diyagramı çizilir (Şekil 3.4). Jeofonların hepsinin birden zemin yüzeyi boyunca ilerleyen sabit hızlı (v) sadece bir gerilme dalgasını algılaması söz konusu olsaydı, geliş zamanı ilk mesafenin grafiği, eğimi 1/v olan ve orijinden geçen düz bir çizgi olurdu. Ancak gerçekte durum daha karmaşıktır (Kramer, 2003).



Şekil 3.4. Sismik kırılma deney düzeneği (Redpath, 1973)

- **Sabit durum titreşim (Rayleigh dalgası) deneyi:** Düşey olarak titreşen dairesel bir sömele komşu zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmelere neden olan dalgalar Rayleigh dalgalarıdır (Miller ve Pursey, 1955). Rayleigh dalgaları hem yatay hem de düşey yer değiştirmelere neden olduklarından, sabit frekanslı yükleme durumunda zemin yüzeyi deforme olacaktır (Şekil 3.5). Sömelin merkezine bir alıcı yerleştirip diğer alıcı da bu alıcıdan farklı mesnetlerde konumlandırılırsa, fazla titreşen noktaların yerleri belirlenebilir. Böyle noktalar arasındaki yatay mesafe Rayleigh dalgasının dalga boyuna eşittir (Kramer, 2003).

  Arazideki yükleme frekansını değiştirmek suretiyle, kesme dalgasının derinliğe göre değişimi bulunabilir. Bu deney, yüzeye yakın kesme dalgası hızını belirlemede faydalı bir gereçtir. Ancak, çok değişken zemin profilleri için gerekli ayrıntılı çözünürlüğü kolaylıkla sağlanmamaktadır.

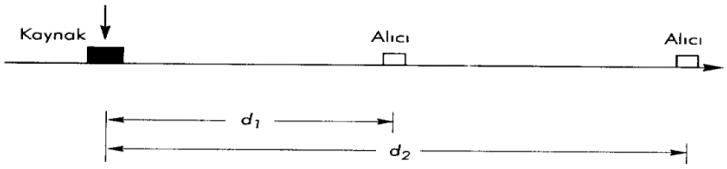


Şekil 3.5. Dinamik olarak titreşen bir pabucun yakınında zemin yüzeyinde Rayleigh dalgasından kaynaklanan deformasyon (Richard vd., 1970)

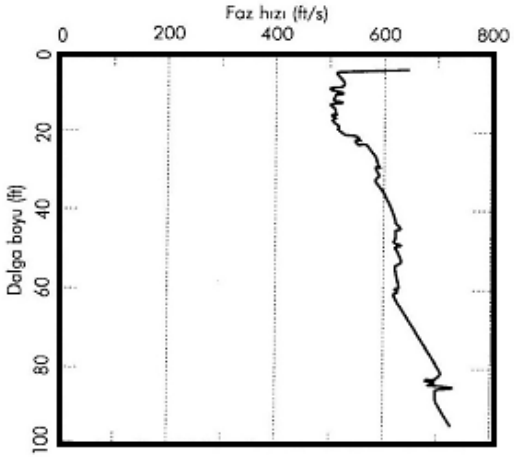
- **Yüzey dalgaları deneyinin spektral analizi (YDSA):** Rayleigh dalgası ile frekans (veya periyod) ilişkisi grafiğinin şekli, cisim dalga hızlarının derinlikle

değişimi ile ilişkilidir. Sabit titreşimli deneyi yüklemeyi değişik frekanslarda tekrarlamak suretiyle dispersiyon eğrisi elde etmede kullanılabilir. Ancak bu işlemin arazide yapılması uzun zaman almaktadır. Dispersiyon eğrisi, dijital veri toplama ve sinyal işleme ekipmanının da kullanımı ile ani bir çarpmadan veya rastgele gürültü yükünden elde edilebilir (Kramer, 2003).

Bu deney, zemin yüzeyinde iki jeofonun çarpmalı kaynak veya rastgele gürültü kaynağı ile aynı doğrultuda yerleştirilmesiyle yapılır (Şekil 3.6). İki jeofonun algıladığı sinyaller kaydedilir ve Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılarak frekans tanım alanına dönüştürülür. Bu dönüşümden sonra, her frekans için faz farkı (ϕ) hesaplanabilir. Jeofonlar arasındaki mesafe bilindiğinden Rayleigh dalgası faz hızı ve dalga boyu, frekansın fonksiyonu olarak hesaplanır. Sonuçlar grafiğe aktarılır (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. Bir YDSA deneyinde kaynak ve alıcıların tipik düzeni Alıcılar arasındaki mesafe d1+d2 sabit kalacak şekilde değiştirilir. (Kramer, 2003)



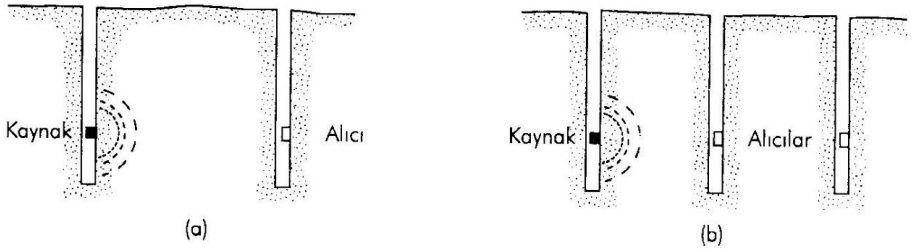
Şekil 3.7. YDSA testinden deneysel dispersiyon eğrisi (Gucunski ve Woods, 1991)

Teorik ve deneysel dispersiyon eğrisine uydurulması için zemin katmanlarının kalınlıklarını ve kesme dalgası hızlarını tespit etmede tekrarlamalar gereklidir. Her

katman için başlangıçta tahmin edilen kalınlık ve kesme dalgası hızı değerleri deneysel dispersiyon eğrisine en iyi uyumu verene kadar değiştirilir (Kramer, 2003). Deneyin üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

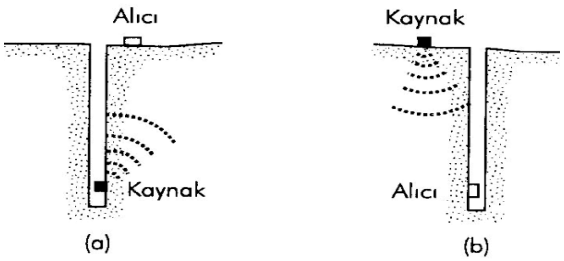
- Kısa sürede yapılabilir, sondaj kuyusu açılmasına gerek yok.
- Düşük hız katmanları tespit edilebilir.
- Nemli derinliklere kadar (>100 m) inilebilir.

- **Kuyudan kuyuya sismik deney:** Yatay yöndeki dalga yayılma hızlarını ölçmek için iki veya daha fazla sondaj kuyusu gereklidir. En basit deney düzeneğinde biri enerji kaynağını diğeri de alıcıyı ihtiva eden iki sondaj kuyusu vardır (Şekil 3.8 a). Kuyudaki kaynağı ve alıcıyı aynı derinlikte yerleştirmek suretiyle, iki kuyu arasındaki malzemenin o derinlikteki yayılma hızı ölçülür. Değişik derinliklerde yapılmak suretiyle bir hız profili elde edilebilir. Hata payını azaltmak için ikiden fazla kuyu açılabilir (Şekil 3.8 b). Dalga yayılma hızları böyle durumlarda birbirine komşu iki kuyu arasındaki geliş zamanı farklarından hesaplanabilir. Katman sınırları genellikle yatay olduklarından kuyudan-kuyuya deneyi çoğu zaman münferit zemin katmanlarının test edilmesine izin verir. Sismik kırılma denelerinde gözden kaçabilen gizli katmanları teşhis edebilir. Mekanik çarpma kaynakları kullanıldığında kuyudan kuyuya deneylerinde 30-60 m'ye varan derinliklerden sağlıklı veriler elde etmek mümkündür. Patlayıcı kullanıldığında bu genellikle daha da artmaktadır. Ancak, özellikle 15-20 m den daha derin kuyularda ölçülen hızların kaynak-jeofon aralığına olan duyarlılığı için, çoğu zaman kuyu sapma incelemeleri gereklidir. Yakında yüksek hızlı bir katman bulunması halinde ölçülen hızlar gerçek hızlara eşit olmayabilir. Bu durumlarda kırılmayı da hesaba katan ileri düzey yorumlama teknikleri gerekir. Zeminlerin materyal sönümleme oranını hesaplamada, üç veya daha fazla kuyudan genlik sönümleme ölçümleri kullanılmaktadır (Hoar ve Stokoe, 1984; Mok vd.,1988; EPRI,1993).

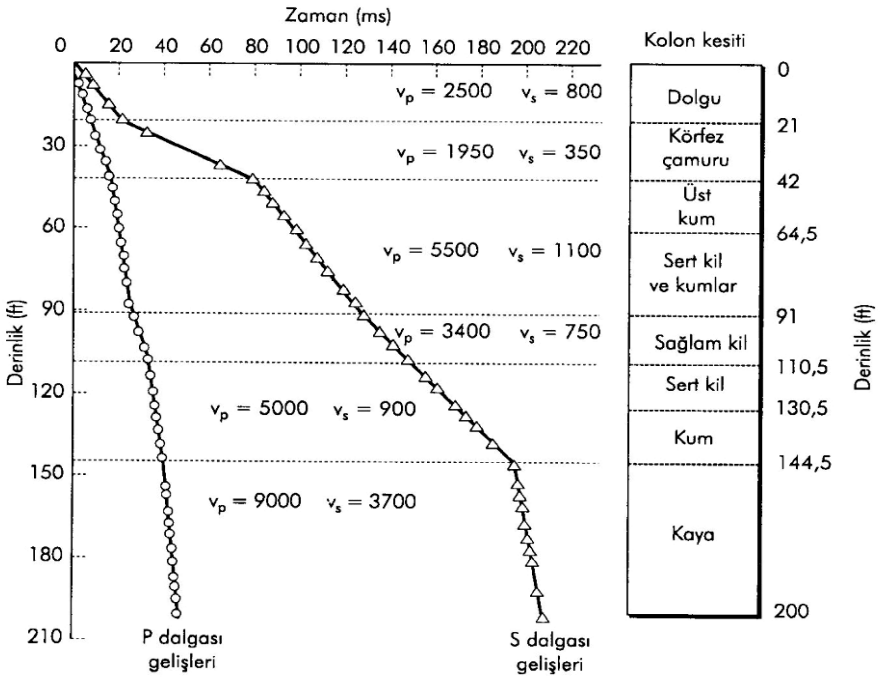


Şekil 3.8. Kuyudan kuyuya sismik deneyi: (a) iki kuyu düzenini kullanarak doğrudan ölçüm, (b) üçkuyu düzenini kullanarak aralık ölçümü (Kramer, 2003)

- **Sismik kuyu aşağı (kuyu yukarı) deneyi:** Bu deney sadece bir kuyuda yapılabilmektedir. Kuyu-aşağı deneyinde dinamik enerji kaynağı yüzeyde ve kuyunun hemen yanındadır. Değişik derinliklere kaydırılabilen bir alıcı veya çoklu alıcılardan oluşan bir kablo sistemi kuyu cidarına sabitlenir ve bir alıcı da enerji kaynağının hemen yanında bulunur (Şekil 3.9). Tüm alıcılar, çıktıkları zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülebilmesi için yüksek hızlı bir kaydediciye bağlıdır. Kuyu-yukarı deneyinde kuyu içinde hareketli bir enerji kaynağı bulunur ve yüzeyde de kuyu ağzına yakın bir yerde bir alıcı yerleştirilir. Bu deneyin amacı enerji kaynağından P ve/veya S dalgalarının alıcıya (veya alıcılara) varış zamanını ölçmektir. Alıcı pozisyonlarını uygun şekilde düzenlemek suretiyle bir zaman-derinlik grafiği oluşturulabilir (Şekil 3.10). Grafiğin herhangi bir derinlikteki eğimi o derinlikteki dalga yayılma hızını temsil eder. Dalgaların dinamik enerji kaynağından alıcıya kadar olan tüm katmanları geçmesi gerektiğinden, sismik kırılma deneyindeki gizli katmanları kuyu-aşağı deneyi ile tespit etmek mümkündür. Kuyu-aşağı ve (veya kuyu-yukarı) deneyi ile ve bunlardan elde edilen sonuçların yorumlanması ile ilgili potansiyel güçlükler başlıca; sondaj kuyusu açılması sırasında zeminin örselenmesinden, muhafaza borusu ve sondaj sıvısı etkilerinden, yetersiz veya gereğinden fazla dinamik enerji kullanımından ve fon gürültüsü ile su tablası etkilerinden ileri gelebilir. Kuyu- aşağı deneylerinde sönümleme oranlarının ölçülebilmesine dair girişimler de yapılmıştır (Redpath vd., 1982; Redpath ve Lee,1986; EPRI,1993).



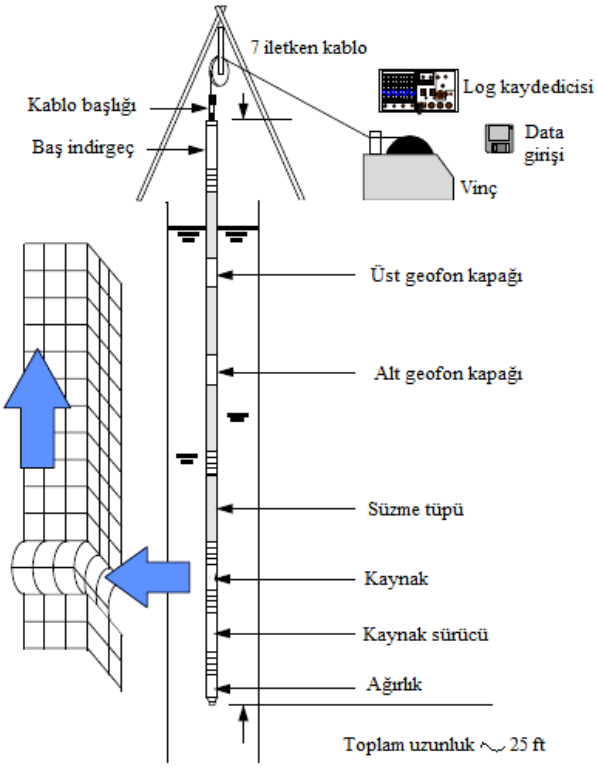
Şekil 3.9. (a) sismik kuyu yukarı, (b) sismik kuyu aşağı deneyi (Kramer, 2003)



Şekil 3.10. San Fransisco Körfez bölgesinde bir kuyu aşağı deneyine ait varış zamanı eğrisi (Schwarz ve Musser, 1972)

- **Askıda loglama deneyi:** Değişik uzunluklardaki prop su veya çamur dolu çıplak bir kuyuya sarkıtılmaktadır (Şekil 3.11). Probun tabanına yakın bir yerdeki terslenebilir kutuplu yatay bir bobin sondaj sıvısı içinde keskin ve ani bir basınç dalgası oluşturur. Kuyu cidarında oluşan basınç dalgası zemin içinde P ve S dalgası üretir. Zemin içinde yayılan bu dalgalar tekrar kuyu içine dönerek probun tepesinde ve aralarında bir mesafe olan çift eksenli iki geofon tarafından algılanır. P ve S dalgalarının teşhis edilmelerinin kolaylaştırılması için, yapılan işlem ters kutuplu bir pals ile birlikte tekrarlanır. Geofonlar arasındaki zeminin P ve S dalga hızları bunların geofonlara geliş zamanı farkından hesaplanır. Bu sistemde dalga yayılma hızlarını ölçmek mümkündür fakat bu sistemde üretilen dalgaların

frekansları geoteknik deprem mühendisliğindeki frekanslardan çok yüksektir. 2 km derinliğe kadar etkin bir deney yöntemidir. Petrol aramalarında yaygın olarak kullanılır (Nigbor ve Imai, 1994).

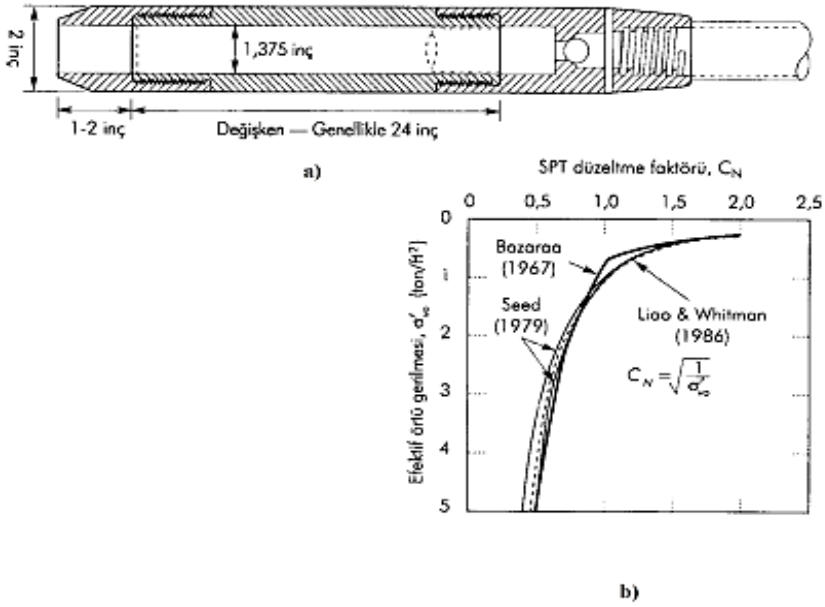


Şekil 3.11. Askıda Loglama Deneyi (internet 1)

- **Sismik koni deneyi:** Bu deney ile kuyu-aşağı deneyi arasında (sondaj kuyusu açılma şartı hariç) büyük benzerlik vardır. Bir sismik penetrometre sürtünme kolonunun hemen yukarısına yerleştirilmiş bir jeofon veya akselerometre ile teşhis edilmiş geleneksel bir penetrometreden oluşur. Konik penetrometre ile ölçü alınırken değişik aşamalarda durulur ve zemin yüzeyinde uygulanan dinamik enerji ile üretilen dalgaların konik penetrometredeki jeofon ile algılanması sağlanır. Çarpmanın yapıldığı noktanın hemen yakınına yerleştirilmiş bir alıcı ile vuruş zamanı kaydedilmektedir. Varış zamanı-derinlik grafiğinin çizilmesi ve yorumlanması aynen kuyu aşağı deneyindeki gibi yapılmaktadır (Kramer, 2003).

3.2.2 Büyük deformasyon deneyleri ile

- **Standart penetrasyon deneyi (SPT):** Geoteknik deprem mühendisliğinde en eski ve en çok kullanılan deneydir. Bir SPT deneyinde ortadan ayrılabilir bir numune alıcı kuyu tabanındaki zemine çakma (dakikada 30-40 vuruş) suretiyle sürülür (Şekil 3.12). Çakma sağlayan çekicin (şahmerdan) ağırlığı 63,6 kg olup düşürme yüksekliği 76 cm dir. Numune alıcı zemine genellikle 45 cm sürülür ve son 30 cm'lik kısmı çakmak için gerekli darbe sayısı SPT-N değeri olarak kaydedilir. N değeri zemin türüne, çevre basıncı ve zemin yoğunluğuna bağlı olarak değişir ve ayrıca deney düzeneği ile kullanılan yöntemlerden de etkilenir (Kramer, 2003).



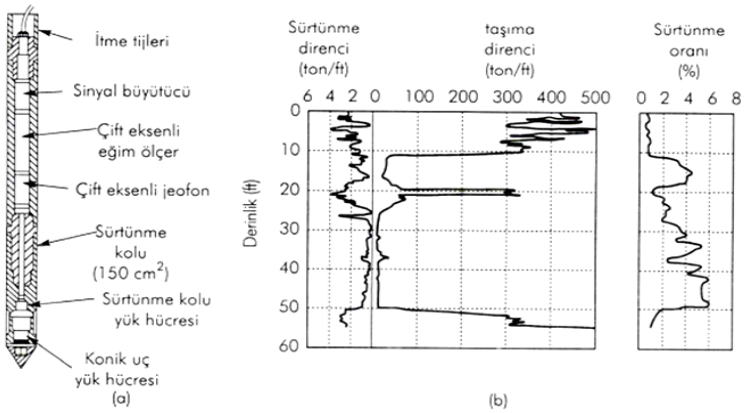
Şekil 3.12. (a) SPT örnekleyicisi, (b) SPT örtü kalınlığı düzeltme faktörü (Liao ve Whitman, 1988)

SPT-N ile kayma dalgası hızı (v_s) arasında korelasyonlar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. v_s ile SPT-N değeri arasındaki korelasyonlar (Toğrol ve Sivrikaya, 2009)

Yapılan Çalışmalar	Zemin Cinsi	v_s (m/sn)
Imai ve Yoshimura (1970)	Tüm	$76N^{0.33}$
Imai ve diğ. (1976)	Tüm	$89.8N^{0.341}$, n=756
Imai (1977)	Halosen (H) Kil Halosen (H) Kum Pleistosen (P) Kil Pleistosen (P) Kum	$102N^{0.29}$ $81N^{0.33}$ $114N^{0.29}$ $97N^{0.32}$
Ohta ve Goto (1978)	Kil İnce kum Orta kum Kaba kum Çakıllı kum Çakıl	$69N^{0.17}D^{0.2}EF$, n=300 F=1.00 E=1 (H) veya 1.3 (P) F=1.09 E=1 (H) veya 1.3 (P) F=1.07 E=1 (H) veya 1.3 (P) F=1.14 E=1 (H) veya 1.3 (P) F=1.15 E=1 (H) veya 1.3 (P) F=1.45 E=1 (H) veya 1.3 (P)
Imai ve Tonouchi (1982)	Tüm	$97N^{0.314}$, n=1654 R=0.868
Okamoto ve diğ. (1989)	Pleistosen (P) Kum	$125N^{0.3}$
İyisan (1996), Aşağı ve karşıt kuyu deneyleri yapmıştır.	Tüm Tüm Kil (CL) Kum(SM) Çakıl(GP, GM)	$51.5N^{0.516}$ n=65 R=0.81 $61N^{0.267}(10\sigma_{vo}')^{0.283}$ n=65 R=0.83 $47.3N^{0.324}(10\sigma_{vo}')^{0.27}$ n=65 R=0.90 $54N^{0.332}(10\sigma_{vo}')^{0.221}$ n=65 R=0.64 $205.7N^{0.074}(10\sigma_{vo}')^{0.177}$ n=65 R=0.83

- **Konik penetrasyon deneyi (CPT):** Standart bir konik penetrometrenin zemine sabit bir hızla sürülmesi söz konusudur. Standart konik penetrometrede, alanı 150 cm^2 olan silindirik bir sürtme yüzeyinin hemen altında ve alanı 10 cm^2, tepe açısı da 60° olan konik bir uç bulunmaktadır. Penetrometre zemine 2 cm/sn lik bir sabit hız ile düşürülür. Uç ile sürtünme kolonunun her biri, penetrasyon sırasında uç direnci q_c yi ve çeper sürtünmesi f_s'yi ölçen yük hücrelerine bağlanmıştır. CPT deneyi oldukça hızlı ve maliyeti de nispeten düşüktür. SPT deneyi sırasında kolaylıkla gözden kaçabilen ince katmanların varlığını tespit eden devamlı bir penetrasyon direnci profili verir (Şekil 3.13), (Kramer, 2003).



Şekil 3.13. (a) Sismik koni özelliği de olan tipik CPT (Baldi vd., 1988) , (b) CPT deneyinden elde edilen kayıtlar (Ward, 1986)

CPT uç direnci (q_c) ve kayma dalgası hızı (v_s) arasında korelasyonlar Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. v_s ile q_c arasındaki ilişkiler (Toğrol ve Sivrikaya, 2009)

Araştırmacı	Zemin türü	v_s (m/sn)		
İyisan (1996)	Kil ve Kum	$55.3q_c^{0.377}$	q_c (kg/cm²)	R=0.80
		$41q_c^{0.212}\ \sigma_v^{0.461}$	q_c (kg/cm²)	R=0.82
Mayne ve Rix (1995)	Kil	$1.75q_c^{0.627}$	q_c (kPa)	
İyisan ve diğ. (2000)	Tüm	$12.6q_c^{0.363}$	q_c (kPa), n=45	R=0.82

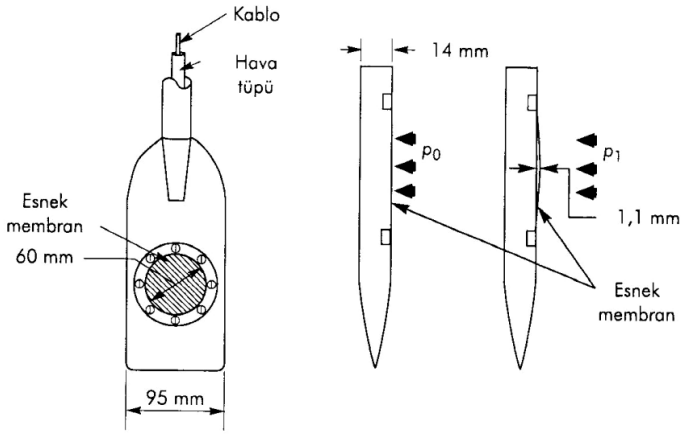
- **Dilatometre deneyi:** Bir yüzeyinde genişleyebilen bir membran bulunan pasalanmaz çelik plakadan yapılmış düz bir dilatometre kullanılır (Şekil 3.14).

Membran da çelikten yapılmış olup ince ve daireseldir. Membran yüzeyi kendini çevreleyen çelik plaka ile aynı hizada olacak şekilde dilatometre zemin içine sürülür. 10-20 m de bir sürme işlemi durdurulur ve basınçlı gaz vasıtasıyla membran şişirilir. Membranın 0,05 mm (kalkış basıncı, p_o) ve membran merkezinin de 1,1 mm hareket ettiği basınçlar (p_1) kaydedilir.

Elde edilen veriler:

- Materiyal indisi I_D
- Yatay gerilme indisi K_D
- Dilatometre modülü E_D

Dilatometre parametreleriyle düşük deformasyon, zemin rijitliği, sıvılaşma direnci arasında korelasyon mevcuttur.



Şekil 3.14. Marchetti düz dilatometresinin önden ve yandan görünüşü (Baldi vd., 1986)

2007 basımı Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönerge'den zemin gruplarına bağlı SPT-N, D_r, q_u, v_s değerleri Çizelge 3.3' te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Zemin gruplarına bağlı olarak SPT-N, D_r, q_u, v_s (DBYBHY, 2007)

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

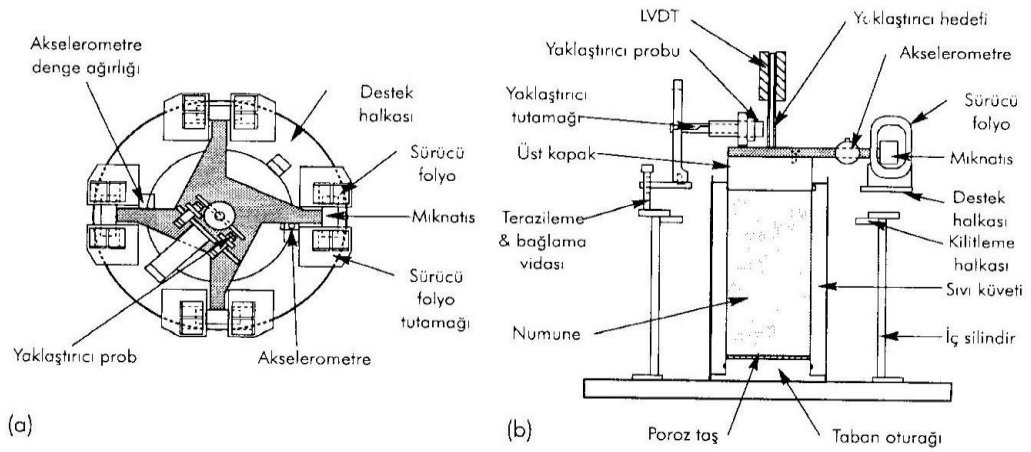
3.3 Laboratuvar Deneyleri

Laboratuvar deneyleri genellikle daha büyük zemin kütlelerinin temsil ettiği varsayılan nispeten küçük numuneler üzerinde yapılmaktadır. Numuneler, elemanlar olarak deneye tabi tutulmaktadır. Numunelerin model olarak deneye tabi tutulduğu diğer laboratuar deneylerinde sonuçlar model üzerine etkiyen, üniform olmayan sınır koşulları açısından değerlendirilmelidir (Kramer, 2003).

3.3.1 Çok küçük/küçük deformasyon deneyleri ile

- **Rezonant kolon deneyi:** İçi delik ya da dolu olan silindirik numuneler elektromanyetik yükleme sistemi vasıtasıyla harmonik burulma veya eksenel yüklemeye maruz bırakılırlar (Şekil 3.15). Genellikle frekans ve genliğin kontrol

edilebildiği harmonik yükler uygulanmaktadır. Rezonant kolon numunesi hazırlanıp konsolide edildikten sonra tekrarlı yükleme başlatılır. Yükleme frekansı, başlangıçta küçük bir değerde tutulur ve sonra tepki (birim deformasyon) genliği maksimuma erişene kadar devamlı şekilde arttırılır. Tepkinin lokal olarak maksimuma ulaştığı en düşük frekans numunenin esas frekansıdır. Esas frekans zeminin düşük deformasyon rijitliğinin numune geometrisinin ve rezonant kolon düzeneğinin belirli özelliklerinin bir fonksiyonudur. Bazı fonksiyonlar esas frekansın kullanılması ile v_s hesaplanır. v_s'den de G, kayma modülüne geçilir.

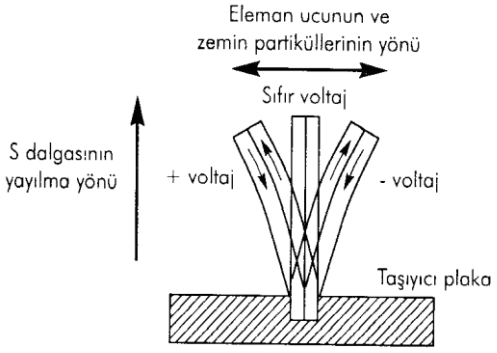


Şekil 3.15. Tipik Rezonant kolon deney düzeneği: (a) yükleme sisteminin tepeden görünümü, ve (b) yükleme sistemi ve zemin numunesinin profil görünümü (EPRI, 1993)

Rezonant kolon deneyi kontrollü şartlar altında rijitlik ve sönümleme özelliklerinin ölçülmesine izin verilir. Efektif çevre basıncı, birim deformasyon genliği ve zamanın etkileri kolaylıkla incelenebilmektedir (Kramer, 2003).

- **Ultrasonik pals deneyi:** Dalga iletme hızları, laboratuvarda ultrasonik pals deneyi ile ölçülebilmektedir (Lawrence, 1963). Numunenin her ucuna ultrasonik verici ve alıcılar yerleştirilerek, aralarındaki mesafe dikkatlice ölçülür. Verici ve alıcılar yüzeylerinde bir voltaja maruz kaldığında boyutları değişen ve yamuldukları zaman voltaj üreten piezoelektrik malzemeden yapılmıştır. Vericiye uygulanan yüksek frekanslı bir elektrik frekans vericinin süratle deforme olmasına neden olur. Ve numune içinde alıcıya doğru ilerleyen bir gerilme dalgası üretir. Verici ve alıcı arasındaki mesafe, voltaj palsları arsındaki zaman farkına bölünerek dalga yayılma hızı elde edilir (Kramer, 2003).

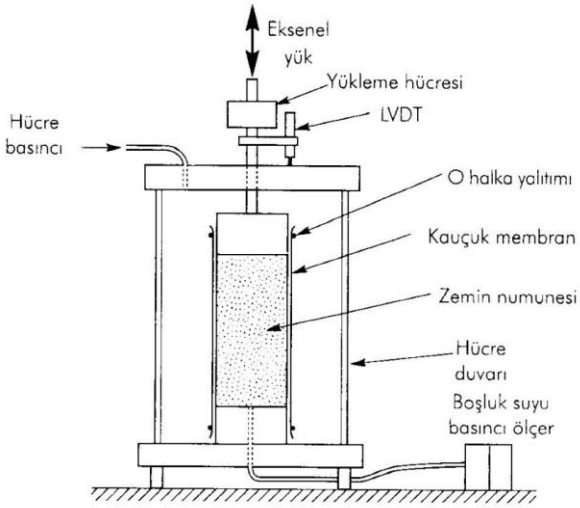
- **Piezoelektrik bender elemanı deneyi:** Kesme dalga hızını ölçmeye yarayan bir deneydir. Bender elemanları iki piezoelektrik malzemesinin, yüzeylerine voltaj uygulandığında, biri genişlerken diğeri de büzülecek şekilde elemanın tamamının eğilmesine neden olacak şekilde bağlanmasıyla oluşturulur (Şekil 3.16). Benzer şekilde, bender elemanının yanal olarak örselenmesiyle bir voltaj üretir ve bu şekilde bender elemanları hem S dalgası vericileri hem de alıcıları olarak kullanılabilir.



Şekil 3.16. Piyezoelektrik bender elemanı. Pozitif voltaj elemanın bir tarafa; negatif voltajda da diğer tarafa eğilmesine neden olur (Kramer, 2003).

3.3.2 Büyük deformasyon deneyleri ile

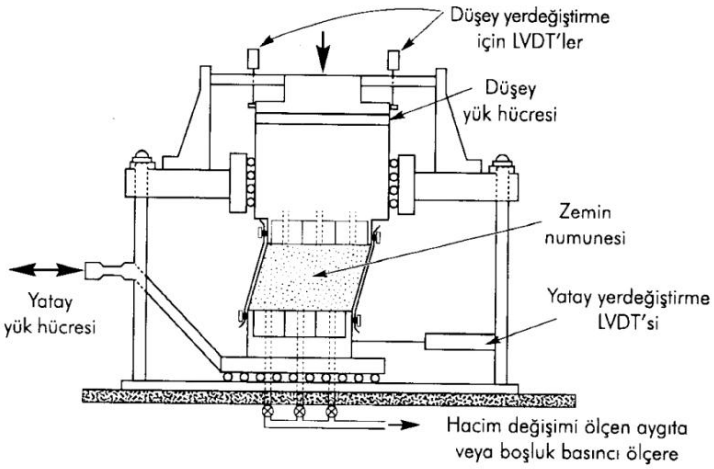
- **Tekrarlı üç eksenli deney:** Yüksek deformasyon seviyelerinde en yaygın kullanılan laboratuvar deneyidir. Bu deneyde silindirik bir zemin numunesi ince kauçuk bir membran ile kuşatılmış olarak iki yükleme plakası arasına yerleştirilir (Şekil 3.17). Numuneye çoğu zaman hava basıncı şeklinde uygulanan bir yatay gerilme ile eksenel gerilme uygulanır. Numune üzerindeki asal gerilmeler bu sınır koşullarından dolayı her zaman yatay ve düşey konumdadır. Eksenel ve yatay gerilmeler arasındaki fark deviatör gerilme olarak adlandırılır. Tekrarlı üç eksenli deneyde deviatör gerilme ya kontrollü şartlar altında ya da deformasyon kontrollü şartlar altında tekrarlı bir şekilde uygulanır. Tekrarlı üç eksenli deneylerinde genellikle yatay gerilme sabit olup eksenel yükler de yaklaşık 1 Hz frekanslarda tekrarlanmaktadır (Kramer, 2003).



Şekil 3.17. Tipik üç eksenli düzeneği (Kramer, 2003)

Üç eksenli basınç deneyinde ölçülen gerilme ve birim deformasyonlar kayma modülü ve sönümleme oranını hesaplamada kullanılabilmektedir.

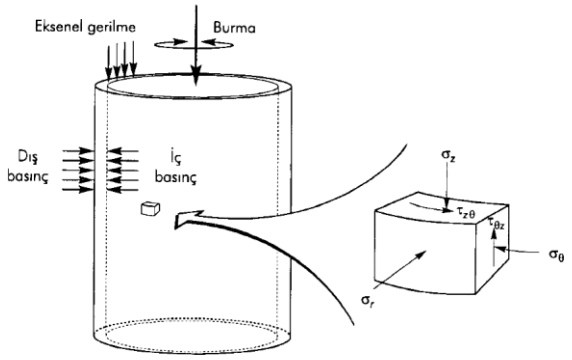
- **Tekrarlı doğrudan basit kesme deneyi:** Bu deney ile deprem gerilme şartları tekrarlı üç eksenli deneyde olduğundan çok daha sağlıklı bir şekilde modellenebilmektedir. Sıvılaşma ile ilgili deneylerde en çok kullanılan yöntemdir. Tekrarlı kayma gerilmelerini numunenin tabanına veya tepesine uygulamak suretiyle deney numunesi, düşey olarak yayılan S dalgalarının maruz kaldığı zemine en çok benzer bir şekilde deforme edilir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. NGI tekrarlı basit kesme düzeneği. Zemin numunesi tek donatılı kauçuk membran içindedir (Airey ve Wood, 1997).

Diğer taraftan kayma gerilmeleri numunenin sadece taban ve üst yüzeylerine uygulanmaktadır. Geleneksel basit kesme düzeneklerinin K_o şartlarına karşılık gelen başlangıç şartlarından başka başlangıç şartlarını uygulama yeteneği sınırlıdır. Gerçek deprem şartlarını daha iyi modelleyebilmek için Pyke (1973) büyük bir sarsma tablası kullanmıştır. İki boyutta büyük ölçekli basit kesme üretilen bu düzenekte bir yöndeki çap yükseklik oranı 9 iken, diğer yönde 20'dir. Küçük ölçekli, tek yönlü tekrarlı basit kesme düzenekleri de geliştirilmiştir (Bouglanger vd., 1993).

- **Tekrarlı burulmalı kesme deneyi:** Tekrarlı üç eksenli ve tekrarlı doğrudan basit kesme deneylerinde karşılaşılan güçlüklerin çoğu, silindirik numuneleri burulmalı şekilde yüklemek suretiyle giderilebilmektedir (Şekil 3.19). Geniş bir aralıktaki deformasyon düzeylerinde rijitlik ve sönümleme özelliklerinin ölçülmesinde en çok kullanılan deney türüdür. Eksenel yüklemeli deneyde, sıvılaşma davranışının ölçümünde kullanışlı olduğu ispat edilmiş olan CyT-CAU (drenajsız, konsolide üç eksenli) deneyini geliştirmek için kullanılan içi boş olmayan numuneler kullanılmıştır. Ancak, içi boş olmayan numunelerin burulmalı deneyinde numunenin ekseninde sıfırdan başlayıp dış yüzeyinde maksimuma çıkan kayma deformasyonları oluşmaktadır (Kramer, 2003).



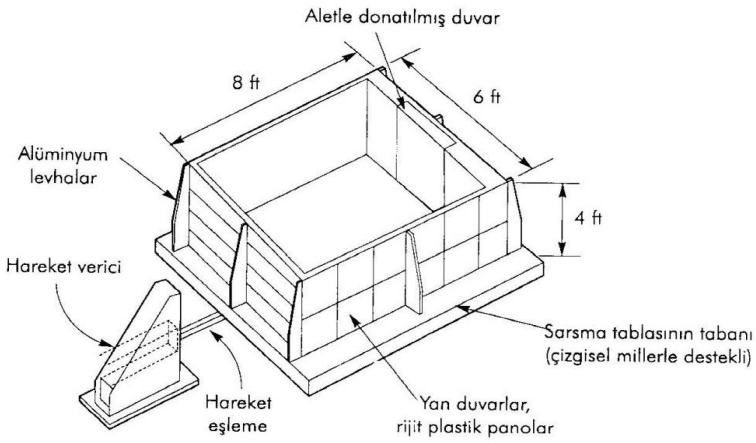
Şekil 3.19. İçi boş silindir düzeneği (Kramer, 2003)

3.3.3 Model deneyleri ile

Model deneylerinde eleman deneylerinden farklı olarak genellikle belirli bir problemin sınır koşullarını, birebir ölçekteki prototip yapının küçük ölçeklisini tekrarlı

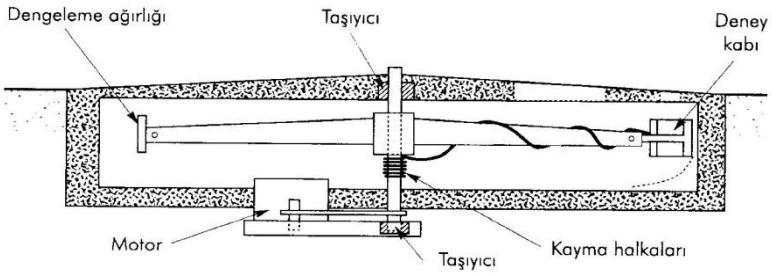
yüklemeye maruz bırakarak taklit etmeye çalışır. Model deneyleri belirli bir prototipin performansını değerlendirmede veya bir genel problem üzerinde farklı parametrelerin etkisini incelemede kullanılabilir. Model deneyi önemli olayların teşhisinde ve kestirici teorilerin teyit edilmesinde çok yararlı olsa da, bulunan nokta itibariyle henüz önemli yapıların veya tesislerin tasarımında doğrudan kullanılabilecek düzeyde geliştirilememiştir.

- **Sarsma tablası deneyleri:** Sarsma tablaları ile sıvılaşma, deprem sonrası oturma, temel tepkisi ve yatay zemin basıncı problemlerinde önemli aşamalar kaydedilmiştir. Sarsma tablalarının çoğunun hareket derecesi serbestliği tek ve yatay yöndedir, fakat çok dereceli serbestlikli sarsma tablaları da geliştirilmiştir. Sarsma tablaları genellikle servohidrolik hareket vericiler vasıtasıyla sallanmaktadır (Şekil 3.20). Bunların dinamik yükleme kapasiteleri genellikle hareketi sağlayan hidrolik pompaların kapasitesi tarafından kontrol edilmektedir. Orta ve yüksek frekanslardaki ağır modellerde büyük yer değiştirmeler üretebilmek için büyük pompalar ve büyük hareket kaynakları gereklidir. Diğer taraftan, sarsma tablasında yüksek çekim gerilmeleri üretilmemektedir. Büyük derinliklerdeki yüksek gerilmelere paralel olarak gelişen büzülme davranışı, model hazırlama sırasında zemini çok gevşek yerleştirmek suretiyle sağlanabilse de, böyle modellerin hazırlanması işlemi oldukça zordur. Düşük gerilme düzeylerinden dolayı, dayanımın kohezyon bileşimini oluşturan faktörlerin katkısı prototiptekine kıyasla daha büyüktür (Kramer, 2003).



Şekil 3.20. Dinamik zemin basıncı deneyinde kullanılan zemin hazneli sarsma tablası (Sherif vd., 1982)

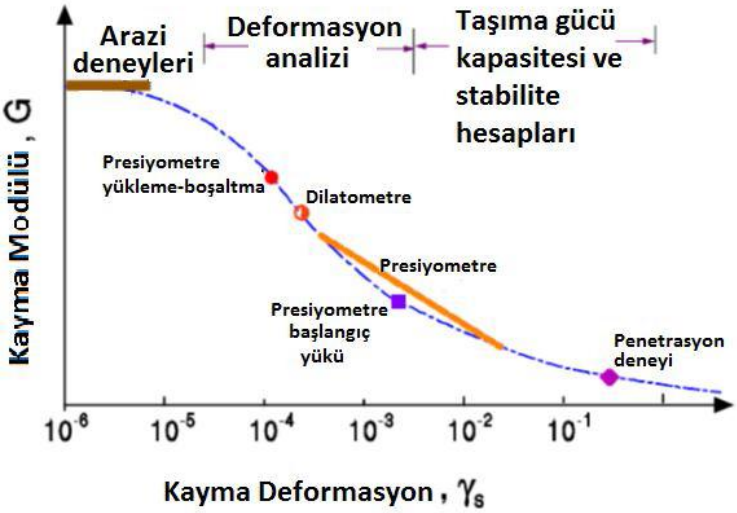
- **Santrifüj deneyleri:** Bir santrifüj deneyinde santrifüjün ekseninden r mesafede 1/N ölçekli bir model $\Omega = (N/r)^{0,5}$ dönme hızında döndürülür (Şekil 3.21). Bu dönme hızı, modelin bulunduğu yerde yer çekim ivmesinin N katı büyüklükte bir ivme sahası oluşturmaya yeterlidir. Prensip olarak, modeldeki herhangi bir noktadaki gerilme şartları, arazi ölçeğindeki örnekte bulunan noktadakilerle özdeş olmalıdır (Kramer, 2003).



Şekil 3.21. Bir geoteknik santrifüjünün enine kesiti (O'Reilly, 1991)

Benzerlik yaklaşımları santrifüj deneylerinin planlanması ve yorumlanmasında çok önemlidir (Kramer, 2003).

Şekil 3.22' de G'nin, γ_s'ye bağlı değişimi gösterilmekle birlikte, γ_s'ye bağlı arazi ve laboratuvar deney aralıkları verilmiştir.



Şekil 3.22 G ve γ_s arasındaki ilişki (Mayne, 2001)

BÖLÜM IV

ZEMİN YAPI ETKİLEŞİMİ

4.1 Zemin Yapı Etkileşimine Genel Bakış

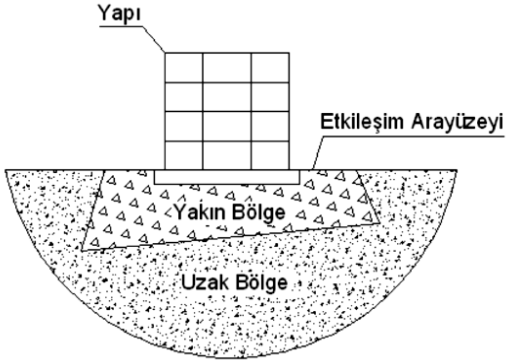
Deprem yer kabuğunun bir titreşimi olduğu için, yapıların mesnetlerinde zamana bağlı bir yer değiştirme hareketi doğurarak dinamik bir etki oluşturur. Yapısal analizlerde genellikle temeller ankastre kabul edilerek çözüm yapılmakta ve temellerde yer değiştirme ve dönme olmadığı kabul edilmektedir. Gerçekte ise, temellerde çökme ve dönmeler oluşmaktadır. Yapılara etkiyen deprem gibi dinamik bir yükleme durumunda, yapı ve zemin birlikte hareket etmekte bu sırada da birbirlerinin davranışını etkilemektedirler (Karabörk, 2009).

Yumuşak zemin tabakaları üzerindeki yapıların deprem etkisindeki davranışları yapı-zemin etkileşimi probleminin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu durumda yapı-zemin etkileşiminin önemli ölçüde dikkate alınması gerekir. Bu tür yapıların deprem hesabında, zemin ortamının şekil değiştiren ve yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunan dinamik bir sistem olarak ele alınması gerekmektedir (Koçak ve Mengi, 2000; Karabörk, 2009).

Zeminin yapıya etkisine karşılık, yapı da zemini hem kinematik hem de dinamik bakımdan etkilemektedir. Yapının var olmadığı durumlarda yalnız zeminin kendi içindeki dinamik davranışının bir sonucu olan deprem verisi, yapının varlığı sonucu daha karmaşık bir yer hareketine dönüşmektedir. Depremler sırasında alınan kayıtlar, aynı bölgedeki yapı bulunan zemin ile üstünde yapı bulunmayan zeminden elde edilen sonuçların farklı olduğunu göstermiştir. Bu farklılıklar depremin yapıya etkisine karşılık, yapının da zemini ve dolayısıyla deprem kaydını etkilediğini kanıtlamaktadır (Karabörk, 2009).

Zemin – yapı etkileşimi çeşitli tipteki sistemlerin tamamının veya bir kısmının iç içe veya üst üste gelmesi ile oluşan birleşik sistemlerdir. Birleşik sistemlerin analizi her sistemin ayrı ayrı analizi veya sistemlerin birbirlerine olan etkilerinin göz önüne alınması ile yapılır. Bu sistemler hesaplanırken herhangi bir sistem diğerinden ayrı

çözülemez ve herhangi bir bağımsız değişken diferansiyel denklem düzeyinde yok edilemez. Zemin-yapı sisteminde yükleme ve kuvvetler, ortamlar aracılığıyla iletilir. Bu ortamlar hesaplama kolaylığı sağlamak için çeşitli gruplara ayrılır ve değişik şekillerde modellenirler (Şekil 4.1), (Ala, 2007).



Şekil 4.1 Dinamik Sınırsız Ortam-Yapı Etkileşimi (Ala, 2007)

- *Sınırsız Ortam:* Zemin ortamı boyutları, yeryüzü ile sınırlı olmakla birlikte sınırsız veya yarı sonsuz (uzak bölge) bir ortam uzak bölge olarak kabul edilmektedir. Birleşik sistem analizinde sınırsız ortamları gerçek boyutları ile modellemek mümkün olmadığından belirli bölge göz önüne alınarak problem tanımlanır. Sınırsız ortam, yapının dinamik rijitlik matrisine eklenen empedans (α) katsayıları ile karakterize edilir.

$$\alpha = \frac{\rho_1 V_{s_1}}{\rho_2 V_{s_2}} \tag{4.1}$$

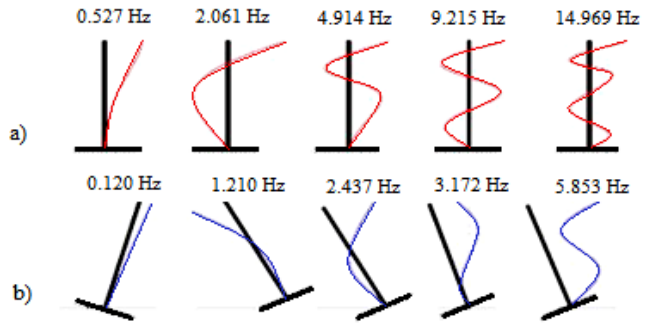
  Sonsuz ve yarı sonsuz ortam analizlerinde dinamik yüklemeler (makine titreşimleri, depremler, yer altı patlamaları, yapı yakınındaki yollardan geçen araçların titreşimleri vs.) sınırsız ortam vasıtası ile tanımlanır.

- *Sınırlı Ortam:* Yakın bölge de denilen ortamdır. Yapının sınırsız ortam ile etkileşime girdiği, malzeme davranışı bakımından büyük gerilme ve şekil değiştirmelerin meydana geldiği ve zemin davranışının lineer olmayan davranış gösterdiği kabul edilen ve zemin davranışının doğrusal davranış gösterdiği

etkileşim ara yüzeyine kadar olan bölgedir. Sınırsız veya yarı sınırsız ortamların analizi yapılırken sınırlı ortam, sınırsız ortam ile birlikte düşünülür. Sisteme zamanla değişen bir yük etkidiğinde yapı, dinamik olarak sınırsız ortam ile etkileşir. Sınırsız ortamlarda dinamik etkileşim analizi en iyi yapı - zemin etkileşim problemi ile karakterize edilebilir (Ala, 2007).

- *Etkileşim Ara Yüzeyi:* Zemin - yapı etkileşiminin sayısal olarak analizi, uygun bir şekilde modellenmesi gereken ara yüzey etkilerini içerir. Etkileşim ara yüzeyi, sınırlı ortam ile sınırsız ortamın etkileşime girdiği fiktif yüzey olarak kabul edilmektedir. Zemin - Yapı Etkileşim (ZYE) problemlerinin çözümünde, sınırsız ortamın (uzak bölge) dinamik özellikleri etkileşim ara yüzeyinde tanımlanır. Çoğu problem etkileşim ara yüzeyinin Sonlu Elemanlar Modeli ile çözülebilmektedir. Yüzeyin gerçekçi davranışı plastisite teorisi kullanılarak uygun elemanlarla modellenebilir (Ala, 2007).

Yapı ile bitişik olan sınırlı zemin ortamı (yakın bölge) ve yapının kendisi doğrusal olmayan davranış gösterirlerken, yarı sonsuz sınırsız zemin ortamının ise doğrusal olarak davrandığı kabul edilir. Yapı ile bitişik sınırlı zemin ortamının büyüklüğü, zemin davranışının doğrusal olmayan davranıştan, doğrusal davranışa geçiş yaptığı etkileşim ara yüzeyine kadar olan bölge kabul edilebilir. Bir yapının sismik davranışı; üst yapı, deprem kaynağı, zemin şartları ve temelin özellikleri ile yakından ilgilidir. Zemin ve yapının karşılıklı etkileşimi, üst yapı ve yerel zeminin dinamik karakteristiklerini etkiler. Kavramsal olarak ZYE, yapıda kütle ve rijitlik dağılımını etkileyerek sistemin bütününde frekans ve mod şekillerinin değişimine neden olur. Zeminin ankastre olması ve zemin yapı etkileşiminin dikkate alınması durumunda kayma dalgası hızı 50 m/s olan 12 katlı bir kulenin mod şekilleri ve frekansları verilmiştir (Şekil 4.2). Burada ZYE'nin sistem davranışı üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir (Ala, 2007).

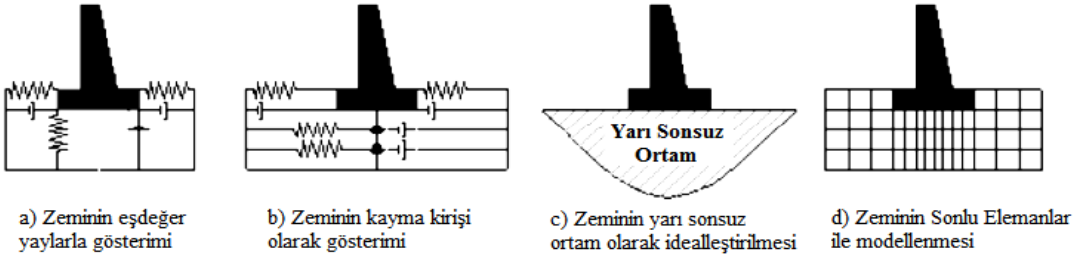


Şekil 4.2 Katlı bir sistemde zeminin (a) rijit (b) zemin kayma dalgası hızı 50 m/s olması durumunda ilk beş mod şeklinin ve frekansının değişimi (Ala, 2007)

Tasarım aşamasında genellikle yapı, zemine rijit bağlı olarak hesaplanmaktadır. Yapının zemine rijit bağlı olarak dinamik çözümü, yapının onu çevreleyen zemin ile etkileşim halinde bulunmasından dolayı, tek başına yeterli değildir ve ZYE'nin göz önüne alınması gereklidir.

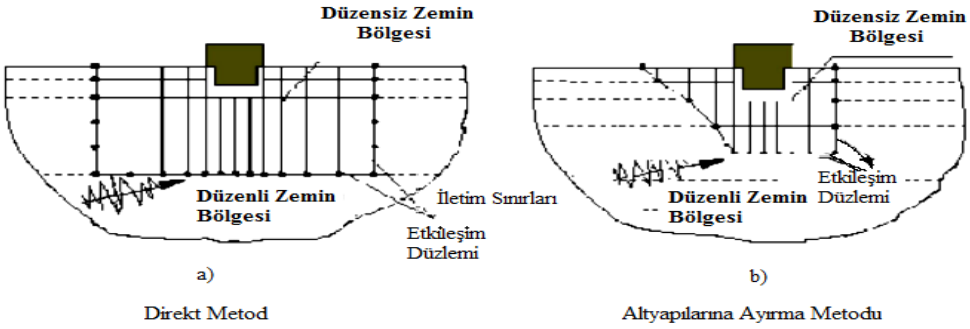
4.2 Zemin-Yapı etkileşimi Problemlerinde Çözüm Yöntemleri

ZYE problemi, sınırsız zemin ortamında dinamik enerjinin yayılması, zemin sönümünün histerik yapısı, yapının zeminin davranışını etkilemesi, sismik yükler altında zeminin sıvılaşma ihtimali, zeminin doğrusal olmayan davranışı gibi özellikleri nedeni ile çözümü son derece karmaşık ve zor olan bir problemdir. Ayrıca zemindeki süreksizlikler, zeminin yarı sonsuz bir ortam olması, zemindeki tabakalaşma ve bu tabakaların değişkenliği, zemindeki suyun varlığı, zeminin çekme gerilmesi almayan bir malzeme olması gibi olgular zemin yapı etkileşim problemlerini klasik analiz problemlerinden farklı kılan özelliklerdir. Yapı-zemin etkileşiminin göz önüne alındığı analizlerde zemin; yay, kayma kirişi, yarı sonsuz ortam olarak modellenebilmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Zemin modelleme şekilleri (Ala, 2007)

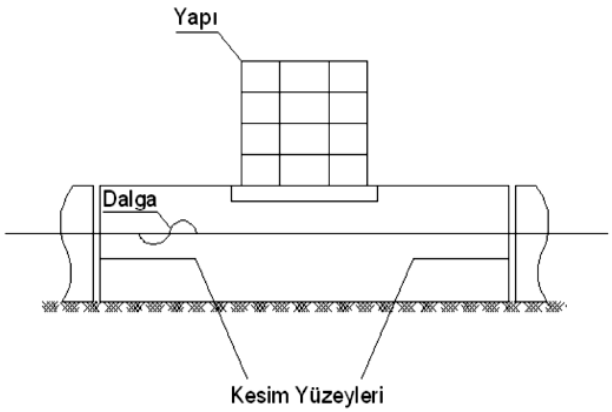
Dinamik zemin yapı sisteminin analizi genellikle “Direkt Yöntem” ve “Çok Adımlı Çözüm Yöntemi” olmak üzere iki metoda dayalı olarak yapılmaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Zemin yapı etkileşim analiz metotları (Ala, 2007)

4.2.1 Direkt yöntem

Bu yöntem dinamik yükleme etkisi altında zemin yapı sisteminde, yer değiştirme, mod şekilleri ve kesit tesirleri zaman ve frekansa bağlı olarak tek adımda sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak bulunmaktadır. Zamana bağlı çözümlerde hareket denklemi modal analiz ve direkt integrasyon yöntemi ile çözülür. Frekans uzayında ise hareket denklemi frekansın bir fonksiyonu olarak çözülüp Fourier dönüşümü uygulanarak zamana bağlı değerlere geçilebilir. Belirli yönlerde sonsuza uzanan zemin, kesim yüzeyleri ile kesilerek kesim yüzeylerine yarı sonsuz zeminin özelliklerini yansıtacak özel sınır şartları konur (Şekil 4.5) (Ala, 2007).



Şekil 4.5 Zemin yüzeylerinin kesilmesi (Ala, 2007)

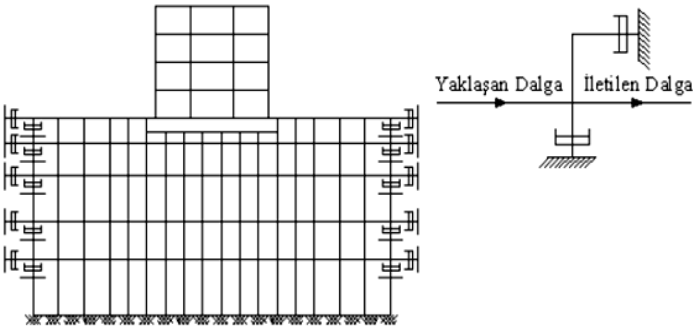
Direkt analiz yönteminde, gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için kesim yüzeylerinin yapıdan çok uzak bir mesafede seçilmesi gerekmektedir. Fakat modelin çözülebilir olması için Sonlu Elemanlar bölgesinin çok büyük olması istenmez. Kesim sınırları ile sınırlanan zemin bölgesi SEM ile modellendiğinde kapalı ortam içerisinde yayılan dalgalar sınırlara çarparak tekrar analiz ortamına döner ve çözümü olumsuz etkilerler. Bu durumun engellenmesi için kesim sınırlarının özel sınır şartları ile dalga geçirimliliğini sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekir (Ala, 2007).

Zemin sonlu eleman ağının, özellikle geometrik sönümün (radyasyonun) önemli olduğu yüksek frekanslı yer hareketlerinde ve zeminin sönümünün büyük olması gibi özel durumlarda, yapı temel taban genişliğinin sağ ve solunda 8~10 katına kadar uzatılmasının yeterlidir.

Direkt yöntemle sistemin doğrusal olmayan özelliği çok iyi bir şekilde analiz edilebilmektedir. Yeni geliştirilen yapay sınırlar frekansa bağımlı olarak da ifade edilebilmekte ve direkt yöntem yardımı ile zeminin histerik bir yapıda olan sönümü daha iyi dikkate alınabilmektedir (Ala, 2007).

4.2.2 Viskoz sınır şartı

Zemin belirli bir uzaklıktan kesilmekte ve kaynaktan saçılan dalgaların kesim noktalarındaki yapay sınırlara çarparak bir kısmının tekrar zemin ortamına yansıması gibi bir duruma neden olmaktadır. Bunun engellenmesi için viskoz sınır şartları kullanılmaktadır. Viskoz sınır şartının kullanılması durumunda gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için ele alınan zemin ortamı çok küçük elemanlara bölünmekte ve kesim noktaları yapıdan oldukça uzakta seçilmektedir (Şekil 4.6). Viskoz sınır şartının kullanılabilmesi için, düzlem dalga yayılışının izotrop ve lineer elastik bir ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir (Ala, 2007).



Şekil 4.6 Direkt Yöntem'de sınır şartları (Ala, 2007)

Dinamik analizlerde modellenen viskoz sınır şartı efektif rijitlik ve efektif sönüm değerleri tanımlanmıştır. Efektif rijitlik, ilgili noktanın bir birimlik yer değiştirmesi için gereken kuvvet olarak belirlenir. "Efektif sönüm (c)" ise aşağıdaki denklemden yararlanılarak hesaplanır;

$$c = \rho V_s A \tag{4.2}$$

burada,

ρ : zeminin yoğunluğu,

v_s : zeminin kayma dalga hızı,

A : etkili alan

dır.

Zeminin kayma dalgası hızı;

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{4.3}$$

olarak tanımlanmıştır. Burada G, zeminin kayma modülüdür ve bu değer;

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \tag{4.4}$$

olarak tanımlanmıştır. E, zeminin elastisite modülüdür.

4.3 Yerel Zemin Koşulları

Deprem hareketi altında, yapılarda hasara neden olan en önemli faktörlerden birisi de yerel zemin koşullarıdır. Deprem etkisi altında yerel zeminler, sıvılaşma, göçme, oturma gibi nedenlerden dolayı yapısal hasarlara sebep oldukları gibi yerel zeminlerin dinamik özellikleri de zeminlerin deprem hareketi altındaki davranışını belirleyerek yapı hasarları üzerinde önemli rol oynamaktadır. Zemin, yapıya etkiyen deprem ivmesini büyüterek hasarın da büyümesine neden olur. Bu olay zeminin büyütme etkisi (amplifikasyon) olarak tarif edilir (Çizelge 4.1). Burada, deprem hareketinin büyütme etkisi sonucu yapı davranışında oluşan olumsuzluklar yapıların yer değiştirmeleri ile gösterilmeye çalışılmıştır (Ala, 2007).

Çizelge 4.1 Zemin büyütmelerinin zemin türlerine göre değişimi (Ala, 2007)

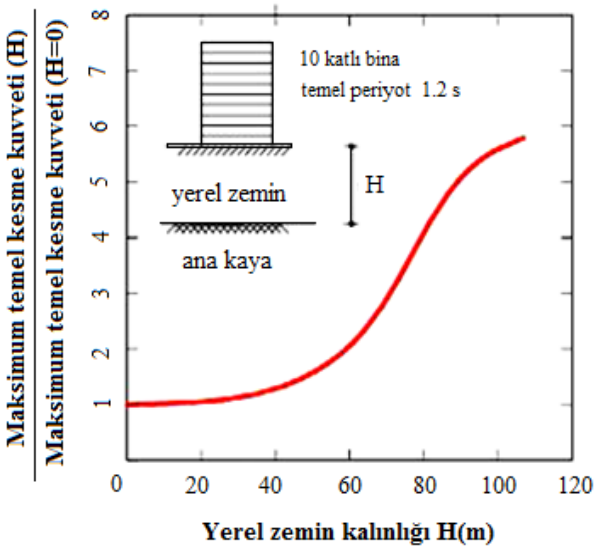
Zemin Kategorisi	**Genel Tanım**	**Ortalama Kayma Dalgası Hızı v_s (m/s)**	**Büyütmeye Karşı Zemin Davranışı**
A	Kaya	$v_s > 750$	-
B	Derin kohezyonsuz zeminler, sıkı kohezyonlu zeminler ya da ikisinin karışımından oluşan zeminler	$750 > v_s > 360$	Düşük
C	Kum, silt veya sıkı-çok sıkı kil, bazı çakıllar, kalınlığı 3 m den az yumuşak kil tabakaları	$360 > v_s > 180$	Orta
D1	Kalınlığı (H_t) az veya yumuşak veya orta sıkı kil içeren tabakalar	$180 > v_s$ $15\ m > H_t > 3\ m$	Yüksek
D2	Kalınlığı (H_t) fazla ve yumuşak veya orta sıkı kil içeren tabakalar	$180 > v_s$ $35\ m > H_t > 15\ m$	Yüksek
E1	Organik madde oranı yüksek killer	$H_t > 3\ m$	Çok yüksek
E2	Yüksek plastisiteli killer	$H_t > 7\ m$ ve $I_p < \%75$	Çok yüksek
E3	Çok kalın yumuşak veya orta sıkı kil içeren tabakalar	$H_t > 35\ m$	Çok yüksek

Yerel zemin koşullarının deprem hasarına olan etkisi, zeminlerin rijitlik ve dinamik karakteristikleri ile değişmektedir. Yapı-zemin etkileşim analizi için seçilecek analitik

ve matematik modeller, yapı özelliklerinin yanında zemin özelliklerini de hassasiyetle yansıtmalıdır. Çünkü, zeminin enerjiyi yutması, zemin ortamının yarı sonsuz büyüklükte oluşu ve zemine ait fiziksel parametreler; zeminin özellikle şekil değiştirmesine, kayma modülüne ve gerilme düzeyine bağlıdır (Ala, 2007).

4.3.1 Yerel zemin kalınlığı

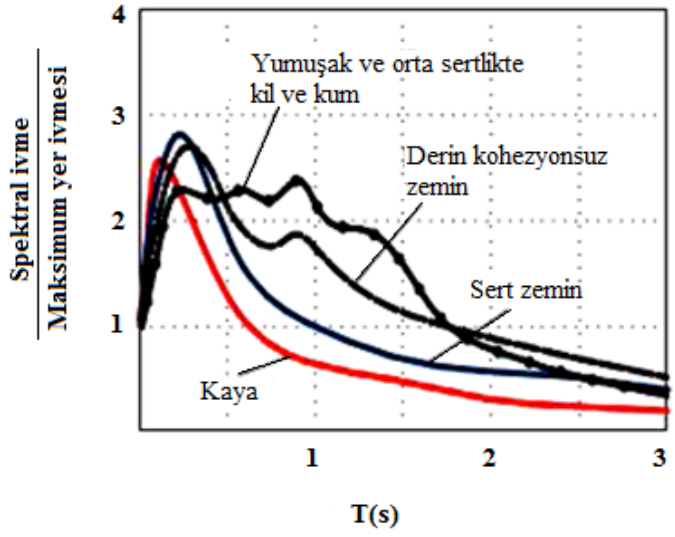
Yerel zemin kalınlığı üst yapı elemanlarındaki yer değiştirme, ivme gibi değerlerin yanında maksimum taban kesme kuvveti ve taban devrilme momentini de etkilemektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Yerel zemin kalınlığının maksimum temel kesme kuvvetine etkisi (Ala, 2007)

4.3.2 Zemin spektrumları

Spektral değerlerin, yumuşak ve orta sertlikteki kil dolgusu ve kohezyonsuz zeminlerde, 0.5 s' den büyük periyotlar için, sert zeminler ve kayaya göre daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum söz konusu zeminlerin uzun periyoda ait titreşim bileşenlerinin daha büyük oranlarda yer hareketi ile etkileşime girdiğini gösterir (Ala, 2007).



Şekil 4.8 Değişik zeminler için spektral ivme periyot ilişkisi (Ala, 2007)

4.3.3 Zemin periyodu ve zemin özelliklerinin üst yapıya etkisi

Yapı ve zemin kendi karakteristik özeliklerine bağlı olan periyotları ile deprem sonrası oluşan dalgaların etkisi ile salınıma başlarlar. Eğer zemin ve yapı yaklaşık olarak aynı periyotta salınırlarsa yapılarda çok büyük hasarlara neden olur ve bu olay *rezonans* olarak bilinir.

Sert ve rijitliği fazla zeminler üzerine çok katlı ve periyodu büyük yapıların, yumuşak ve rijitliği az olan zeminlerin üzerine ise az katlı periyodu düşük yapıların yapılması önerilmektedir. Ancak yumuşak zeminlerin üzerine düşük periyotlu yapıların yapılması durumunda bile, zemin yapı etkileşimi ihmal edilmeyecek derecede önemlidir. Yumuşak zeminler üzerinde inşa edilen rijit yapılarda yükseklik/genişlik oranı düşük tutulmalıdır. Yükseklik/genişlik oranının yapı zemin dinamik etkileşimi üzerindeki etkisi, oran arttıkça yer değiştirme genliğinde azalma ve periyotta uzama şeklinde görülmektedir. Bu oranın etkisi yumuşak zemin-rijit yapı durumunda iyice belirginleşirken, sert zemin esnek yapı durumunda ise söz konusu etki azalmaktadır (Ala, 2007).

Ayrıca deprem dalgalarının periyotları merkez üssünden uzaklaştıkça büyüyerek yapılarda istenmeyen hasarlara yol açabilmektedir. Örneğin Meksika depreminde (1985), merkez üssünden 350 km uzakta bulunan yerleşim bölgelerinde çok katlı

yapılarda büyük hasarlar oluşmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda, yumuşak zemine dönüşmüş olan eski göl yatağının, uzun periyotlu yer hareketlerini büyütmesi ile maksimum tepkinin 2.0-2.5 saniyelik periyotlarda oluştuğu ve bunun sonucunda doğal titreşim periyotları büyük olan çok katlı yüksek yapıların büyük hasarlar görmesine sebep olduğu anlaşılmıştır (Ala, 2007).

BÖLÜM V

YAPILARIN KONTROLÜ

Değişen dış etkilere karşı yapıların kendini adapte edebilme yeteneği ile ilgili çalışmalar son yıllarda önem kazanmıştır. Acil durum şartlarında mutlaka kullanılabilir durumda kalmaları gereken yapıların (hastane, itfaiye, telekomünikasyon ve nükleer enerji santralleri vb.), sürekli değişen kuvvetler (rüzgar, deprem vb.) etkisi altında kendilerinin ve de içerilerindeki donanımların zarar görmemesi için, dinamik enerjiyi taşıyıcı sistem yerine yapıda kurulan sistemler üzerinde toplayarak titreşim kontrolü sağlayacak mekanik sönümleyiciler ve izolatörler geliştirilmiştir.

Dinamik etki altında yapıların titreşim kontrolü pasif ve aktif kontrol yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Pasif kontrol yöntemleri, herhangi bir dış enerji kaynağına ihtiyaç duyulmadan taban izolasyon sistemleri ve pasif enerji sönümleyicileri gibi enerji yutan sistemleri içermektedir. Aktif kontrol sistemleri ise, sistemde hazır bulundurulan dış enerji kaynakları kullanılarak yapıya daha önce belirlenen şekilde kontrol kuvvetlerinin uygulandığı sistemlerdir. Pasif kontrol sistemlerinin değişen dış etkilere karşı kendini adapte edebilme yeteneğinden yoksun olması ve taban izolasyonlarının verimli olarak genelde alçak binalara uygulanabilirliği, aktif kontrolün gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, yapıların esnekliğinin ve yüksekliğinin artması aktif kontrol sistemlerinin önemini daha da artırmaktadır (Alli ve Calayır, 2002).

Aktif kontrol yöntemlerinden birisi kayan modlu kontrol yöntemidir. Kayan modlu kontrolün dış etkilere ve parametrik değişikliklere duyarsız oluşu en büyük avantajlarından birisidir. Gelişen teknolojinin de bu tür kontrol yöntemlerinin uygulanabilirliğine zemin hazırlaması, bu yöntemi daha da cazip hale getirmektedir. Son yıllarda bu kontrol yöntemi, yapıların titreşim kontrolü ile ilgili araştırmalarda sıkça kullanılmaktadır. Aktif kontrol kuvvetleri aktif kütle sönümleyicileri ve aktif destek elemanları vasıtasıyla sağlanabilmektedir. Aktif destek sistemlerinde kontrol kuvveti tabana yerleştirilen bir elektro-hidrolik tahrik makinasına bağlı destekler vasıtasıyla yapıya uygulanmaktadır. Aktif kütle sönümleyicileri ise binanın üst katına yerleştirilir ve hidrolik sistem tarafından kütle harekete geçirilerek gerekli kontrol

kuvveti meydana getirilir. Yapılan bir çalışmada, aktif kütle sönümleyicili yüksek bir binanın titreşimlerini kontrol etmek amacıyla kayan modlu bir kontrol algoritması geliştirilmiş, aktif kütle sönümleyicisi binanın üst katının üzerine yerleştirilmiş olup, başlangıç şartları ve rüzgar kuvveti etkimesi durumları için binanın dinamik cevapları ayrı ayrı elde edilmiştir. Sayısal çözümler, yapının birinci modu dikkate alınarak yapılmıştır (Alli ve Calayır, 2002).

5.1 Akıllı Binalar

Bir binaya akıllı bina derken binanın sahip olduğu otomasyon sistemleri (ısı-iletişim-güvenlik vb.) öncelikle akla gelir. Ancak bu konsepte binada kullanılan malzemelerin mühendislik özellikleri ve binanın statik ve dinamik yapısını (depreme yüküne karsı direnç) da dahil etmek zorundayız (Engin, 2007).

- **Akıllı bina sistemleri**

i. *Enerji verimliliği sistemleri:* Akıllı binada, istenilen işlerin, proseslerin yerine getirilmesi için enerjinin en düşük seviyede kullanılması istenir. Akıllı bir bina servis ömrü boyunca en ekonomik şekilde hizmet vermelidir. Bunun sağlanması için birçok sistem organize bir şekilde kullanılır:

- Bina otomasyon sistemi
- Enerji yönetimi sistemi
- Enerji kontrolü sistemi
- Merkezi kontrol ve izleme sistemi

Örnek olarak, ısıtma sistemleri hava sıcaklığına göre ayarlanır ve optimum seviyede olmaları sağlanır. Aydınlatma sistemleri gün içinde farklı derecelerde kullanılabilir. Asansörler daha çok kullanılan katlara diğer katlara uğramadan çıkabilir. Yazın havalandırma sistemleri hava sıcaklığına göre otomatik olarak derecelendirilir. Daha ekonomik iletişim sistemleri için gerekli alt yapı bulunur. Bina içerisinde ki havanın temizlenmesi için havalandırma ve filtre eden sistemler havanın temizliğine ve tazeliğine göre çalışırlar (Engin, 2007).

Bir binada en önemli enerji sarfiyat kalemlerinden birisi aydınlatmadır. Ekonomik aydınlatma yollarından biri gün ışığından en fazla şekilde faydalanmaktır. Güneş enerjisinden bir başka faydalanma şekli ise güneş enerjisini (solar enerji) depolamak ve oluşan ısı enerjisi ile bina içerisindeki sıcak su ihtiyacını karşılayabilmektir.

ii. *Güvenlik sistemleri:* Özellikle yangın gibi tehlikeli durumlarda akıllı binalarda yangını büyümeden engellemesi ve insanların rahatça tahliyesine imkan vermesi beklenir. Ayrıca, binalara giriş ve çıkışta gerekli güvenlik önlemleri de bulunmalıdır.

- En az insan gücü ile güvenlik
- Kart kontrol sistemleri
- Kişi tanıma sistemleri (parmak izi-ses-iris tarama)
- Duman algılama sistemleri
- Kartsız girişlerde alarm
- Asansör ve kapılarda tehlike anında devreye girecek sistemler
- UPS (Güç Kaynağı: elektrik kesilmelerinde devreye giren sistem)

iii. *İletişim-haberleşme sistemleri:* En az maliyetle iç ve dış iletişimde en iyi sistemler kullanılmalıdır.

- PBX telefon sistemi
- Vidyotext
- Kablosuz iletişim sistemi
- Elektonik mail
- Telekonferans sistemi

iv. *İşyeri otomasyonu:* İşyerinde, çalışma ortamından ve sisteminde en yüksek performans alınması beklenir. Bunun için gerekli bazı sistemler:

- Merkezi bilgi paylaşım servisi
- Yedekleme sistemi
- Bilgisayar destek sistemi
- Bilgi servisleri

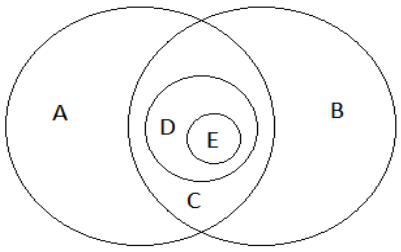
Akıllı bir binada tüm bu sistemler tek bir ana sistemde toplanır ve idare edilir (Engin, 2007).

- **Akıllı bina ve depreme dayanıklılık:**

Bir binadan aşağıdaki özellikler beklenir:

  - Sağlamlık
  - Güvenlik
  - Uzun zaman servis vermesi
  - Konfor
  - Verimlilik
  - Ekonomi

Özellikle esneme kapasitesi fazla olan yüksek katlı binalarda ve uzun köprülerde büyük deplasmanlar oluştuğundan depreme karsı direnç çok önemli bir husustur ve özel önlemler gerektirmektedir. Deprem, şiddetli rüzgar gibi dış etkiler ya da yangın ve korozyon gibi iç etkiler sonucu beklenilenden fazla gerilmeye ya da kimyasal, ısıl ve radyoaktif tehditlere maruz kalan yapılarda bina içerisindeki uyarıcıların girdileri ana kontrol merkezine gönderip buradan da tepki oluşturulması (daha önce hazırlanmış algoritmalara göre) akıllı binaların en önemli özelliğidir. Deprem esnasında sensörler vasıtası ile alınan kuvvet, hız, ivme gibi bilgiler toplanarak deprem yükünü azaltacak tepkiler oluşturulur (Engin, 2007).



Şekil 5.1. Akıllı bina şeması A: Uyumsal yapılar, B: Duyumsal yapılar, C: Kontrollü yapılar, D: Aktif yapılar, E: Akıllı yapılar

Uyumsal Yapılar: Kontrollü bir şekilde sistemdeki değişmelere adapte olabilir.

Duyumsal Yapılar: Sensörler yardımı ile sistem performansı izlenebilir.

Kontrollü Yapılar: Duyumsal ve uyumsal yapı özelliklerini taşır.

Aktif Yapılar: Dışarıda bir güç kaynağı bulunur. Deprem, rüzgar ve benzeri dış etkiler sonucu oluşan yüklere karşı kontrollü bir şekilde ayarlanabilir, geliştirilebilir tepki veren elemanlara sahiptir.
Akıllı Yapılar: Yukarıdaki tüm özelliklerin bütünüdür.

İnsan yapısı ile karşılaştırırsak; duyumsal yapı özellikleri insandaki duyu sistemine, uyumsal yapı özellikleri refleks sistemine, kontrollü yapı özellikleri kontrollü olarak tepki verebilmesine, aktif yapılar tepkisini duruma karsı ayarlayıp geliştirebilmesine benzemektedir (Engin, 2007).

- **Akıllı Bina Elemanları:**
  - *Sensörler:* Yapıda oluşan uyarının derecisini basınç, şekil değiştirme, ısı, elektrik, manyetik, kimyasal ve radyoaktif değerlerle ölçen ve ileten elemanlardır. Bina içinde kritik bölgelerde olurlar.
  - *Tepki elemanları:* Sensörlerden gelen analog sinyaller kontrol merkezine ulaşır ve burada analiz edilirler. Kontrol merkezi ise gerekli karşı tepki için tepki elemanlarını kuvvet, tork ve ivme gibi formlarda tepki üretmesi için uyarır.

Binada kullanılacak sönümleyici kütleler binanın büyüklüğü ile doğru orantıda büyük ve çok sayıda olurlar.

Dinamik etkilere karşı 3 çeşit sönümleyici sistem vardır:

1. Pasif
2. Aktif
3. Aktif- Pasif (Yarı-aktif)

Çizelge 5.1' de, yapı kontrol sistemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Yapı kontrol sistemlerinin sınıflandırılması (Engin, 2007)

YAPI KONTROL SİSTEMLERİ		
Pasif Kontrol		**Yarı Aktif ve Aktif Kontrol**
Sismik Yalıtım	**Pasif Enerji Yutucular**	
• Elastometrik mesnetler • Kurşun- kauçuk mesnetler • Elastometrik mesnetler ve enerji yutucu cihazlar • Sürtünme sarkacı mesnetleri • Yassı kayıcı mesnetler ve yük veren cihazlar • Yağlanmış kayan mesnetler ve enerji yutucu sistemler	• Metal sönümleyiciler • Sürtünme sönümleyiciler • Visko-elastik sönümleyiciler • Viskoz sönümleyiciler • Ayarlanmış kütle sönümleyiciler • Ayarlanmış sıvı sönümleyiciler	• Aktif kuvvet veren sistemleri • Aktif kütle sistemleri • Değişken rijitlik ve kütle sistemleri • Akıllı malzemeler

5.2 Aktif Yapı Kontrolü

Sensörler (zemin veya yapının içinde) ve tepki elemanları vardır. Aktif sönümleyiciler yapıda görülen bir itmeye karşı kuvvet üretirler. Tamamen kontrol edilebilirler ve büyük güç gerektirirler. Belli performans şartlarını sağlayacak şekilde deprem sırasında deprem girdilerini sürekli değerlendirip, gerekli direnci gösterirler. Belli algoritmalara göre tepki verirler.

5.3 Pasif ve Karma Yapı Kontrolü

5.3.1 Pasif kontrol

Yapıya en çok zarar veren dış etki, depremden kaynaklanan zemin hareketinin yatay bileşenidir. Bu sebeple yapının dış yüklere karşı korunmasında zemine rijit olarak mesnetli yapı modeli yerine, sınırlandırılmış hareket etme yeteneğine sahip yapı kavramı önem kazanmaktadır. Pasif kontrol ile amaçlanan yapının enerji tutma veya sönümleme kapasitesi arttırmaktır. Daha az teknoloji gereksinimi, çalışması için herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duyulmaması, karmaşık hesaplamalar

gerektirmemesi ve düşük maliyete sahip oluşu açısından aktif kontrollü sisteme alternatif bir çözümdür. Pasif kontrol uygulamasında yapının ömrü boyunca maruz kalabileceği deprem şiddetleri baz alınır ve buna göre sistem boyutlandırılır. Yani pasif kontrol, boyutlandırıldığı deprem şiddetlerinde etkindir. Diğer bir ifadeyle değişimlere adapte edilemezler. Bu nedenle ön görülen girdi ve çıktılar için gerekli bina özellikleri çok iyi şekilde tasarlanmalıdır. Aksi taktirde; yapıda, rezonans riskiyle birlikte ciddi deformasyonlar oluşabilir Bu özelliği aktif kontrole karşı olan en büyük dezavantajıdır (Düzel, 2010).

Pasif kontrolde kullanılan teknikler genelde ikiye ayrılır. Bunlar sırasıyla:

- Taban (sismik) yalıtım sistemleri
- Pasif enerji sönümleyen sistemlerdir.

5.3.1.1 Taban (sismik) yalıtım sistemleri

Taban yalıtım sistemlerinin mantığı yapının üst kısmının deprem sırasında sabit tutularak, alttaki zeminin hareketine izin verilmesidir. Buna göre yapı iki kısımdan meydana gelmektedir. 1. Kısım düşey doğrultuda rijit, yatay doğrultuda ise oldukça esnek olan taban yalıtım sistemidir. 2. Kısım ise taban yalıtım sistemine göre daha rijit olan üst yapıdan oluşmaktadır. Taban yalıtım sistemi kullanıldığında, görülmektedir ki; taban yalıtım sistemi dahil tüm yapının temel frekansı azalmakta yani periyot artmaktadır. Periyottaki artış yatay şekil değiştirmelerin daha da büyümesine neden olur. Fakat yatay doğrultudaki şekil değiştirmelerin büyük bölümü esnek olan taban yalıtım sistemine iletilmektedir. Yani taban yalıtımlı yapılarda, rijit üst yapıda tabana göre küçük rölatif şekil değiştirmeler, taban yalıtım sisteminde ise büyük yatay şekil değiştirmeler oluşmaktadır. Katlar arasındaki rölatif yer değiştirme küçük kaldığı için, üst yapı deprem sırasında hemen hemen şekil değiştirmeyen rijit bir yapıymış gibi davranır (Düzel, 2010).

Taban yalıtım sistemlerinin kolay uygulanabilir olmasının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Deprem kuvvetlerine karşı kendilerini adapte edebilme yeteneğinden yoksundurlar. Büyük yatay şekil değiştirmelerden dolayı taban yalıtım sisteminde kalıcı deformasyonlar oluşabilir ve gittikçe çoğalabilir. İleride meydana gelebilecek

olan depremlerde bu durum yapının stabilitesi üzerinde olumsuz bir etki yaratabilir. Deforme olmuş izolatörlerin değiştirilmesi mümkün değildir. Ayrıca yüksek katlı binalarda taban yalıtım sistemi yapı için zararlı olabilecek uplift kuvvetlerinin doğmasına sebep olur. Bu nedenle etkin olarak düşük katlı binalara uygulanırlar.

Taban yalıtım sistemlerinde genelde kauçuk izolatörler kullanılır. İzolatörlerin rijitliği kauçukların arasına yerleştirilen ince paslanmaz çelik plakalar sayesinde arttırılır. Yapının sismik kuvvetlere karşı performansını arttırmak için kurşun kauçuk izolatörler, viskoelastik sönümleyiciler ve sürtünmeli sönümleyiciler gibi çeşitli araçlar kullanılmaktadır.

Zemin-yapı etkileşiminin önemi bilinmektedir. Pratikte, yapılar modellenirken genellikle ankastre tabanlı olarak ele alınmaktadır. Bu durum, yapı ile zemin arasında var olan etkileşimin ihmal edilmesidir. Bu etkileşimin ihmal edilmesinin sakıncalı olabileceği bilinmektedir. Yer hareketi zemin ortamı aracılığı ile yapı sistemine aktarılmaktadır. Zeminden yapıya aktarılan etki ne kadar büyük olursa yapının tepkisi de o kadar büyük olur. Zemin-yapı etkileşimi olarak tanımlanan bu olay zeminden yapıya ve yapıdan zemine enerji aktarılması biçiminde yorumlanabilir. Zemin ile yapı arasındaki etkileşimin azalmasıyla yer hareketinin yapıda meydana getireceği etkilerinden yapı sisteminin korunabileceği anlamı ortaya çıkmaktadır. Bu amaca yönelik olarak yapı tabanı zeminden yalıtım işlemleri ile ayrılmaktadır. Bunun sonucunda, yer hareketlerinden dolayı yapı üzerinde meydana gelebilecek etkiler azaltılmış olacaktır. Böylece yapıların depremden daha az etkilenmesi sağlanmış olacaktır (Düzel, 2010).

Yapılarda taban yalıtımının yapılmasının pek çok faydaları olabilmektedir. Bunlardan bir tanesi, yalıtım işlemi yapının hakim frekansını azaltabilmesidir. Dolayısıyla, üst yapı rölatif olarak rijit kalabilmektedir. Yer değiştirmeler daha çok izolatörde meydana gelebilmektedir. Bunun sonucunda, yapının deprem hareketine karşı direnci artmaktadır. Diğer bir faydası ise, deprem hareketinden dolayı yapıya aktarılan ivmeler azalmakta ve yalıtım sistemi, yapının kullanımda negatif değerlendirmelere neden olmaksızın yapıya esneklik kazandırabilmektedir.

- **Düşük sönümlü doğal ve sentetik kauçuk mesnetler:**

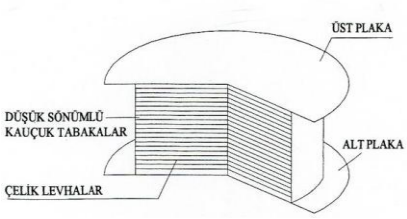
  Bu izolatörde, kauçuk volkanize (kauçuğun sülfürle yüksek ısıda sertleştirilmesi) edilip sıcaklık ve basınç altında tek hamleyle çok sayıda ince çelik levhalar arasına sıkıştırılmıştır (Şekil 5.2). Çelik levhalar, kauçuğun yana bombe yapmasını önler ve yüksek miktarda düşey rijitlik sağlar (Düzel, 2010).

  Düşük sönümlü elastomer mesnetlerin avantajları:

  – Kolay üretim
  – Kolay model oluşturulması
  – Mekanik özelliklerin zamandan, sıcaklıktan v.b. etkilenmesi

  Tek dezavantajı:

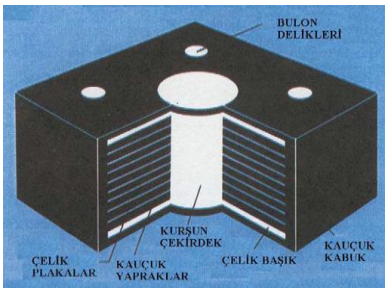
  – Genel olarak, ek bir sönüm sistemi gerektirmesi. Bu ek sistemler detaylı bağlantılar gerektirir.



Şekil 5.2. Düşük sönümlü doğal kauçuk mesnet (Düzel, 2010)

- **Kurşun çekirdekli mesnetler(LRB):**

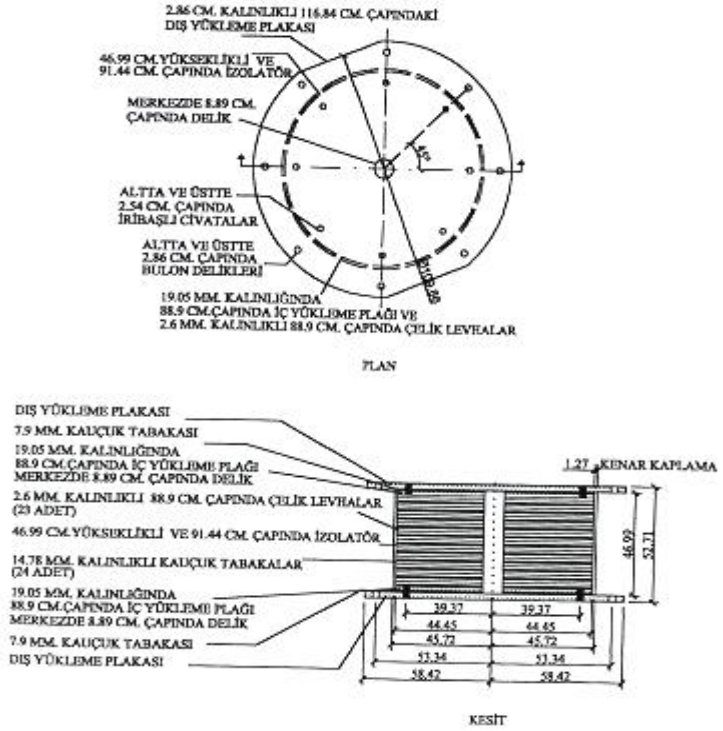
  Kurşun çekirdekli mesnet, düşük sönümlü kauçuk mesnetlerdeki gibi kauçuk tabakalara ek olarak bir veya daha fazla sayıda, uygun deliklere yerleştirilmiş kurşun çekirdeklerden oluşur (Şekil 5.3). Çelik plakalar, kurşun çekirdeği kayma deformasyonu yapmaya zorlar (Düzel, 2010).



Şekil 5.3. Kauçuk esaslı sismik izolatör (Ercan, 2005)

- **Yüksek sönümlü kauçuk sistemler (HDRB):**

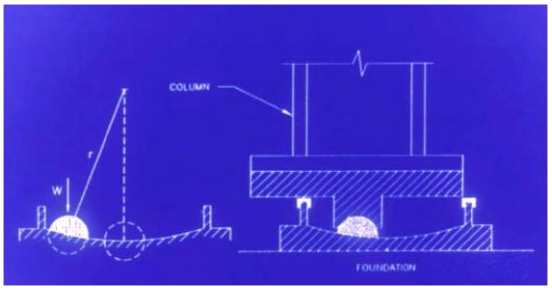
  Düşük sönümlü mesnetlerdeki ek sönüm elemanları ihtiyacını gidermek amacıyla karbon blok, yağ veya cam sakızı ve özel doldurucular ilave edilerek kauçuğun sönümü arttırılır (Şekil 5.4). Yüksek sönümlü kauçuk sistemler, trafik ve yeraltı raylı sistemleri kökenli yüksek frekanslı düşey titreşimleri azaltma uygulamalarında da kullanılırlar (Düzel, 2010).



Şekil 5.4. "SCOUGAL" Yüksek sönümlü kauçuk mesnet

- **Sürtünmeli sarkaç sistemi:**

  Sürtünmeli sarkaç sistemi, geometrisi nedeniyle kayma hareketi ve geri dönüş kuvveti oluşturan sürtünmeli bir yalıtım sistemidir. Paslanmaz çelikten küresel yüzeyde hareket eden bir mafsallı kayıcıya sahiptir. Mafsallı kayıcının küresel yüzeyle temasta olan yarı küresel yüzeyi düşük sürtünmeli kompozit malzemeyle kaplanmıştır. Kayıcının diğer yüzü tam küreseldir ve paslanmaz çelikle kaplanmıştır ve düşük sürtünmeli kompozit malzemeyle kaplanmış olan küresel kovuğa oturur (Şekil 5.5). Kayıcı, küresel yüzey üzerinde hareket ederek, taşıdığı kütleyi kaldırır ve geri dönüş kuvveti oluşturur. Mafsallı kayıcı ile küresel yüzey arasındaki sürtünme, izolatörlerde sönüm oluşturur (Düzel, 2010).



Şekil 5.5. Sürtünme esaslı izolatörün çalışma prensibi

- **Yay sistemler:**

  Elastomer ve kayıcı yalıtım sistemleri sadece yatay yalıtım sağlamak amacıyla düzenlenirler. Üç boyutlu bir yalıtım, elastomer mesnetler kullanılarak, yay tipi sistemler şeklinde oluşturulabilir.

  Bu sistemde, yatay ve düşey doğrultularda esnek davranış sergileyen büyük helezon çelik yaylar bulunur (Fotoğraf 5.1). Çelik yaylar sönümsüzdür ve sistem GERB viskosönümleyicilerle birlikte çalışır. Bütün üç boyutlu sistemlerde olduğu gibi, yalıtım sisteminin ağırlık merkezinin rijitlik merkezinin üstünde olmasından dolayı, yatay hareket ile devrilme hareketinin güçlü bir etkileşimi söz konusudur. Bu sistem, ağırlık merkezi ile rijitlik merkezinin aynı seviyede olması durumunda (nükleer enerji santrallerindeki resktör tekneleri) pratik anlam kazanır (Düzel, 2010).

Fotoğraf 5.1. GERB viskosönümleyici (İnternet 2)

- **Rocking sistemleri:**

  Üzerlerinde ağır konstrüksiyon yükleri taşıyan uzun ve narin yapılar, temel seviyesinde çekme kuvveti oluşturan devrilme momentlerinin etkisi altındadırlar. Derin su altı temellerinde ankrajla çekme kapasitesi sağlamak, oldukça pahalı bir

çözüm olabilir. Buna alternatif olarak, kolonları ya da köprü ayaklarını temel seviyesinden ayıran bir sistem önerilebilir. Bu kısmi yalıtım uygulaması, yapıya etkiyen deprem yüklerini ve özellikle kolonlarda veya köprü ayaklarında oluşacak çekme kuvvetlerini azaltır (Düzel, 2010).

5.3.1.2 Pasif enerji sönümleyen sistemler

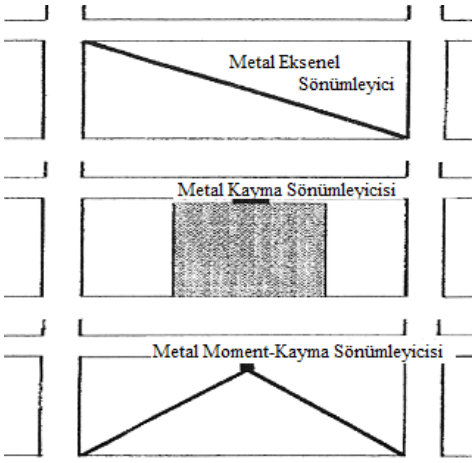
Dış yüklere maruz kalan yapı, yapıya etki eden enerjiyi bazı mekanik vasıtalar ile sönümleyerek yapının taşıyıcı sisteminde meydana gelebilecek zorlanma ve yer değiştirmeleri belli sınırlar içinde tutabilmek amacı ile geliştirilmişlerdir. Pasif enerji sönümleyen mekanik araçlar tüm bina yüksekliği boyunca kullanılabilir. Bu araçları üç ana gruba ayırabiliriz.

- Eğilme etkisi gösteren araçlar
- Sürtünme araçları
- Visko-elastik araçlar

Ayarlı sıvı sönümleyicilerin en büyük avantajı her iki yatay doğrultuda da titreşimin kolaylıkla kontrol edilebilir olmasıdır. Bunun yanında kontrol mekanizmasını harekete geçirmek için herhangi bir dış enerji kaynağına ihtiyaç yoktur. Sistemin basitliği nedeniyle maliyeti çok düşüktür ve herhangi bir eski binaya uygulanabilir. Fakat sistemin frekansı ile yapının doğal frekansının iyi ayarlanması gereklidir (Düzel, 2010).

- **Metal sönümleyiciler:**
  Bu tür enerji yutucular metallerin histeretik davranışlarından faydalanılarak, genellikle çelik malzeme ve sismik kat ötelemeleri sonucu oluşan eğilme, kesme veya eksenel yükleri alacak şekilde tasarlanmıştır. Tercih edilmelerindeki en önemli sebepler; uzun süreli çalışma güvenilirlikleri, çevre ve sıcaklık değişimlerine dayanıklı olmalarıdır. Eksenel metal sönümleyiciler genelde çapraz bağlantı şeklinde yerleştirilir (Şekil 5.6). Kesme ve eğilmeye çalışan sönümleyiciler duvarın üst noktası ile üst katın kirişinin alt noktası arasına

yerleştirilir. Bir diğer kesme ve eğilmeye çalışan sönümleyici tipi çelik bir kafes üzerine monte edilmiş haldir (Düzel, 2010).

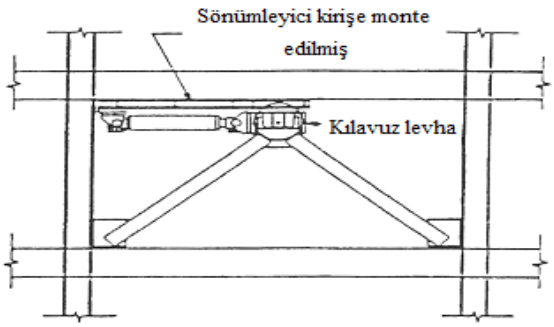


Şekil 5.6. Metal sönümleyici tiplerinin yerleştirilmesi (Düzel, 2010)

- **Sürtünme sönümleyicileri:**

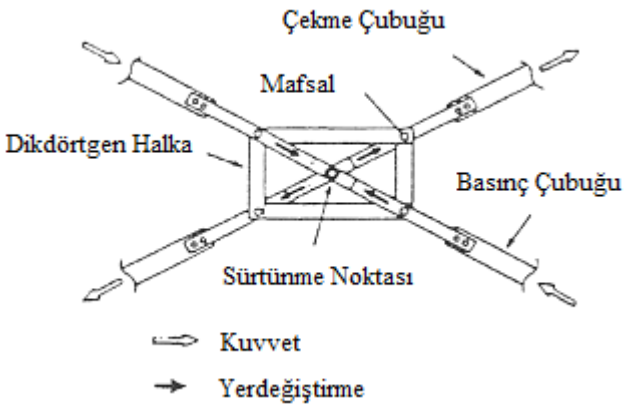
  Birçok değişik malzeme kullanılarak üretilen kayan yüzeylere sahip sürtünme sönümleyicileri vardır. Genelde çelik alaşımları ve metaller çapraz bağlantı şeklinde kullanılır. Sürtünme cihazlarının genel olarak iyi performans özellikleri bulunmaktadır. Davranışları yükleme genliğinden, frekansından ve yük çevrimi sayısından belirgin bir biçimde etkilenmez.

  Kurşun tozu emdirilmiş bakır yastıklar çelik kaplanmış cihaz ile temas halindedir. Değişik takozlarla yükün alındığı sürtünme yüzeyi geliştirilmiştir. Bu cihazlar her zaman çapraz bağlantı şeklinde kullanılmayabilirler (Aiken ve Kelly, 1990) (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Sumitomo sürtünme aygıtının kurulumu (Düzel, 2010)

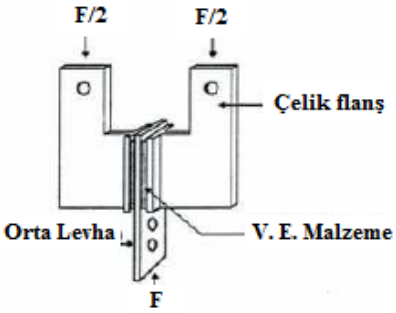
Basınç kuvvetine maruz olan bağlantı elemanı burkulur ve çekme kuvveti alan eleman sürtünme noktasında kaymaya sebep olur. İki çapraz elemanda çekmede etkili olacak şekilde boyutlandırılır (Pall ve Marsch, 1982) (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Pall sürtünme aygıtı (Düzel, 2010)

- **Visko-elastik sönümleyiciler:**

  Visko-elastik sönümleyiciler hız bağımlı bir sönüm kuvveti üretirler ve buna ek olarak da elastik rijitliğe sahiptirler (Şekil 5.9). En yaygın tipi merkezde bir çelik tabaka ve etrafında dıştaki iki çelik tabakaya bağlayan akrilik polimer tabakalar bulunan şeklidir (Düzel, 2010).

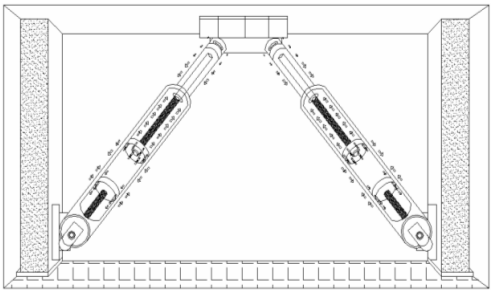


Şekil 5.9. Visko-Elastik Sönümleyici modeli (Engin, 2007)

- **Viskoz sönümleyiciler:**

  Viskoz sönümleyiciler, visko-elastik sönümleyiciler gibi hız bağımlı sönüm kuvveti oluşturan cihazlardır fakat yapıya sadece ek sönüm sağlarlar (Şekil 5.10). Çoğu viskoz sönümleyici sıvı viskoz sönümleyicidir ve arabalardaki şok emici

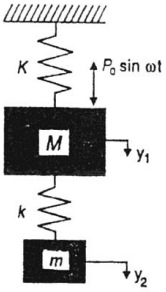
amortisörlere benzer. Bu tür aygıtların üretildiği sıvılar yük yavaş etkidiğinde düşük, hızlı etkidiğinde yüksek dayanım özelliğine sahiptir (Düzel, 2010).



Şekil 5.10. Viskos sönümleyici modeli (MEB İnşaat Teknolojisi, 2011)

- **Ayarlanmış kütle sönümleyiciler:**

  Kütlesi "M" ve rijitliği "K" olan yaya bağlanan, küçük kütle "m" ve rijitliği "k" olan yay tanımlanır. Harmonik bir hareket altında M kütlesi, m kütlesinin doğal frekansının $\omega = \sqrt{k/m}$, zorlayıcı frekansa eşit tutulması ile sabit halde bırakılabilir. İlk olarak tek serbestlik dereceli sistemden, sadece M kütlesinin olduğu bir sisteme f(t) titreşim kuvveti verilmektedir. Yapının tepkisi bazı şartlar sağlanarak ikinci bir kütle veya ayarlanmış kütle sönümleyici konarak azaltılabilir (Şekil 5.11) (Düzel, 2010).



Şekil 5.11. Ayarlanmış kütle sönümleyici modeli (Düzel, 2010)

- **Ayarlanmış sıvı sönümleyiciler:**

  Ayarlanmış sıvı sönümleyiciler, ayarlanmış kütle sönümleyicilere benzerler fakat burada hareketi engelleyen sıvının yüksek derecede lineer olmayan davranışıdır. Bu yüzden sıvı sönümleyicilerinin özellikleri fiziksel deneylere dayanmaktadır (Düzel, 2010).

5.3.2 Karma (Hybrid) kontrol

Hybrid kontrol araçları aktif ve pasif sönümleyici sistemlerin özelliklerinin birleştirilmesi olarak her iki sistemin yapıya entegre edilmesi ile oluşur. Binada oluşan harekete karşı kontrollü bir dirençle karşı koyar ve kuvvetin etkisini azaltırlar. Tamamen kontrol edilebilirler ve daha az güç gerektirirler. Karma kontrol sistemlerin oluşturulmasının asıl sebebi aktif kontrol sistemlerin enerji kaynağı ihtiyacını en aza indirmektir. Sismik hareket esnasında ana güç kaynakları zarar görse de dahili pilleri gerekli enerjiyi sağlar. Düşük enerji ihtiyaçları ve yüksek peformanslarından dolayı daha çok kullanılırlar. Büyük bir kısmı elektrik veya manyetik alana hassasiyeti olan sıvılar içerir (Engin, 2007; Düzel, 2010).

5.4 Sismik Yalıtım

Sismik yapı yalıtımı; yapıların deprem etkilerinden korunması amacıyla geliştirilmiş bir sistemdir. Sistemin amacı, bir yapıyı etkileyen deprem yüklerinin azaltılmasıdır. Sismik yalıtım yapının depreme dayanma kapasitesini arttırmak yerine, binaya gelen sismik enerjiyi binaların periyodunu uzatarak azaltma esasına dayanan depreme dayanıklı bir düzenleme yaklaşımıdır Deprem ve diğer dinamik yüklerin; mühendislik yapılarına, köprü ve viyadüklere verebileceği zararların önlenebilmesi, can ve mal kayıplarının en aza indirilebilmesi ve ulaşımın sağlanabilmesi amacıyla deprem izolatör sistemleri (sismik yalıtım) adı verilen bazı yeni sistemler ve donanımlar geliştirilmiştir.

Deprem anında aktif fay hareketlerinin oluşturduğu deprem yatay kuvvetleri vardır. Bu kuvvetler yukarıya doğru çıktıkça büyür. Yapılara gelen deprem kuvvetleri çok büyük boyutlarda olur. Öte yandan yapıların elastik olarak taşıyabilecekleri yükler ise sınırlıdır. Yaşanan pek çok depremde yapıların, ağırlığının %10’ u gibi bir yatay yüke elastik olarak karşı koyabileceği hesaplarla gösterilmiştir (Düzel, 2010).

Sismik yalıtım teknolojisinin doğru uygulamaları büyük depremler sırasında bile binaların elastik davranmasını sağlar. Şaşırtıcı olan da bu yaklaşım prensibinin hayli basit olmasıdır. Yapılan bir araştırmaya göre sismik yalıtımlı bir bina Richter ölçeğine

göre 8.0 büyüklüğündeki bir depremi, sanki Richter ölçeğine göre 5.5 büyüklüğündeki bir deprem gibi hisseder (Düzel, 2010).

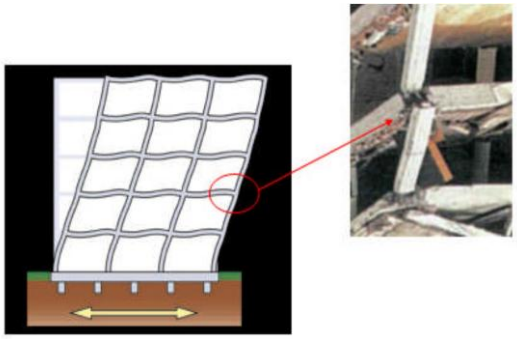
5.4.1 Sismik yalıtımın sağladığı avantajlar

Sismik yalıtım sayesinde aşağıda belirtilen yararlar sağlanır:

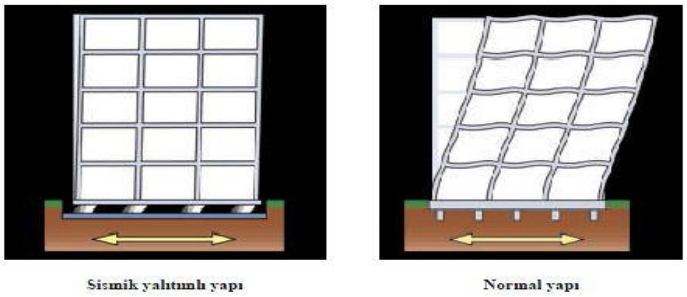
- Yüksek can güvenliği,
- Yapının taşıyıcı sistemi ve mimarî elemanlarında minimum deprem hasarı,
- Şiddetli depremlerden sonra bile hemen kullanım,
- Hemen kullanım sayesinde iş kaybının önlenmesi ve pazar payının korunması,
- Yapının değerli eşya ve cihaz içeriğine etkin koruma,
- Ulaşım yapılarında süreklilik,
- Köprü ve viyadüklerin hasar görmeden kullanılmasının devamı,
- Yıkılma ve hasar olmayacağından yeniden inşaat ya da onarım maliyetlerine gerek kalmaması,
- Minimum bakım gereksinimi,
- Araştırma ve geliştirme projelerinin korunması,
- Tarihî bina ve değerlerin korunması (MEB İnşaat teknolojisi, 2011)

5.4.2 Sismik Yalıtımın Sağladığı Teknik Avantajlar

- Normal bir yapıda deprem sırasında katlar arası farklı deplasmanlardan (yer değiştirme) dolayı, kolon ve kiriş birleşimlerinde hasarlar meydana gelir (Fotoğraf 5.2).
- Oysa sismik yalıtılmış bir yapıda katlar arası farklı deplasmanlar oluşmayacağı için kolon ve kirişlerde zorlamalar minimum olacaktır (Fotoğraf 5.3).

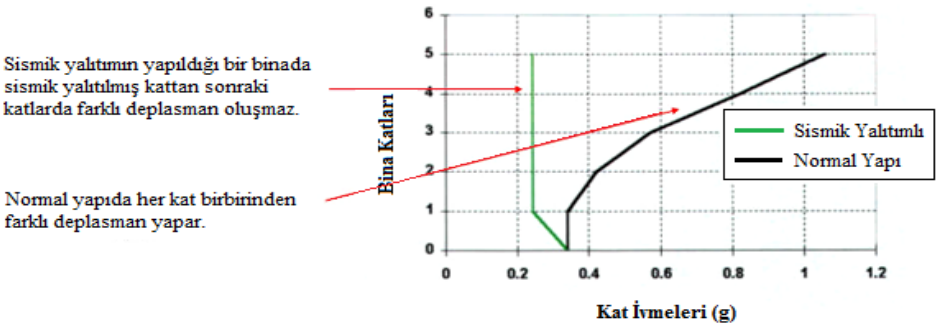


Fotoğraf 5.2. Normal yapıda farklı deplasman dolayısıyla kolon-kiriş davranışı (MEB İnşaat Teknolojisi, 2011)



Fotoğraf 5.3. Sismik yalıtımlı yapı ile normal yapının karşılaştırması (MEB İnşaat Teknolojisi, 2011)

- Sismik yalıtım kullanılmak suretiyle, bir yapının taşıyıcı elemanlarını etkileyen sismik (depremsel) iç kuvvetler ortalama 1/4 oranında azaltılabilir (Şekil 5.12).
- Sismik yalıtım ile bir yapıda oluşan katlar arası farklı yer değişimleri, etkili biçimde azaltılabilir. Katlar arası hareket farklılıklarının küçülmesi, yapının daha yavaş ve kontrollü salınım göstermesini sağlar. Böylece yapının kendisinin, içindeki canlıların, değerli eşya ve hassas cihazların etkin bir şekilde korunması sağlanır.



Şekil 5.12. Sismik yalıtımın yapıldığı bir binada, sismik yalıtılmış kattan sonraki katlarda farklı deplasmanlar oluşmaz (MEB İnşaat Teknolojisi, 2011).

Sonuç olarak sismik yalıtılmış yapıda şu özellikler elde edilir;

- Elastik davranış,
- Yapıya gelen kuvvetler azalır.
- Kat ivmeleri (hareket değişim farklılıkları) küçülür.
- Katlar arası deplasmanlar küçülür, hemen hemen bütün katlar yaklaşık aynı deplasmanı yapar (MEB İnşaat Teknolojisi, 2011).

5.5 Sismik Yalıtımın Kullanım Alanları

- Yüksek deprem performansı istenen tüm yapılar (Fotoğraf 5.4),
- Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları,
- Stratejik öneme sahip binalar (askerî, sivil savunma vb. binalar),
- İtfaiye bina ve tesisleri,
- PTT ve diğer iletişim tesisleri,
- Ulaşım istasyonları, hava alanları ve terminaller, köprü, viyadük gibi sanat yapıları (Fotoğraf 5.5),
- Enerji üretim ve dağıtım tesisleri,
- İlk yardım, kriz merkezleri, afet plânlama merkezleri,
- Toksik, patlayıcı vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı tesisler
- Bilgi işlem merkezleri,
- Tarihî binalar, müzeler (mevcut yapılarda da kullanılabilme özelliği).

Fotoğraf 5.4. Yokohoma/ Japonya (MEB İnşaat Teknolojisi, 2011)

Fotoğraf 5.5. Atatürk Hava Limanı Dış Hatlar Terminali/ İstanbul(MEB İnşaat Teknolojisi, 2011)

Kullanılması uygun olmayan durumlar:

- Yapıların periyotlarının uzatılması yumuşak zeminler üzerine inşa edilmiş yapılar için zararlıdır. Yumuşak zeminlerde sismik izolasyon konularak yapı periyodunun artırılması halinde yapıya gelecek deprem yükü artacaktır.
- Bitişik nizam yapılarda izolasyon yapılması uygun değildir (MEB İnşaat Teknolojisi, 2011).

BÖLÜM VI

KAYMA ÇERÇEVELERİNDE SÖNÜMLEYİCİLER ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

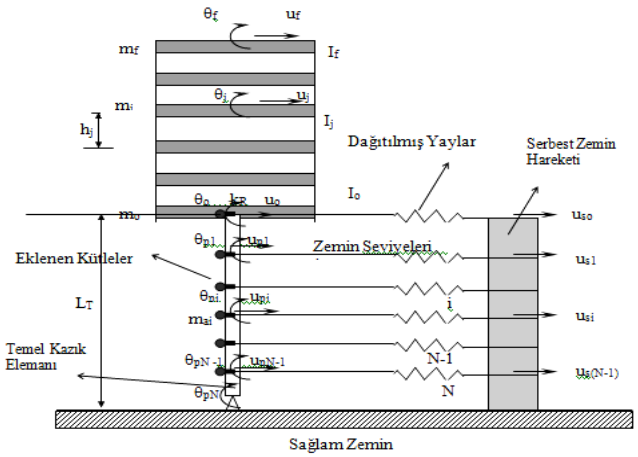
Son yıllarda literatürde araştırmacılar tarafından yoğun olarak ele alınmakla birlikte sınırlı çalışma yapılmıştır.

Sönümleyicilerin optimal yerleşimi ve optimal rijitlik katsayısını lineer serbestlik dereceli bir sistem için nümerik bir metod göstermişlerdir (Gurgoze ve Müller, 1992). Kayma yapıların deprem davranışlarında sönümleyici dağılımının etkilerini çalışmış ve üniform kat rijitlikli bir yapı için sönümleyicilerin yapıdaki kat sayısının yarısına alttan itibaren viskoz sönümleyiciler eklenmesinin yeterli olduğunu göstermişlerdir (Hahn ve Sathiavageeswara, 1992). Özel rijitlikli bir yapının viskoz sönümleyicilerinin optimal konfigürasyonunu bulmak için geliştirilen bir dizayn metodunu amaçladılar (Zhang ve Soong, 1992). Bu uygun kritere göre ek bir sönümleyici maksimum rölatif kat deplasmanın olduğu kata yerleştirilmesi gerekiyordu, bu basit ve ilkti. Spekturumları uyumlu depremlerin bir kümesi için amaçlanmış bir kayma yapısı modeli için hem optimal sönümleyici dağılımı hem de optimal kat rijitlik dağılımını bulmak için bir algoritmayı amaçladılar (Tsuji ve Nakamura, 1996). Tarafından yapılan yaklaşım ilginçti, fakat çok hesaplamalıydı ve onların problemi çok fazla yapay kısıtlama içeriyordu (Tsuji ve Nakamura, 1996). Mesela sönüm katsayılarının sınırları daha yukarılarda idi. Keyfi deterministik ve stokastik etkiler için amaçlanan titreşim parametrelerinin dağılımıyla titreşimin düşürülmesi için etkili ve basit bir optimum kontrol yöntemi gösterdi (Masri, 1981). Onlar aktif kontrol ile uğraşırken sonuçları pasif kontrol teorilerine bilgi vermekteydi. Takewaki, verilen rijitliklerle yapılar için optimal sönümleyicilerin yerleştirilmesini amaçladı (Takewaki, 1998-1999). Fleksibil sistemlerin bir sınıfının titreşim kontrolünde ayrık pasif sönümleyicilerin optimum dizaynı için bir gradyan algoritması gösterdi (De Silva, 1981). Visko-elastik olarak sönümlü yapılarda sönümün tekrar dizaynı için bir sonlu elemanlar perturbasyon metodu geliştirdiler (Cao ve Mlejnek, 1995). Eş zamanlı optimal rijitlik ve sönümleyici katsayılarını bulmak için deformasyonları ve ivmeleri aynı zamanda kontrol eden, gradyan temelli bir algoritma gösterdi (Takewaki, 1999). Çalışılmış olan problem aslında ters bir öz vektör problemi

idi. Zemin büyütme davranışını da içeren en üst kata yerleştirilen bir kütle (tuned mass) ile yapıdaki optimal vizkoz sönümleyiciler için sistematik bir metod göstermiştir (Takewaki, 2000). Kesmeli eğilmeli bir yapının zemine kesme-eğilme etkisi altındaki kazıklarla yerleştirilmesi durumunda bir sismik rijitlik dizaynı yöntemi geliştirdi (Takewaki, 1999; Aydın, 2001).

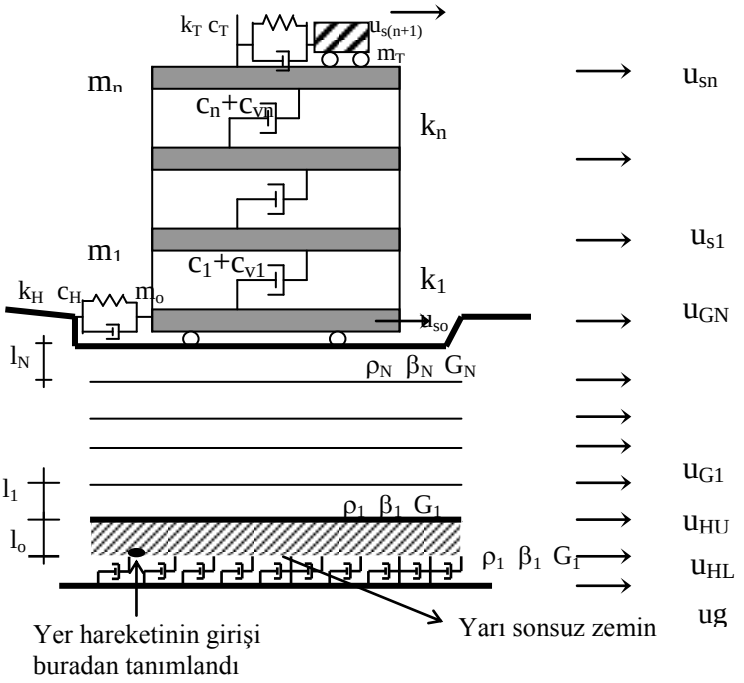
Toplam eklenen sönümleyicilerin belirli bir kısıtlaması altında bir yapısal sistemin sönümsüz doğal frekansı altında, hesaplanan transfer fonksiyonlarının büyüklüklerinin toplamını minimize ederek optimal sönümleyici yerleşimini bulmak için sistematik ve etkili bir prosedürü gösterdi (İzuru Takewaki, 1997). Optimallik kriterleri türetildi ve optimal sönümleyicilerin yerleşimi herhangi belirsiz bir iteratif işlem yapılmaksızın bu kriterler üzerinde hesaplandı. Bu sonlu elemanlarla modellenen her hangi bir sisteme uygulanabilirdi (Aydın, 2001).

Kesmeli eğilmeli kazıklı bir temele sahip bir yapı için etkili bir sismik rijitlik dizaynı geliştirdi (Şekil 6.1). Üst yapının dizaynında farklı zemin seviyelerinin etkisi göz önüne alınarak, dizayn depremlerinin bir kümesi sağlam zeminde tanımlandı. Görüldü ki, kat deplasmanlarını düzenlemek için önemli parametreler olarak en düşük mod'un deformasyon nicelikleri ve toplam sistemin doğal periyodunu göz önüne alarak etkili bir sismik rijitlik dizayn yöntemi geliştirmede etkiliydi. Kapalı formda karışık ters bir öz vektör problemi kullanıldı. Yönetici denklemlerin fiziksel açıklaması formal olarak non-lineer denklemlerin eş lineer denklemlere transformasyonu ile açıklandı (Aydın, 2001).



Şekil 6.1. Kazıklı temele sahip esnek alt ve üst yapının birlikte modeli (Takewaki, 1999)

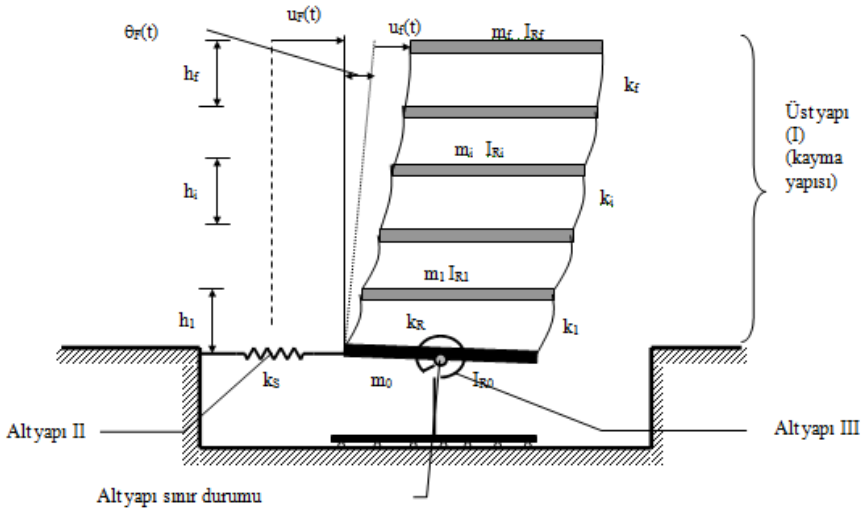
En üst katında kütleli bir sönümleyici ile zeminde davranışı büyüten faktörleri de içine alan yapıdaki optimal vizkoz sönümleyici yerleşimini bulan yeni bir sistematik metod gösterildi (Şekil 6.2). Zeminin non lineer büyütmesi, yatay bir yay ve bir sönümleyici ile lokal etkileşim denk bir lineer model ile tanımlandı. Zemin yüzeyinin hysteretic sönümleyicisi ve visko-elastik yarı sonsuz zemin içerisindeki yayılmış (radiational) sönümleyiciler düşünüldü. Yapı–zemin etkileşim modeline orijinal steepest direction search algoritması uygulandı. Katsayılar matrisinin kapalı form açıklamaları, transfer fonksiyonu ve onun dizayn değişkenine göre türevlerinin hesapları oldukça etkili bir şekilde yapıldı. Görüldü ki, en üst katta ki kütleli sönümleyici ve her kata yerleştirilen viskoz sönümleyicilerin birlikte kullanımı davranışı ve yapının doğal periyot oranlarını düşürmek için etkili idi ve optimal sönümleyici yerleşimini karakterize etmek için zemin yüzeyinin modellenmesi anahtar bir parametre idi (Aydın, 2001).



Şekil 6.2. Üst katta yerleştirilen kütleli sönümleyici yay sistemi ile zemin yüzeyinin birlikte modeli (Takewaki, 2000)

Bileşik bir mod senteziyle toplam rijitlik kapasitesinin bir kümesi için yeni bir formülasyon amaçlanarak elastik olarak mesnetli bir kayma yapı modeli alt yapı kısımları ile bir örnek olarak alındı (Şekil 6.3). Üst yapı, *swaying spring* ve *rocking spring* ile alt yapıyı oluşturan parçalar bir bütün olarak düşünüldü. Üst yapının kat rijitlikleri, temel rijitlik dağılımının lineer kombinasyonlarının terimleriyle açıklandı.

Üniform kesit alanına sahip zemine mesnetlenmiş bir kayma kiriş modelinin öz vektörleri, bir başlangıç modeli için tamamlayıcı modlar olarak adapte edilen zeminin doğrusal ve açısal deplasmanlarına karşı gelen rijid modlarıyla birleştirildi. Görüldü ki, mod sentez tekniğinin ters kullanımıyla dizayn probleminde rijitlik parametrelerini bulmak için etkili ve hesaplamalı bir prosedür geliştirildi (Takewaki vd., 2000; Aydın, 2001).



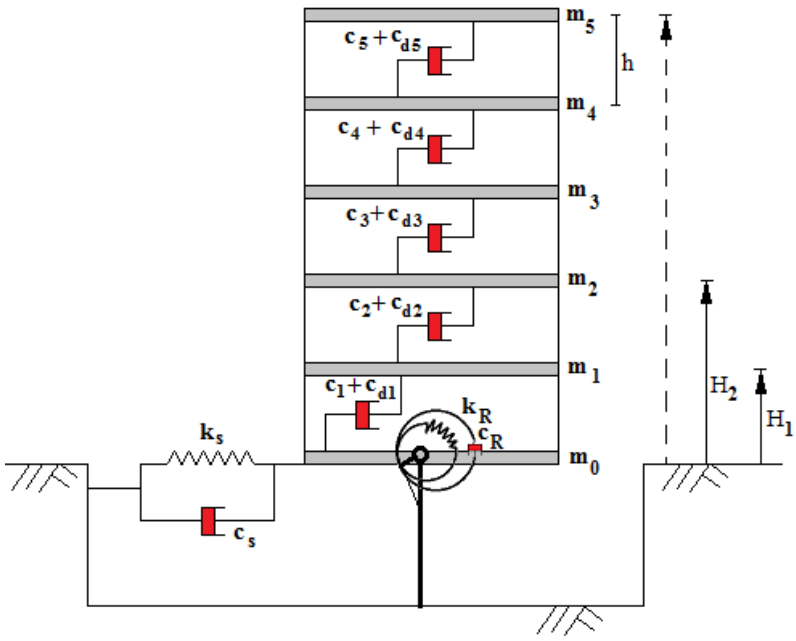
Şekil 6.3. Zemin ile yapının birlikte modellenmesi (Takewaki vd., 2000)

BÖLÜM VII

KAYMA ÇERÇEVELERİNDE OPTİMUM SÖNÜMLEYİCİ DAĞILIMINA ZEMİN ETKİSİ

7.1 Problemin Formülasyonu

Şekil 7.1' deki gibi 5 katlı yapı zemin modeli düşünülsün. Sismik etkiye maruz toplu kütleli sistem, genelleştirilmiş koordinat sisteminde zamana bağlı olarak U(t) kadar deplasman yapsın. M sistemin kütle matrisi, M_B yapının kütle matrisi, M_{BS} doğrusal yaya ait kütle matrisi, M_{BR} açısal yaya ait kütle matrisi, K sistemin rijitlik matrisi, K_B yapının rijitlik matrisi, K_S zeminin doğrusal rijitlik matrisi, K_R zeminin açısal rijitlik matrisi, C sistemin sönüm matrisi, C_B yapının sönüm matrisi, C_S zeminin doğrusal sönüm matrisi, C_R zeminin açısal sönüm matrisi olarak tanımlansın. M ve K matrislerine ait elemanlar bilinmektedir. Sönüm matrisi $C=\alpha K$ şeklinde rijitlikle orantılı olarak seçilmiştir.



Şekil 7.1. Zemin-yapı profili

- **Sistem kütle matrisi**

$$[M]=\begin{bmatrix} [M_B] & [M_{BS}] & [M_{BR}] \\ & E_1 & E_2 \\ Simetri & & E_3 \end{bmatrix} \tag{7.1}$$

$$[M_B]=\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \tag{7.2}$$

$$[M_{BS}]=\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix} \tag{7.3}$$

$$[M_{BR}]=\begin{bmatrix} m_1H_1 \\ m_2H_2 \\ m_3H_3 \\ m_4H_4 \\ m_5H_5 \end{bmatrix} \tag{7.4}$$

Burada, H_i *(i=1,2,...,5)* her kat için zeminden kat döşemesine olan yüksekliği ifade etmekte olup birimi m dir.

$$E_1 = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 \tag{7.5}$$

$$E_2 = m_1H_1 + m_2H_2 + m_3H_3 + m_4H_4 + m_5H_5 \tag{7.6}$$

$$E_3 = m_1H_1^2 + m_2H_2^2 + m_3H_3^2 + m_4H_4^2 + m_5H_5^2 + I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3} + I_{R_4} + I_{R_5} \tag{7.7}$$

(7.2), (7.3), (7.4) matrislerini ve (7.5), (7.6), (7.7) denklemlerini (7.1)'te yerine koyarsak sistemin kütle matrisi,

$$[M]=\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 & m_1H_1 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & m_2 & m_2H_2 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & m_3 & m_3H_3 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 & m_4 & m_4H_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & m_5 & m_5H_5 \\ m_1 & m_2 & m_3 & m_4 & m_5 & \sum_{i=1}^{5} m_i & \sum_{i=1}^{5} m_iH_i \\ m_1H_1 & m_2H_2 & m_3H_3 & m_4H_4 & m_5H_5 & \sum_{i=1}^{5} m_iH_i & \sum_{i=1}^{5} (m_iH_i^2 + I_{R_i}) \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

şeklinde elde edilir.

- **Sistem rijitlik matrisi**

Sistem rijitlik matrisini elde etmek için (7.10), (7.11), (7.12) numaralı matrisler, (7.9)'te yerine yazılır. k_S ve k_R değerleri (7.13) ve (7.14) denklemlerinden bulunur.

$$[K]=[K_B]+[K_S]+[K_R] \quad (7.9)$$

$$[K_B]=\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4+k_5 & -k_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

$$[K_S]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

$$[K_R]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_R \end{bmatrix} \tag{7.12}$$

$$k_s=\frac{6,77}{1,79-\nu}Gr \tag{7.13}$$

$$k_R=\frac{2,52}{1-\nu}Gr^3 \tag{7.14}$$

Buradan sistem rijitlik matrisi,

$$[K]=\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4+k_5 & -k_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_R \end{bmatrix} \tag{7.15}$$

şeklinde elde edilmiş olur.

- **Sistem sönüm matrisi**

Sistem sönüm matrisini elde etmek için de aynı şekilde (7.17), (7.18), (7.19), numaralı matrisler, (7.16)'te yerine yazılır. c_S ve c_R değerleri (7.20) ve (7.21) denklemlerinden bulunur.

$$[C]=[C_B]+[C_S]+[C_R] \tag{7.16}$$

$$[C_B]=\begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3+c_4 & -c_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4+c_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{7.17}$$

$$[C_S]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{7.18}$$

$$[C_R]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_R \end{bmatrix} \tag{7.19}$$

$$c_s=\frac{6,21}{2,54-\nu}\rho v_s r^2 \tag{7.20}$$

$$c_R=\frac{0,136}{1,13-\nu}\rho v_s r^4 \tag{7.21}$$

Buradan sistemin sönüm matrisi,

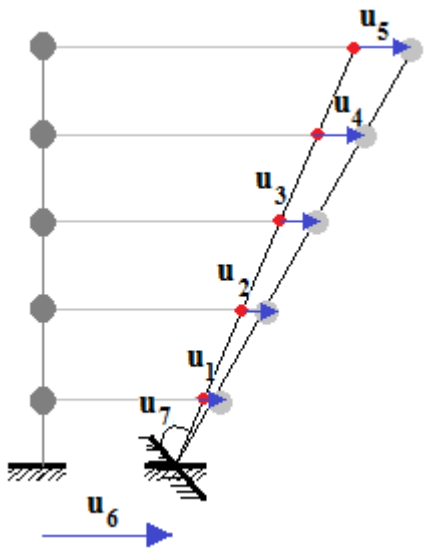
$$[C]=\begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3+c_4 & -c_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4+c_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_R \end{bmatrix} \tag{7.22}$$

olarak bulunur. Bu matris ek sönümleyicileri kapsamaz.

Hareketin zaman bağlı diferansiyel denklemi;

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=-[M]\{r\}\{\ddot{u}_g\} \tag{7.23}$$

şeklindedir. Şekil 7.2' de yapıya ait deplasmanlar gösterilmiştir.



Şekil 7.2. Yapı modelinin deformasyon şekli

Yer ivmesi $\ddot{u}_g(t)$, ivme vektörü $\ddot{u}(t)$, hız vektörü $\dot{u}(t)$, yerdeğiştirme vektörü $u(t)$, r deprem hareketi yönündeki serbestliklere karşı gelen elemanları 1'e eşit olan etki vektörüdür. Zaman tanım alanından frekans tanım alanına $\ddot{u}_g=\ddot{U}_g e^{i\omega t}$ ve $u=Ue^{i\omega t}$ bağıntıları kullanılarak dönüşüm yapılırsa, denklem (7.23),

$$KU(\omega)+i\omega CU(\omega)-\omega^2 M\,U(\omega)=-Mr\ddot{U}_g(\omega) \tag{7.24}$$

formuna dönüştürülebilir. $U(\omega)$ ve $\ddot{U}_g(\omega)$; u ve $\ddot{u}_g$'nin Fourier dönüşümleri, ω zorlama frekansı, $i=\sqrt{-1}$ ifadeleri bilinmektedir. Sönümleyiciler eklendiğinde denklem (7.24),

$$\left(K+i\omega\left(C+C_d\right)-\omega^2 M\right)U_{da}(\omega)=-Mr\ddot{U}_g(\omega) \tag{7.25}$$

haline getirilebilir. Burada C_d,

$$[C_d]=\begin{bmatrix} c_{d1}+c_{d2} & -c_{d2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_{d2} & c_{d2}+c_{d3} & -c_{d3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_{d3} & c_{d3}+c_{d4} & -c_{d4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_{d4} & c_{d4}+c_{d5} & -c_{d5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_{d5} & c_{d5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{7.26}$$

Burada, $U_{da}(\omega)$ viskoz sönümleyicilerin eklendiği durumda yerdeğiştirme vektörünün Fourier dönüşümünü ifade etmektedir. C_d eklenen sönümleyicilere ait bilinmeyen sönüm matrisidir. Yeni bir parametre (Takewaki, 2000b),

$$X(\omega)\equiv\frac{U_{da}(\omega)}{\ddot{U}_g(\omega)} \tag{7.27}$$

Şeklinde tanımlanırsa, denklem (7.25) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Lambda X=-Mr \tag{7.28}$$

X transfer fonksiyonuna karşı gelen yerdeğiştirme vektörü, Λ matrisi ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\Lambda = K + i\omega\left(C + C_d\right) - \omega^2 M \tag{7.29}$$

Burada, rijitlik K, kütle M, yapısal sönüm C ve $\omega = \omega_1$ olarak bilinmektedir. Tasarım değişkenleri, C_d ile verilen matrisin içindeki c_{di} sönüm katsayılarıdır. Denklem (7.28)'den Λ transfer fonksiyonuna karşı gelen yerdeğiştirme vektörü çekilirse,

$$X = -\Lambda^{-1} Mr \tag{7.30}$$

şeklinde olur. Burada bilinmeyen c_{di} sönümleyici parametreleri Λ vektörü içerisindedir. Minimum yapılmak istenen tepe yerdeğiştirmesinin transfer fonksiyonu değeri X vektörü içinde bulunmaktadır.

7.1.1 Tepe yerdeğiştirmesi için sönüm optimizasyonu

Optimum sönümleyici dağılımı probleminin amaç fonksiyonu, transfer fonksiyonu tepe yerdeğiştirmesi değeridir (Şekil 7.3). Sönümleyicilerin toplamında bir aktif ve her bir sönümleyicide bir tane olmak üzere tasarım değişkeni sayısı kadar pasif kısıtlama mevcuttur. Tepe yerdeğiştirmesi transfer fonksiyona bağlı olarak amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

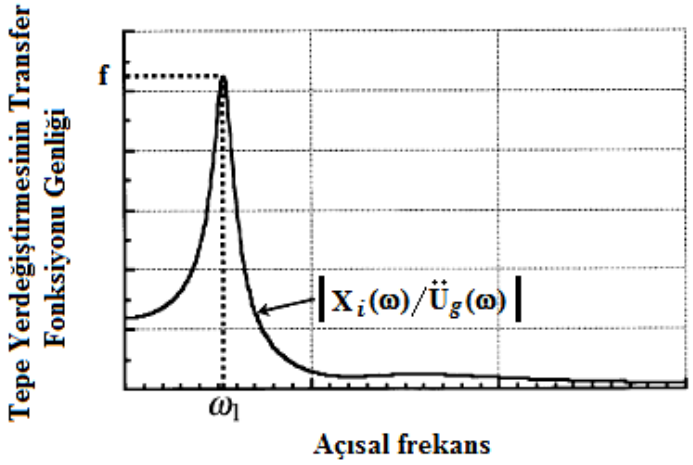
$$f = \left|X_5\right| + \left|X_6\right| + H_5\left|X_7\right| \tag{7.31}$$

$$X_5 = U_5 + U_6 + HU_7 \tag{7.32}$$

Burada; X_5 tepedeki göreli deplasmanı, X_6 zeminin yatay deplasmanını, X_7 zeminin açısal deplasmanını, H_5 ise 5. katın (tepenin) zeminden yüksekliğidir.
X_5, 5. katın transfer fonksiyonu tepe yerdeğiştirmesidir. Burada H, bina yüksekliğidir. Eklenen sönümleyicilerin toplamında yapılan aktif ve pasif kısıtlamalar aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sum_{i=1}^{n} c_{di} = \overline{W} \tag{7.33}$$

$$0 \le c_{di} \le \overline{c_{di}} \qquad (i=1,...,5) \tag{7.34}$$



Şekil 7.3. Bir yapıya ait sönümsüz haldeki açısal frekansın katlar arası öteleme transfer fonksiyonu genliği ve yaptığı tepe (Takewaki, 2000)

$\overline{W}$, $\overline{c_{di}}$ sırasıyla, sönümleyicilerin sönüm katsayılarının toplamı için verilen bir üst sınır değer ve her bir sönümleyicinin sönüm katsayısı için bilinen üst sınır değerdir. Seçilen amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar altında Lagrangian (L) fonksiyoneli,

$$L(c_d, \lambda, \mu, d) = f + \lambda(\sum_{i=1}^{n} c_{di} - \overline{W}) + \sum_{i=1}^{n} \mu_i (0 - c_{di}) + \sum_{i=1}^{n} \nu_i (c_{di} - \overline{c}_{di}) \tag{7.35}$$

şeklinde olmaktadır. Burada λ, μ={μi} ve d={di} Lagrange çarpanlarıdır.

7.1.2 Tepe yerdeğiştirmesi için optimum sönüm kriterleri

Amaç fonksiyonunu minimize etmek için sönüm katsayılarının alt ve üst kısıtlamaları olmaksızın L(μ=0, d=0) Lagrangian fonksiyonelinin, c_{dj} *(j=1, 2, .., 5)* ve λ'ya göre türevleri alınırsa,

$$f_{,j} + \lambda = 0 \qquad (j = 1,..,5) \qquad\qquad 0 < c_{dj} < \overline{c_{dj}} \tag{7.36}$$

$$\sum_{j=1}^{n} c_{d\,j} - \overline{W} = 0 \tag{7.37}$$

denklemleri bulunur. Burada ( ),j c_{dj}'ye göre kısmi türevleri göstermektedir. Dikkat edilmesi gereken husus, eklenen sönümleyicilerin sönüm katsayılarının negatif olamamasıdır. Sönüm katsayılarının sıfır olmasının fiziksel bir anlamı yoktur. Eğer sönüm katsayılarının alt ve üst kısıtlamaları aktif ise, denklem (7.36) aşağıdaki gibi düzeltilmelidir.

$$f_{,j} + \lambda \geq 0 \qquad c_{d\,j} = 0 \tag{7.38}$$

$$f_{,j} + \lambda \leq 0 \qquad c_{d\,j} = \overline{c_{d\,j}} \tag{7.39}$$

Lineer olmayan bu denklem takımı en dik yön arama metodu kullanılarak sayısal olarak çözülecektir.

7.1.3 Sönüm optimizasyonunda tepe yerdeğiştirmesi için çözüm algoritması

Kullanılan yöntemde, c_{dj}=0 *(j=1, 2, ..., 5)* kabul edilerek bir başlangıç tasarımı yapılsın. Eklenen sönümleyicilerin sönüm katsayıları adım adım artırılsın ve her adımda hangi katta ne kadar artırılacağı bulunsun. $\Delta\, c_{dj}$ ve ΔC; j. kattaki sönümleyici katsayısındaki ve sönüm katsayılarının toplamındaki artış olsun. ΔC verilsin ve $\{\Delta\, c_{dj}\}$'lerin miktarları ve yerleri hesaplansın. Bu algoritmayı kurmak için amaç fonksiyonunun tasarım değişkenlerine göre birinci ve ikinci dereceden duyarlılıklarının analitik olarak bulunması gerekir.

Denklem (7.28)'in, tasarım değişkeni c_{dj}'ye göre türevi alınırsa,

$$\Lambda_{,j}\, X + \Lambda\, X_{,j} = 0 \tag{7.40}$$

şeklinde olur. Λ tersi alınabilen bir matristir. $X_{,j}$ terimi denklem (7.40)'dan çekilirse,

$$X_{,j} = -\Lambda^{-1}\Lambda_{,j}X \tag{7.41}$$

haline gelir. Burada X_i,

$$X_i = \mathrm{Re}[X_i] + i\,\mathrm{Im}[X_i] \tag{7.42}$$

şeklindedir. Denklem (7.42)'da $\mathrm{Re}[X_i]$ ve $\mathrm{Im}[X_i]$ gerçel ve sanal değişkenleri göstermektedir. X_i'nin birinci dereceden duyarlılığı, benzer formda aşağıdaki gibi yazılır.

$$X_{i,j} = (\mathrm{Re}[X_i])_{,j} + i(\mathrm{Im}[X_i])_{,j} \tag{7.43}$$

X_i'nin mutlak değeri,

$$|X_i| = \sqrt{(\mathrm{Re}[X_i])^2 + (\mathrm{Im}[X_i])^2} \tag{7.44}$$

şeklindedir. $|X_i|$'nin birinci dereceden duyarlılığı,

$$|X_i|_{,j} = \frac{1}{|X_i|}\left\{\mathrm{Re}[X_i](\mathrm{Re}[X_i])_{,j} + \mathrm{Im}[X_i](\mathrm{Im}[X_i])_{,j}\right\} \tag{7.45}$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki ve denklem (7.41)'den hesaplanır. Denklem (7.45)'in ikinci bir tasarım değişkenine göre türevi alınırsa,

$$|X_i|_{,jl} = \frac{1}{|X_i|^2}(|X_i|\{(\mathrm{Re}[X_i])_{,l}(\mathrm{Re}[X_i])_{,j} + \mathrm{Re}[X](\mathrm{Re}[X_i])_{,jl} + (\mathrm{Im}[X_i])_{,l}(\mathrm{Im}[X_i])_{,j} + \mathrm{Im}[X_i](\mathrm{Im}[X_i])_{,jl}\} - |X_i|_{,l}\{\mathrm{Re}[X_i](\mathrm{Re}[X_i])_{,j} + \mathrm{Im}[X_i](\mathrm{Im}[X_i])_{,j}\}) \tag{7.46}$$

şeklinde olmaktadır. Amaç fonksiyonunun ikinci derece duyarlılığını gösteren denklem (7.46)'de $(\mathrm{Re}[X_i]_{,jl})$ ve $(\mathrm{Im}[X_i]_{,jl})$ değerleri, aşağıdaki gösterildiği gibi

X'nin ikinci türevlerinden bulunur. Denklem (7.41)'in l'ye göre ikinci defa türevi alınırsa,

$$X_{,jl} = \Lambda^{-1}\Lambda_{,l}\Lambda^{-1}\Lambda_{,j}X - \Lambda^{-1}\Lambda_{,j}X_{,l} \tag{7.47}$$

formuna gelir. Bu denklem türetilirken $B_{,j}^{-1} = -B^{-1}B_{,j}B^{-1}$ ilişkisi kullanılmıştır. Görülüyor ki, B matrisi c_{di}'nin lineer fonksiyonudur. Denklem (7.41) denklem (7.47)'de yerine konursa,

$$X_{,jl} = \Lambda^{-1}\Lambda_{,l}\Lambda^{-1}\Lambda_{,j}X + \Lambda^{-1}\Lambda_{,j}\Lambda^{-1}\Lambda_{,l}X = \Lambda^{-1}(\Lambda_{,l}\Lambda^{-1}\Lambda_{,j} + \Lambda_{,j}\Lambda^{-1}\Lambda_{,l})X \tag{7.48}$$

şeklinde olur.

$c_j < \bar{c}_j$ **hali için çözüm algoritması :**

Adım 0. Başlangıçta eklenen sönümleyicilerin sönüm katsayılarını sıfır kabul et, cj=0 j=1,...,5. $\Delta C = \overline{W}/m$ farz et (m tasarım adım sayısı).

Adım 1. $f_{,i}$ amaç fonksiyonunun birinci dereceden türev değerlerini hesapla. Denklem (7.45)'i kullan.

Adım 2. - $f_{,k}$ =Max(- $f_{,i}$) denklemini gerçekleştiren k indisini bul.

Adım 3. f değerini $f + f_{,k}\,\Delta c_k$ ile yenile.

Adım 4. $f_{,i}$ değerini $f_{,i} + f_{,ik}\,\Delta c_k$ ile yenile. Denklem (7.46)'yı kullan.

Adım 5. Eğer - $f_{,k}$ $= \underset{j, j\neq k}{\mathrm{Max}}$ (- $f_{,j}$) durumunu doğrulayan bir j indisi var ise buna karşı gelen $\overline{\Delta c_k}$ 'yı hesapla ve $f_{,i}$ değerini $f_{,i} + f_{,ik}\overline{\Delta c_k}$ ile yenile.

Adım 6. 2. ve 5. adımlar arasını, $\sum_{i=1}^{n} c_i = \overline{W}$ kısıtlaması gerçekleşene kadar tekrar et.

Adım 2 ve 3'de kısıtlama $\sum_{i=1}^{n} \Delta c_i = \overline{\Delta W}$ altında değeri azaltılan amaç fonksiyonu bulunur ve o yönde yenilenir. Takewaki (2000b) tarafından verilen bu algoritmaya en dik yön arama (Steepest Direction Search) algoritması denir. Matematiksel programlamada iyi bilinen "Steepest Descent Method"a benzetilebilir. Geleneksel "Steepest Descent Method" gradyan vektörlerini kullanır, optimallik kriterlerini kullanmaz.

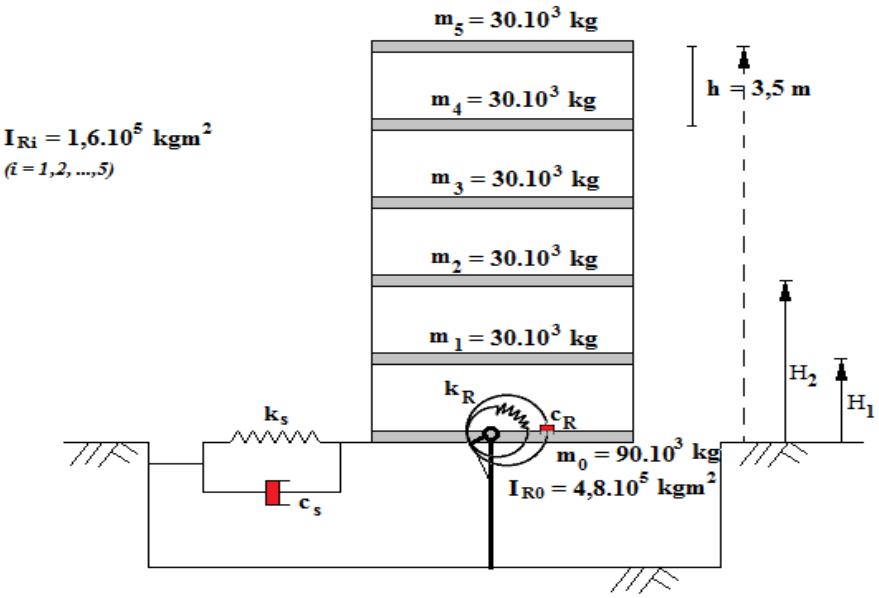
Eğer algoritmada katlı indeks var ise (k_1,...,k_m), adım 2 ve 3'de f ve $f_{,j}$ aşağıdaki gibi yenilenmelidir.

$$f \rightarrow f + \sum_{i=k_1}^{k_m} f_{,i} \, \Delta c_i \tag{7.49}$$

$$f_{,j} \rightarrow f_{,j} + \sum_{i=k_1}^{k_m} f_{,ji} \, \Delta c_i \tag{7.50}$$

7.2 Sayısal Örnek

Bu tez çalışmasında, bir yapının farklı zemin şartlarında sismik etki altında zemin türünün (kumların sıkılığının) yapıya yerleştirilecek sönümleyici yerlerinin ve miktarının belirlenmesinde etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profillerinden oluşan üç farklı durum için 5 katlı betonarme bir yapı ele alınmıştır (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. Yapı-zemin etkileşimli 5 katlı kayma çerçevesi modeli

Analizlerde kullanılacak zeminlere ait parametreler olan yoğunluk (ρ), poisson oranı (ν), kayma dalgası hızı (v_s) ve kayma modülü (G) literatürden derlenerek Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Uygulamada kullanmak üzere seçilen v_s, ν, G, ρ değerleri (Carter ve Bentley, 1991; AASHTO,1995; Bowles, 1996; DBYBHY, 2007)

	v_s (m/s)	ν	G (MPa)		ρ (kg/m³)
			Statik	Dinamik	
Gevşek Kum	150	0,25	8	33	1450
Orta Sıkı Kum	300	0,3	15	151	1650
Sıkı kum	450	0,35	24	570	1850

Yapı Şekil 7.1 de gösterildiği gibi, zeminde yatay yönde ve dönmeye maruz toplu kütleli bir yapı modellenmiştir. Yapı, kayıcı mesnetten kaynaklanan deplasmana, yapının kendi içinde yaptığı deplasmana ve dönmeden kaynaklanan deplasmana maruz bırakılmıştır (Şekil 7.2).

Seçilen 5 katlı yapıda, katların kütleleri (m) ve kat kütle atalet momentleri (I_R) sırasıyla; m_i = 30x10^3 kg, I_{Ri} = 1,6x10^5 kgm^2 (i=1, 2….5) ile temele ait m_0 = 90x10^3 kg, I_{R0} = 4,8x10^5 kgm^2 ve kat yükseklikleri (h_i) 3,5 m olarak ele alınmıştır (Takewaki,

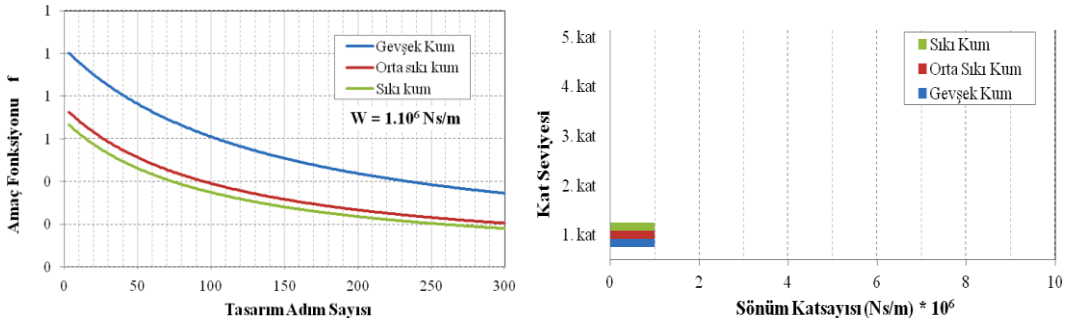
2001). Yapı-zemin etkileşiminin yatay hareketi (k_s, c_s) ve açısal hareketi (k_R, c_R) ile ilgili rijitlik ve sönüm katsayıları Parmelee (1970) tarafından önerilen (7.13), (7.14), (7.20) ve (7.21) denklemleri yardımıyla bulunmuştur. Yapısal sönüm ζ_o= %2, kat rijitlikleri üniform ve 2,5 10^7 N/m seçilmiştir. r, yapının oturma alanının eşdeğer teğet çemberin yarıçapı olup 4 m seçilmiştir.

W, toplam sönüm olmak üzere; 1. 10^6 (Ns/m), 5. 10^6 (Ns/m), 15. 10^6 (Ns/m), 20. 10^6 (Ns/m), 1. 10^7 (Ns/m), 5. 10^7 (Ns/m), 15. 10^7 (Ns/m), 20. 10^7 (Ns/m) miktarları için Mathematica 5.0 simgesel yazılım programı kullanılarak, sönüm miktarları ve zeminin sıkılığı (gevşek kum, orta sıkı kum ve sıkı kum) değiştirilerek kayma çerçevesinde sönümleyici optimizasyonu problemi incelenmiştir. Görülmüştür ki, belli miktardaki sönüm için zemin sıkılığı değiştirildikçe sönüm miktarının dağılımı katlarda farklılık arzetmektedir.

7.2.1 Analizler ve Yorumlar

- **Optimizasyon**

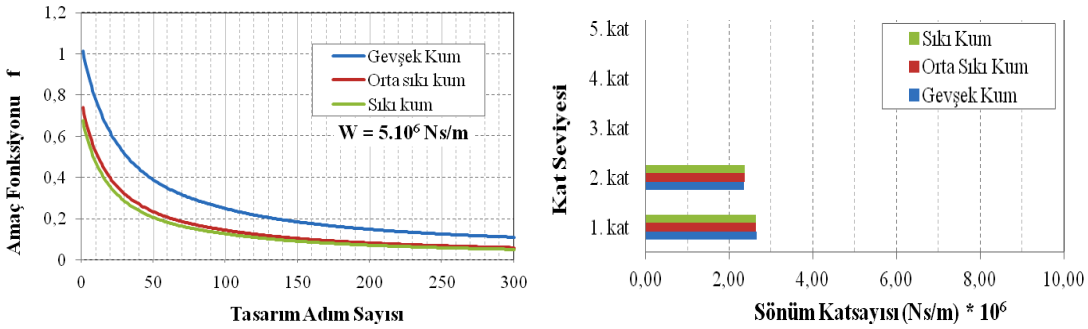
Yapılan optimizasyon analizleri sonucunda W=1.10^6 Ns/m miktarında sönüm olması durumunda tüm sönümleyicilerin sadece 1. kata konulması gerektiği ve zemin sıkılığının bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. W=1.10^6 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı

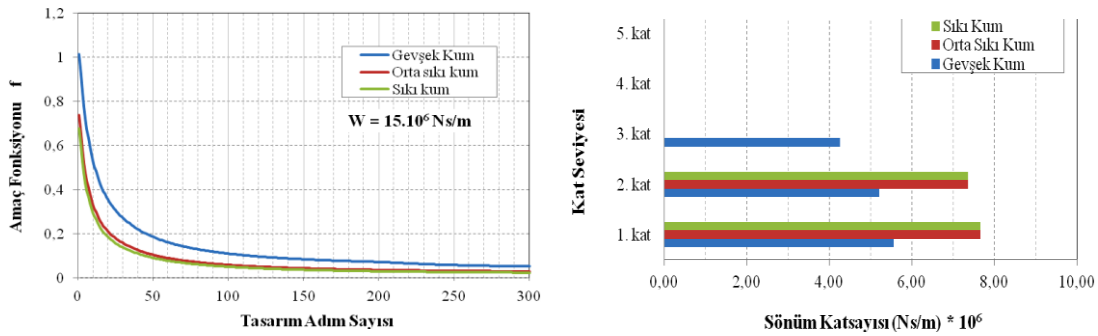
Şekil 7.6' te W=5.10^6 Ns/m miktarında sönüm olması durumunda sönümleyicilerin 1. ve 2. kata dağıtılması gerektiği gözlemlenmiştir. 5.10^6 Ns/m lik sönüm; iki kata yaklaşık miktarlarda dağıtılmış olup, 1. katta gevşek kum zemin kullanılması

durumunda orta sıkı ve sıkı kum zeminlere göre bir miktar daha fazla sönüm ihtiyacı olduğu gözlemlenmektedir. Toplam sönüm değişmediği için 1. katta kullanılacak sönümün fazlalığı ikinci kattan eksiltilecektir.

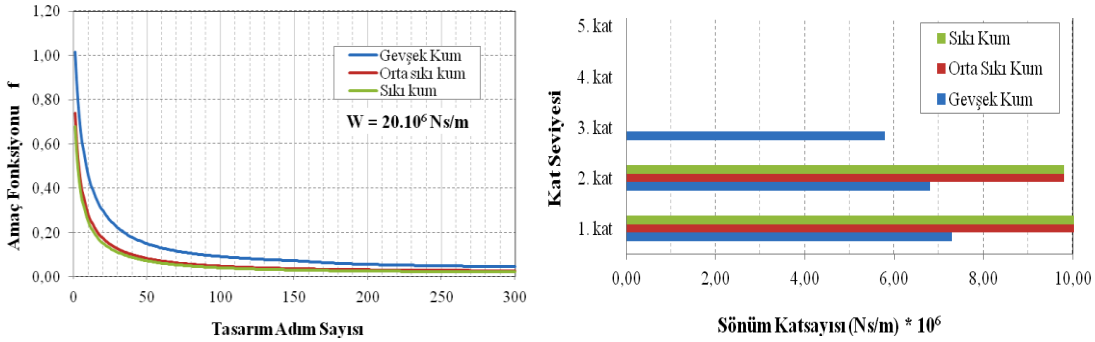


Şekil 7.6. W=5.10^6 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı

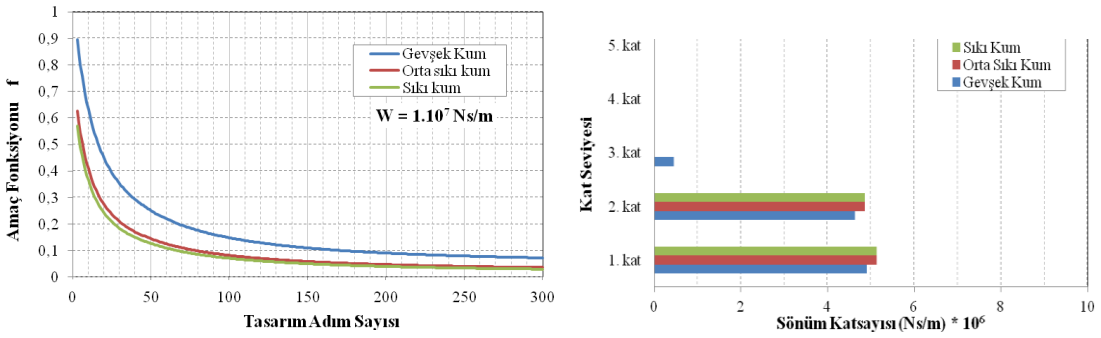
Şekil 7.7' da W=15.10^6 Ns/m, Şekil 7.8' de W=20.10^6 Ns/m, Şekil 7.9' de W=1.10^7 Ns/m, Şekil 7.10' da W=5.10^7 Ns/m, miktarında sönüm olması durumunda zeminin sıkılığının etkisi açıkça görülmektedir. Gevşek kum zemin için sönümleyicilerin 1., 2. ve 3. katlara; orta sıkı ve sıkı kum zemin türleri için ise 1. ve 2. katlara dağıtıldığı görülüyor. Bu seviyedeki sönümler için; orta sıkı ve sıkı kum zeminlerde sönüm miktarının iki kata yaklaşık miktarlarda ve aynı oranlarla dağıtıldığı, gevşek kum zemin için ise orta sıkı ve sıkı kum zemine göre optimizasyonun farklılık arzettiği gözlemlenmektedir.



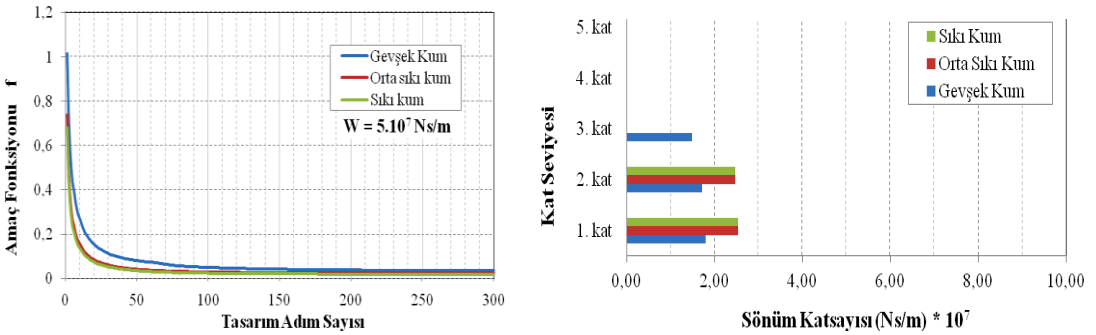
Şekil 7.7. W=15.10^6 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı



Şekil 7.8. W=20.10^6 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı

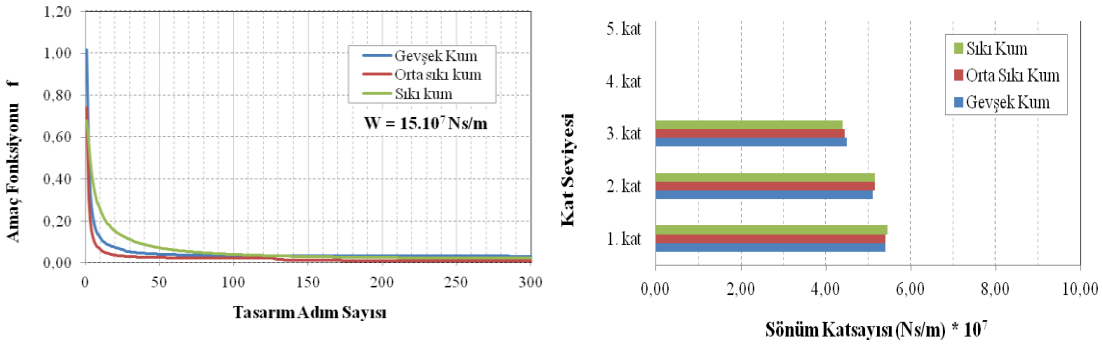


Şekil 7.9. W=1.10^7 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı

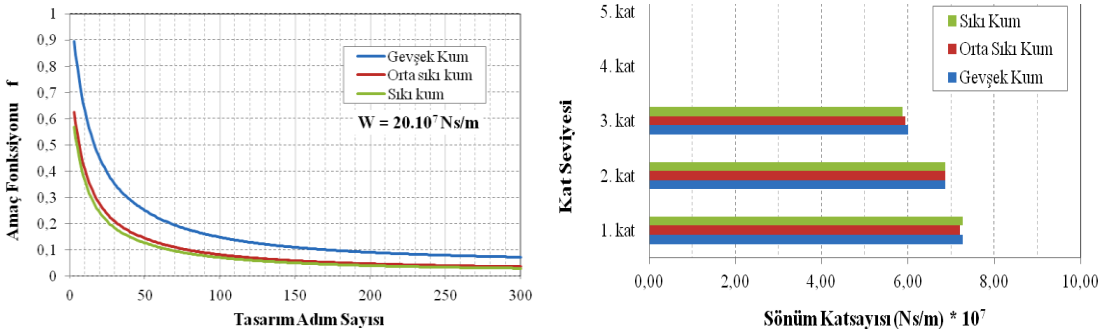


Şekil 7.10. W=5.10^7 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı

Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de, W=15.10^7 ~ 20.10^7 Ns/m seviyelerindeki sönümler için; zemin sıkılığının farklılaşması ile optimizasyonun anlamsızlaştığı, üç kata da yaklaşık oranda sönümleyici dağılımı yapılması gerektiği gözlemlenmektedir.



Şekil 7.11. W=15.10^7 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı



Şekil 7.12. W=20.10^7 Ns/m miktarındaki sönümün; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için amaç fonksiyonları ve sönümleyici miktarının katlara dağılımı

Gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profilleri için çözülen optimizasyon problemine ait analiz sonuçları Ek-A' da verilmiştir.

- **Zaman Tanım Alanında Deprem Analizi**

Şekil 7.2'de toplu kütle olarak gösterilen yapının deformasyon şekli üzerinden açıklayalım. 1., 2., 3., 4., ve 5. katlarda malzemeden kaynaklanan yapının iç yapısında oluşan deplasmanlar u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 olup; u_6 yapının zeminden kaynaklanan yatay deplasmanını, u_7 ise temel dönmesinden kaynaklanan açısal deplasmanı ifade etmektedir. X_i *(i=1, 2., ...,5)* toplam deformasyon olmak üzere,

$$X_1 = u_6 + u_1 + H_1 u_7 \tag{7.51}$$

$$X_2 = u_6 + u_2 + H_2 u_7 \tag{7.52}$$

$$X_3 = u_6 + u_3 + H_3 u_7 \tag{7.53}$$

$$X_4 = u_6 + u_4 + H_4 u_7 \tag{7.54}$$

$$X_5 = u_6 + u_5 + H_5 u_7 \tag{7.55}$$

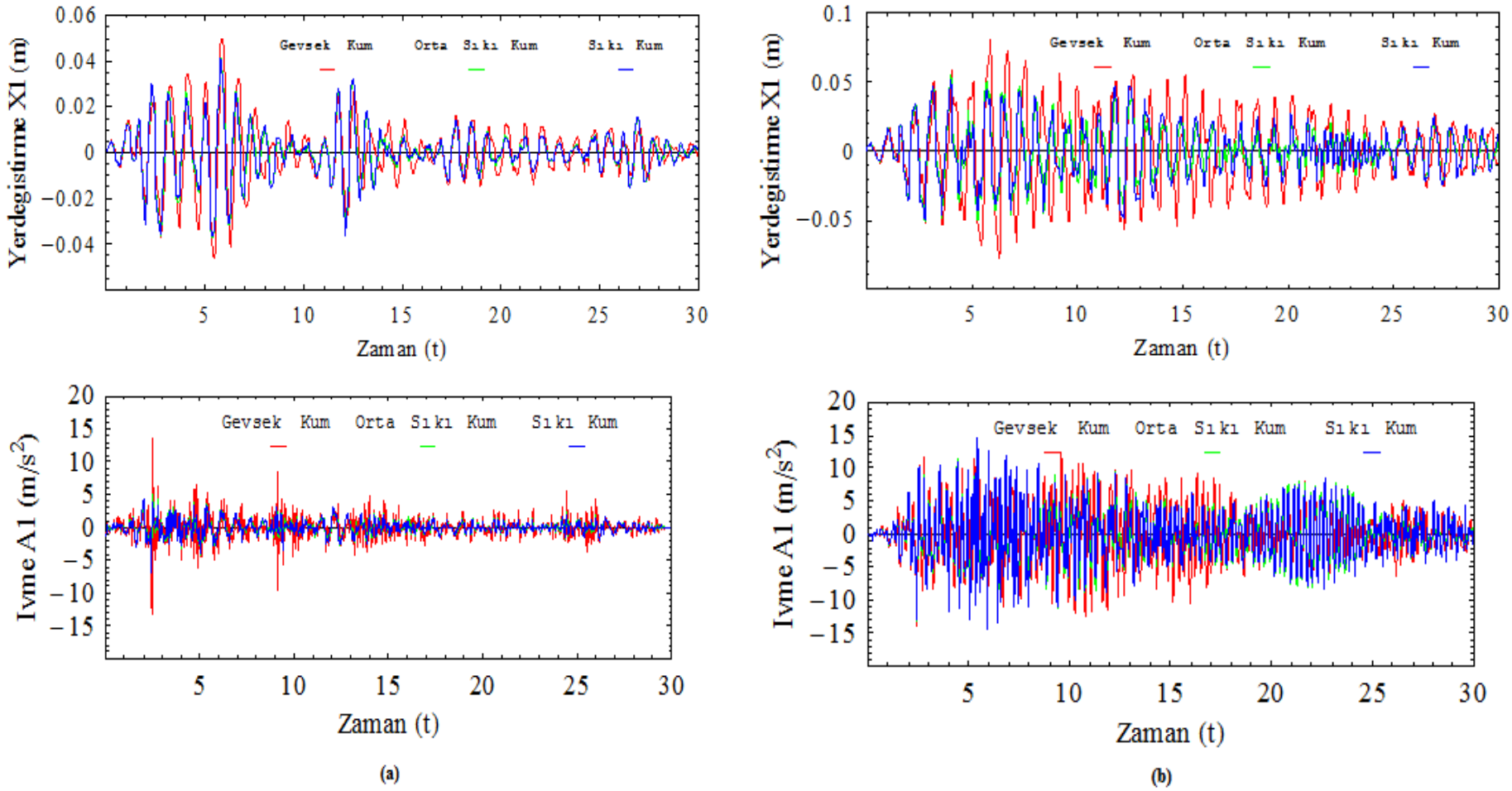
$$X_6 = u_6 \tag{7.56}$$

$$X_7 = H_5 u_7 \tag{7.57}$$

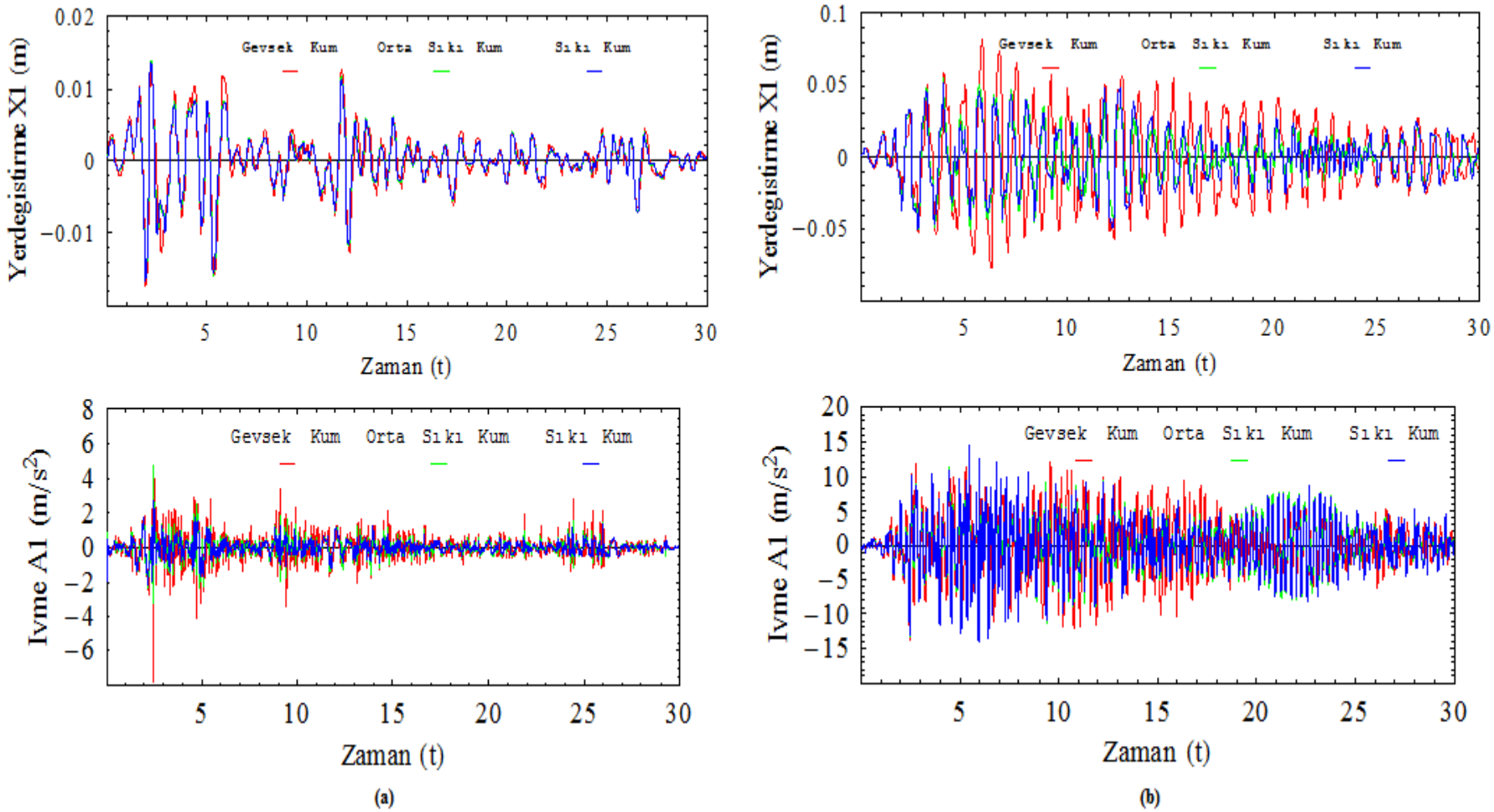
şeklinde ifade edilir.

X_1 için sönümleyici kullanılması (a) ve kullanılmaması (b) halinde Time-History analizlerinden elde edilen toplam yerdeğiştirme ve ivme grafikleri; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin cinsleri için karşılaştırmalı olarak Şekil (7.13 - 7.15)' de verimiştir.

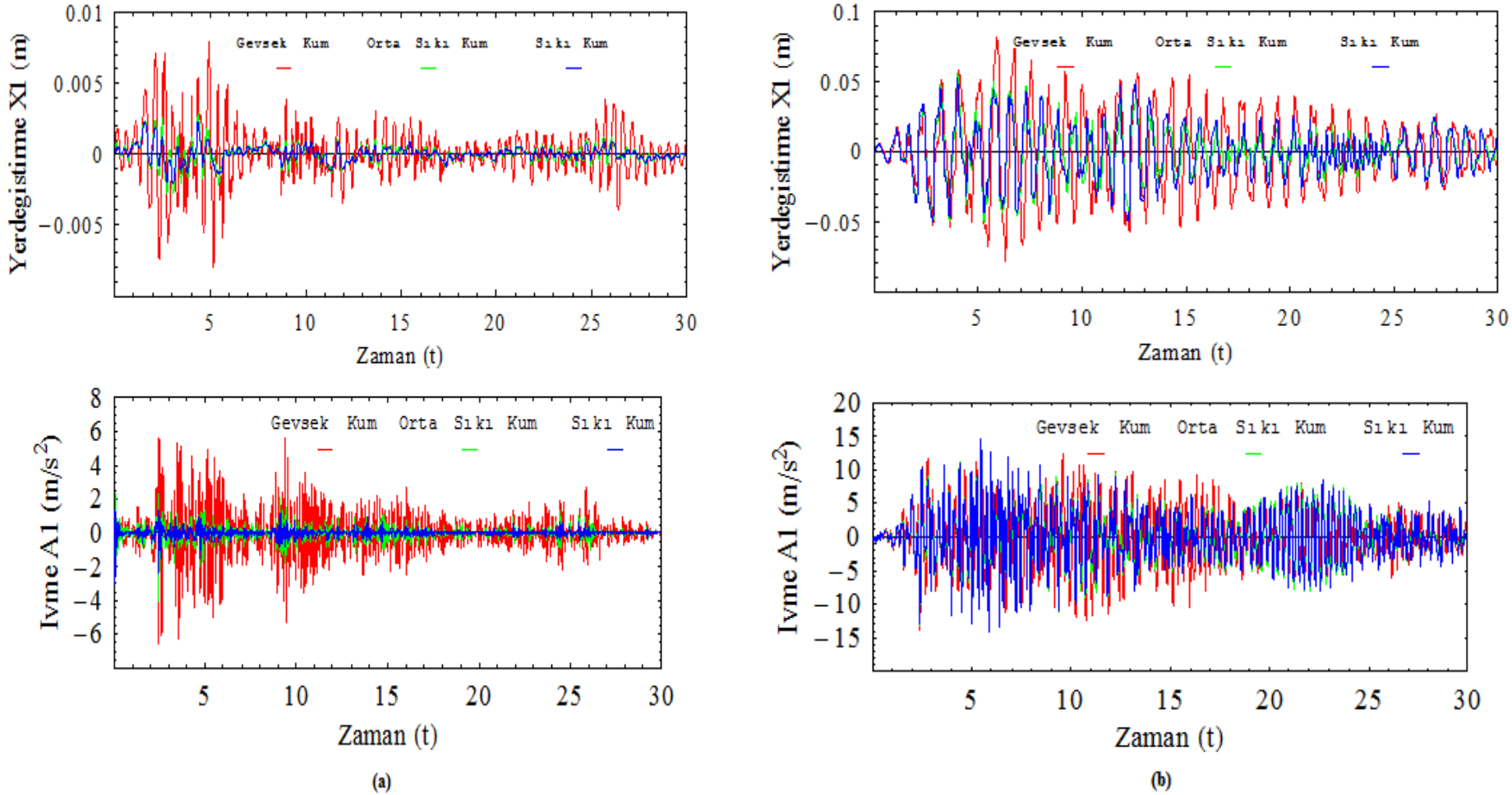
Ek-B'de sönümleyici kullanılması ve kullanılmaması halinde farklı zemin profilleri için (gevşek, orta sıkı ve sıkı kum) tüm katların Time-History analizlerinden elde edilen toplam yerdeğiştirme ve ivme grafikleri verilmiştir.



Şekil 7.13. 1.10^6 lık sönüm için sönümleyicili (a) ve sönümleyicisiz (b) analizden 1. kata ait toplam yerdeğiştirme ve ivmenin zemin cinsleriyle karşılaştırılması



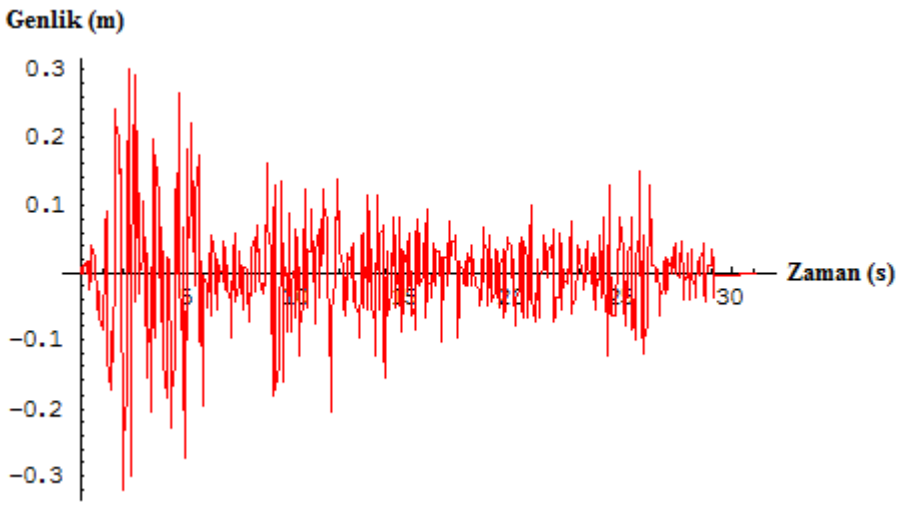
Şekil 7.14. 1.10^7 lık sönüm için sönümleyicili (a) ve sönümleyicisiz (b) analizden 1. kata ait toplam yerdeğiştirme ve ivmenin zemin cinsleriyle karşılaştırılması



Şekil 7.15. 15.10^7 lık sönüm için sönümleyicili (a) ve sönümleyicisiz (b) analizden 1. kata ait toplam yerdeğiştirme ve ivmenin zemin cinsleriyle karşılaştırılması

- **Newmark β- Metodu kullanarak El Centro depremi için analiz sonuçları:**

Katlar arası toplam deformasyon ve ivme değerlerin maksimumları aynı sönüm seviyesinde, sönümleyicili ve sönümleyicisiz sistemin zemin cinsinin değiştirilmesiyle değişimini incelemek amacıyla El Centro deprem dataları kullanılarak yapılan zaman tanım alanında deprem analizinden alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 7.16).



Şekil 7.16. El Centro deprem datası

Yerdeğiştirme ve ivmeler açısından elde edilen her bir kattaki maksimum değerler belirlenmiş ve sönümleyicisiz ve sönümleyicili sistem açısından karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 7. 17 (a) ve (b)' de sırasıyla, W=1.10^{6}'lık sönüm seviyesinde sönümleyicili ve sönümleyicisiz analizden; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin şartlarında her kat için toplam yerdeğiştirmeler ve ivmeler birbiri ile karşılaştırılmıştır. Sönümleyicisiz sistemde toplam yerdeğiştirmeler (her kat için) sönümleyicili sisteme göre daha fazladır. Sönümleyicili sistemde gevşek kum zemin için; 5. katta 0,18 m mertebelerine ulaşan deplasman 1. katta 0,05 m civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü, sistemde ise yine gevşek kum zemin için deplasman; 5. katta yaklaşık 0,3 m de pik değerine ulaşılırken 1. katta 0,08 m civarındadır.

Sönümleyici kullanılan sistemde zemin sıkılığına bağlı olarak deplasman azalan bir eğilim gösterirken, doğal sönümlü sistemde 2. katta eşitlenen deplasman miktarı üst

katlara çıkıldıkça orta sıkı kum ile sıkı kum arasında deplasman artışında ters ilişki gözlenmiştir (Şekil 7.17 a-b).

Gevşek kum zemin için değişen ivme değeri, sönümleyicili sistemde sıkı kum zemin için; 5. katta 18 m/s^2 mertebelerine ulaşan ivme 1. katta 7 m/s^2 civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü, sistemde ise yine sıkı kum zemin için ivme; 5. katta yaklaşık 21 m/s^2' de pik değerine ulaşılırken 1. katta 14,5 m/s^2 civarındadır.

Sönümleyici kullanılan sistemde zemin sıkılığına bağlı olarak ivme 1. ve 2. katta orta sıkı ve sıkı kuma göre gevşek kum zemin profilindeki ivme değerinden küçükken, 3., 4. ve 5. katlarda orta sıkı ve sıkı zemin profiline sahip zeminlerdeki ivme değerleri gevşek olana göre daha büyük değerlerdedir. Doğal sönümlü sistemde 1., 2., 3., ve 4. katta ivme 15 m/s^2 mertebelerinde olup 5. katta 24 m/s^2' lere kadar yükselmiştir (Şekil 7.17 c-d).

Şekil 7. 18 (a) ve (b)' de sırasıyla, W=1.10^7 Ns/m lik sönüm seviyesinde sönümleyicili ve sönümleyicisiz analizden; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin şartlarında her kat için toplam yerdeğiştirmeler birbiri ile karşılaştırılmıştır. Sönümleyicisiz sistemde toplam yerdeğiştirmeler (her kat için) sönümleyicili sisteme göre daha fazladır. Sönümleyicili sistemde gevşek kum zemin için; 5. katta 0,09 m mertebelerine ulaşan deplasman 1. katta 0,03 m civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü, sistemde ise yine gevşek kum zemin için deplasman; 5. katta yaklaşık 0,3 m de pik değerine ulaşılırken 1. katta 0,08 m civarındadır.

Sönümleyici kullanılan sistemde zemin sıkılığına bağlı olarak deplasman 1. ve 2. katlarda benzerken 3. kattan sonra sıkılık gevşek kum zemin için artış gösterirken, orta sıkı ve sıkı kum zemin için benzer değerleri almıştır. Doğal sönümlü sistemde 2. katta eşitlenen deplasman miktarı üst katlara çıkıldıkça orta sıkı kum ile sıkı kum arasında deplasman artışında ters ilişki gözlenmiştir (Şekil 7.18 a-b).

Gevşek kum zemin için 7,5-12,5 m/s^2 aralığında değişen ivme değeri, sönümleyicili sistemde sıkı kum zemin için; 5. katta 16,5 m/s^2 mertebelerine ulaşan ivme 1. katta 2,8 m/s^2 civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü, sistemde ise yine sıkı kum

zemin için ivme; 5. katta yaklaşık 21 m/s^2' de pik değerine ulaşılırken 1. katta 14,5 m/s^2 civarındadır.

Sönümleyici kullanılan sistemde zemin sıkılığına bağlı olarak ivme; 3. katta gevşek, orta sıkı ve sıkı kum için yakın değerler almış, 2. katta gevşek kum zemin profiline sahip zeminde ivme değerleri orta sıkı ve sıkı kum zemin profiline sahip olanlara göre daha büyük değerlerdedir (Şekil 7.18 c-d).

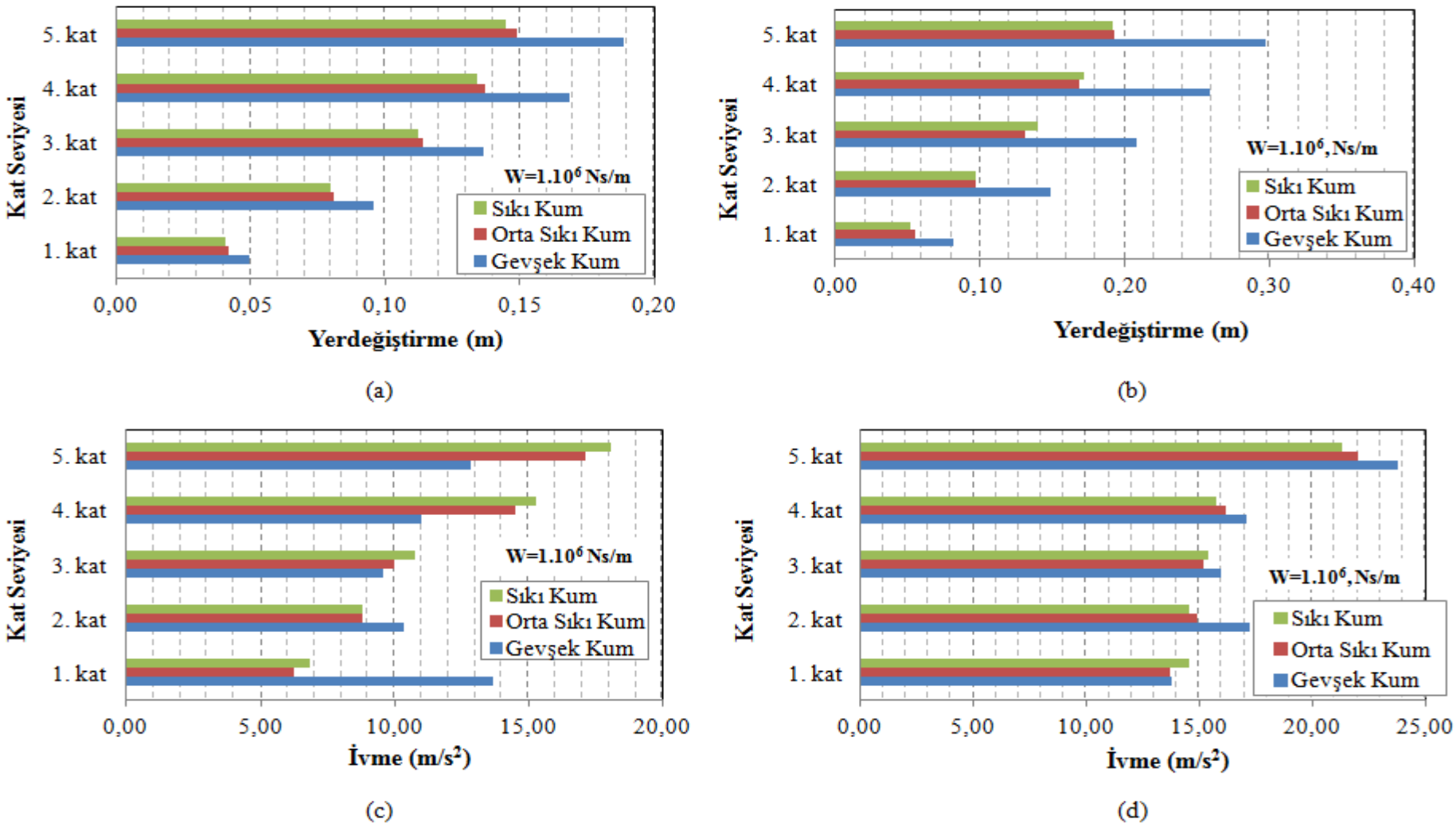
Şekil 7. 19 (a) ve (b)' de sırasıyla, $W=15.10^7$ Ns/m lik sönüm seviyesinde, sönümleyicili ve sönümleyicisiz analizden; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin şartlarında her kat için toplam yerdeğiştirmeler birbiri ile karşılaştırılmıştır. Sönümleyicisiz sistemde toplam yerdeğiştirmeler (her kat için) sönümleyicili sisteme göre daha fazladır. Sönümleyicili sistemde gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zeminler için; toplam yerdeğiştirme değerleri 1., 2., ve 3. katlarda benzerlik gösterirken, 4. ve 5. katlarda orta sıkı ve sıkı kum zemin profiline sahip sistemler gevşek kuma göre göre daha az deplasman yapmıştır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü, sistemde ise gevşek kum zemin için deplasman; 5. katta yaklaşık 0,3 m de pik değerine ulaşılırken 1. katta 0,08 m civarındadır.

Sönümleyici kullanılan sistemde zemin sıkılığına bağlı olarak deplasman 1., 2. ve 3. Katlarda orta sıkı ve sıkı kum zemin için yakın değerleri alırken, 3. kattan sonra ciddi bir artış gözlemleniyor. Doğal sönümlü sistemde 2. katta eşitlenen deplasman miktarı üst katlara çıkıldıkça orta sıkı kum ile sıkı kum arasında deplasman artışında ters ilişki gözlenmiştir (Şekil 7.19 a-b).

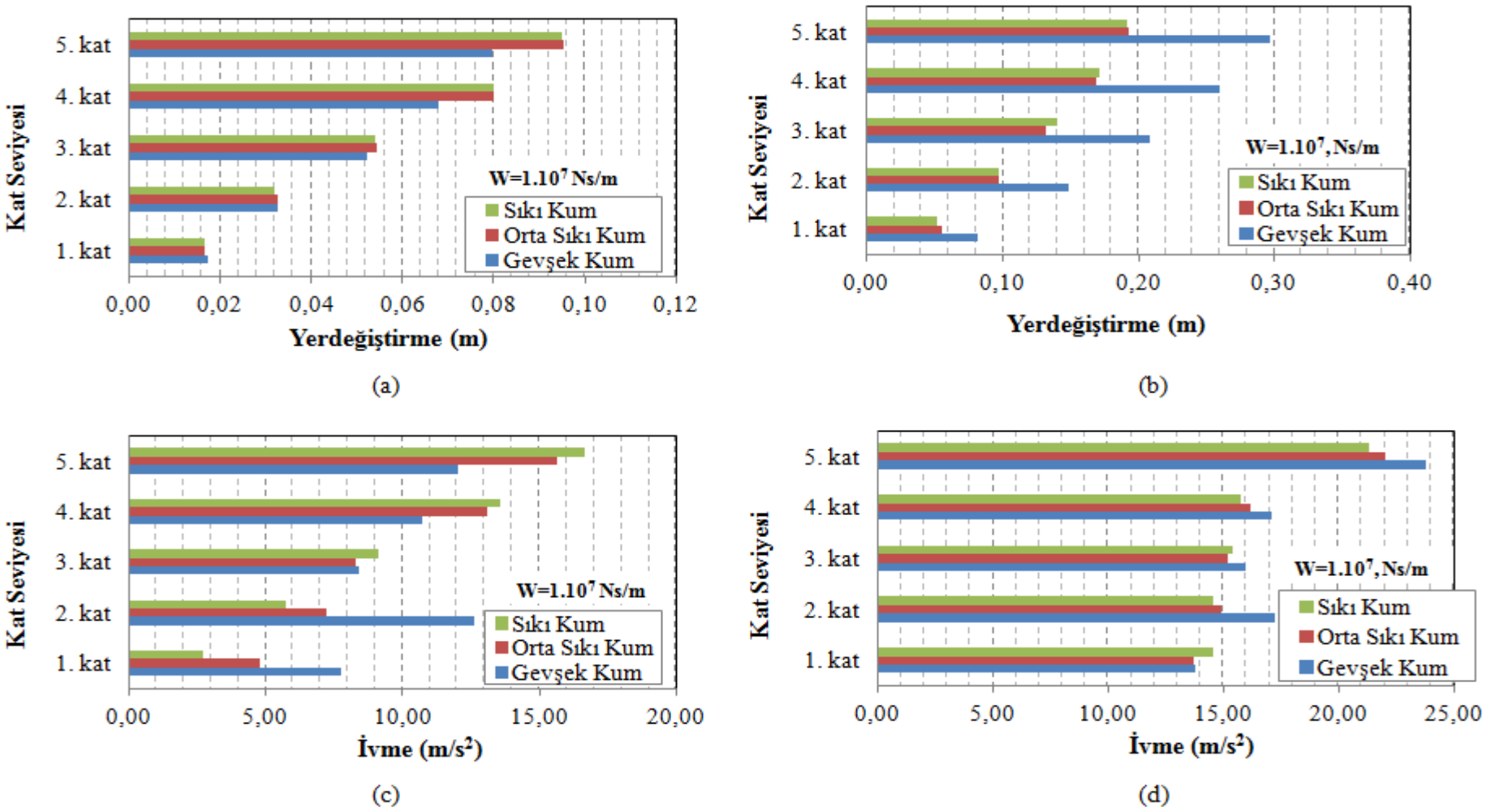
Gevşek kum zemin için 7,5-12 m/s^2 aralığında değişen ivme değeri, sönümleyicili sistemde sıkı kum zemin için; 5. katta 20,5 m/s^2 mertebelerine ulaşan ivme 1. katta 3 m/s^2 civarındadır. Sönümleyicisiz (doğal sönümlü) sistemde ise sıkı kum zemin için ivme; 5. katta yaklaşık 21 m/s^2 de pik değerine ulaşılırken 1. katta 14,5 m/s^2 civarındadır.

Sönümleyici kullanılan sistemde zemin sıkılığına bağlı olarak ivme; 4. katta gevşek, orta sıkı ve sıkı kum için yakın değerler almış, diğer katlarda her sıkılık için değişik değerlerde ivme okunmaktadır. Bu değerler 1. ve 2. katta sıkılık arttıkça azalırken 3.

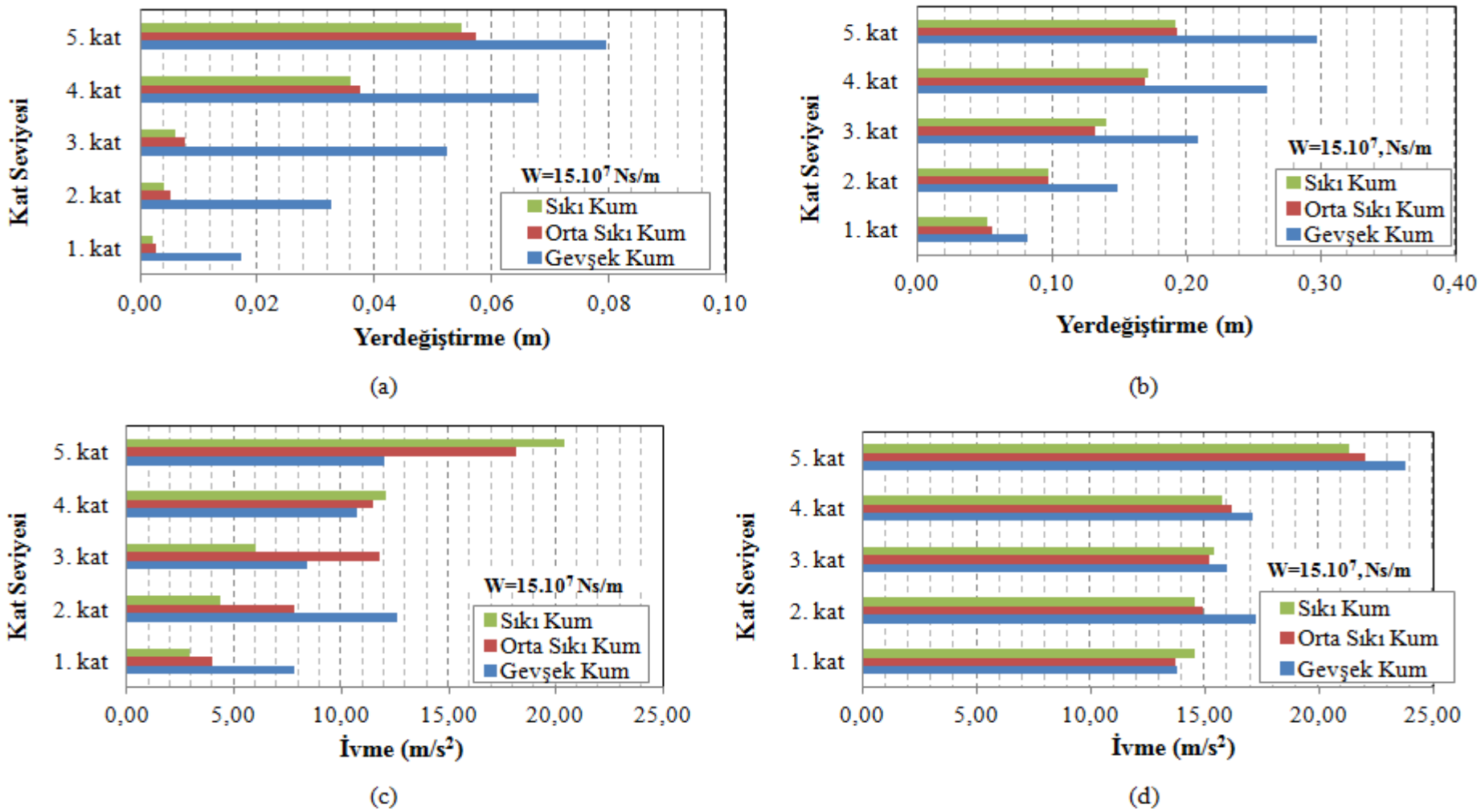
katta orta sıkı kum zemin profiline sahip sistem ivme değeri diğer zemin profillerine göre (3. kat için) ciddi artış göstermiştir. 4. ve 5. katlarda eğilim tek tarafa yönelmiş sıkılığın artmasıyla ivme değeri de artış göstermiştir (Şekil 7.19 c-d).



Şekil 7.17. Zemin sınıfına ve toplam sönüm katsayılarına göre optimum sönümleyici dağılımı



Şekil 7.18. Zemin sınıfına ve toplam sönüm katsayılarına göre optimum sönümleyici dağılımı



Şekil 7.19. Zemin sınıfına ve toplam sönüm katsayılarına göre optimum sönümleyici dağılımı

BÖLÜM VIII

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmasında kayma çerçevelerinde optimum sönümleyici dağılımı için Takewaki (2000) tarafından gösterilen Steepest Direction Search Algoritması kullanılmış ve zemin-yapı etkileşim problemi modellenerek sönümleyici dağılımı üzerinde zemin sıkılığının etkisi ile ayrıca toplam sönüm katsayısı W (katlara optimum olarak dağıtılmıştır) değiştirilerek zeminin sıkılığının optimum sönümleyici dağılımına etkileri incelenmiş, yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Görülmüştür ki, diğer tüm şartlar eşit tutulduğunda (m, I_R, W, vb.) zemin sıkılığı değiştirildikçe sönüm katsayısının katlara dağılımı değişmektedir.

- Orta sıkı kum ve sıkı kum zemin cinsleri için optimum sönümleyici dağılımı benzerlik gösterirken; gevşek kum zemin için sonuçlar, orta sıkı ve sıkı kum zemin için elde edilen sonuçlardan farklılık göstermektedir.

- Sönümleyicisiz sisteme göre, sönümleyicili sistemde daha az deplasman ve ivme oluşmaktadır. Ayrıca toplam sönüm katsayısındaki artış bu yapısal davranışları daha da küçültmektedir.

- Optimizasyon problemi frekans tanım alanında yapılmış zaman tanım alanında deprem analizleri ile bulunan sönümleyici tasarımları karşılaştırılmıştır.

- Zeminin sıkı olması ve orta sıkı olması durumlarında yerdeğiştirmeler ve ivmeler beklendiği gibi gevşek kumlu duruma göre daha az olmaktadır.

- Orta sıkı ve sıkı kum durumları sönümleyicilerin dağılımı açısından bir birlerine yakın sonuç verirken, gevşek kum olması durumunda sönümleyicilerin dağılımı değişmekte ve daha fazla kata yerleştirilmektedir.

- Literatürdeki çalışmalarda, sönümleyici dağılımı problemleri genellikle zemine rijit bağlanan yapılar (sadece üst yapı) incelenmiştir. Bu çalışma ile sönümleyici dağılımı probleminde zemin parametrelerinin etkisi ortaya koyulmuştur.

- Deprem etkisindeki yapıların tasarımında (sönümleyici tasarımı) üst yapı ile alt yapının bir arada düşünülmesi gerekliliği bir daha ortaya çıkarılmıştır.

KAYNAKLAR

Aiken, I.D., Kelly, M., "Earthquake Simulator Testing and Analytical Studies of Two Energy-Absorbing Systems For Multistory Structures", Report No: UCB/EERC-90/03, ***University of California,*** Berkeley, U.S.A., 1990.

Airey, D. W. and Wood, D. M., "An evaluation of direct simple shear tests on clay", ***Geotechnique*** 37, 25-35, 1987.

Ala, N., "Adapazarı Zemininde Yapılan Betonarme Yapılarda Zemin –Yapı Etkileşimi", ***Sakarya***, 2007.

Al Hai & Al Mukaddam For Geotechnıcal Works L.L.C. (Aham), "Soil Investigation, Ps Suspension Logging Test (Shear Wave Velocity)", http://www.ahamgeo.com/suspension-logging-test.html, 18 Mayıs 2014.

Alli, H. ve Calayır, Y., "Yapıların Sismik İzolasyonunda Kayan Modlu Aktif Kontrol Yöntemi", ***DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*** 4(3), 45-56, 2002.

Aydın, E., "Yarı Rijit Birleşimli Yapıların Viskoz Sönümleyicilerle Optimizasyonu", ***İTÜ***, 2001.

Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowsky, M., Marcetti, S., and Pasquelini, E., Flat dilatometer tests in calibration chambers, ***Proceedings, In Situ '86, Geotechnical special publication6***, ASCE, New York, 1986.

Bellotti, R., Bruzzi, D., Superbo, S., Battaglio, M. and Jamiolkowsky, M., "Seismic cone in Po River sand", ***Penetration Testing 1988, ISOPT-1 Syposium***, Orlando, Florida, sayı: 2 s. 643-650, 1988.

Boulanger, R. W., Chan, C. K., Seed, H. B., Seed, R. B. and Sousa, J., "A low-compliance bi-directional cyclic simple shear apparatus", ***Geotechnical Testing Journal*** 16, s. 36-45, 1993.

Brennan, A.J., Thusyanthan, N.I., and Madabhushi, S.P.G., "Evaluation of Shear Modulus and Damping in Dynamic Centrifuge Tests", ***Cambridge University***, 2004.

Byrne, P.M., "A model for predicting liquefaction induced displacement, Proceedings", ***2 nd international conferance on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil Dynamics***, St. Louis, Missouri, 1991.

Cao, X., Mlejnek, H. P., "Computational Prediction and Redesign for Visco-elastically Damped Structures", ***Computer Metods Applied Mech. Eng.***125, s. 1-16, 1995.

DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönerge, 2007.

De Silva, C. W., "An algorithm for The Optimal Design of Passive Vibration Controllers for Fleksible Systems", ***J. Sound Vib.*** 75 (4), s. 495-502, 1981.

Düzel, E., "Düşeyde Rijitlik Düzensizliği Bulunan Çerçevelerin Sönüm Elemanları ve Çelik Çaprazlar İle Rehabilitasyonu", ***Niğde Üniversitesi***, 2010.

Engin, Y., "Akıllı Binalar", ***THBB Teknik Ofis***, 2007.

EPRI, "Seismic hazard methodology for the central and eastern United States", ***Report NP-4726, Electric Power Research Institute***, Palo Alto, California, 1986.

EPRI, "Guidelines for determining design basis ground motions", ***Electric Power Research Institute***, Palo Alto, California 1, 8, 1993.

Ercan, E., Nuhoğlu, A., "Taban izolatörlü ve pasif enerji sönümleyicili yapıların dinamik davranışı", ***Deprem Sempozyumu***, 2005.

GERB Vibration Control Systems, “Building Isolation, GERB Spring Systems for Building Vibration Control”, http://www.gerb.com/en/arbeitsgebiete/arbeitsgebiete.php?ID=99, 22 Mayıs 2014.

Goulois, A. M., Whitman, R. V. and Hoeg, K., “Effect of sustained shear stres on the cyclic degradation of clay”, ***Proceedings, Symposium on Strength Testing of Marine Sediments***, ASTM, Philadelphia, s.336-351.

Gucunski, N. and Woods, R. D., “Use of Rayleigh modes in interpretation of SASW test”, ***Proceedings, 2nd International conferance on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil Dynamics***, Missouri 2, 1399-1408, 1991.

Gugoze, M., Muller, P. C., “Optimal position of dampers in multi body systems”, ***J. Soun of Vib.***158(3), 517-530, 1992.

Hahn, G. D. and Sathiavageeswara, K. R., “Effects of added-damper distribution on the seismic Response of Building”, ***Comp. Struct.*** 43(5), 941-950, 1992.

Hazırbaba, K., “Pore pressure generation characteristics of sands and silty sands: A strain approach”, ***The University of Texas at Austin***, USA, 2005.

Hryciw, R.D., “Small-strain-shear modulus of soil by dilatometer”, ***Journal of geotecnical engineering***, ASCE, 1990.

Hoar, R. J. and Stokoe, K. H., “Field and laboratory measurements of material damping of soil in shear”, ***Proceedings, 8th World Conferance on Eathquake Engineering***, San Francisco 3, 47-54, 1984.

Imai, T. and Tonouchi, K., “Correlation of N-Value with s-wave velocity and shear modulus”, ***Proceedings, 2nd European Symposium on Penetration Testing***, Amsterdam, 1982.

Imai, T. and Yoshimura, Y., “Elastic wave velocity and Soil Properties in Soft soil”, Tsuchi-to-Kiso, Japan, 1970.

Imai, T., Fumoto, H. and Yokota, K., "P ve S wave velocities in subsurface layer of ground in Japan", ***OYO Tecnical Note, TN-14, Urawa Research Instiute, OYO Corporation***,Tokyo, Japan, 1976.

Imai, T., "P and S wave velocities of the ground in Japan", ***Proceedings of the 9th International Conferance on Soil Mechanics and Foundation Engineering***, Tokyo, Japan, 1977.

İyisan, R., "Zeminlerde kayma dalga hızı ile penetrasyon deney sonuçları arasındaki bağıntılar", ***İMO Teknik Dergi***, 1187-1199, 1996.

İyisan, R., Özçimen, N. ve Ansal, A., "Dinamik zemin özelliklerini belirlemede arazi ölçümlerine dayanan korelasyonlar", ***Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi,*** İTÜ, İstanbul, 409-416, 2000.

Kramer, S.L., Geoteknik deprem mühendisliği, Çeviri Editörü, ***Kayabalı, K.***, Ankara , 2003.

Karabörk, T., "Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Betonarme Yapıların Doğrusal Olmayan 3 Boyutlu Dinamik Analizi", ***Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*** 5(1), 25-36, 2009.

Koçak, S. ve Mengi, Y., "Bir Basit Üç Boyutlu Zemin-Yapı Etkileşimi Modeli", ***İMO Teknik Dergi,*** 1111-1130, 1996.

Lawrence, F. V. JR., "Propagation velocity of ultrasonic waves through sand", ***MIT Research Report R63-8, Massachusetts Insitute of Tecnology***, Cambridge, Massachusetts, 1963.

Lee, K., L., and Focth, J., A., "Strength of clay subjected to cylic loading", ***Marine Geotechnology*** 1, 3, 1976.

Liao, S. S. C., Veneziano, D. and Whitman, R. V., “Regression models for evaluating liquefaction probablity”, ***Journal of Geotechnical Engineering***, ASCE 114, 389-411, 1988.

Masri, S. F., Bekey, G. A. and Caughey, T. K., “Optimum Pulse Control of Fleksible Structure”, ***J. Applied Mechanich***, ASCE 48, 619-626, 1981.

Mayne, P.W. and Rix, G.J., “G_{max}-q_c relationship for clays”, ***Geotechnical testing journal***, ASTM, 1993.

Mayne, P.W. and Rix, G.J., “Correlations between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays”, ***Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering***, 1995.

Mayne, P. W., “Stress-Strain-Strength-Flow Parameters from Enhanced In Situ Tests”, ***Proceedings of the International Conference on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories***, Bali, Indonesia, 27-48, 2001.

Miller, G. F., and Pursey, H., “On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid”, ***Proceedings of the royal society***, A-233, 55-69, 1955.

Mok, Y. J., Sanchez-Salinero, I., Stokow, K. H. and Roesset, J. M., “In situ damping measurements by crosshole seismic method”, ***Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II: Recent Advances in Ground Motion Evaluation, Geotechnical special publication 20***, ASCE, New York, 305-320, 1988.

Nigbor, R. L. and Imai, T., “The suspension P-S velocity logging method”, ***Geophysical Characterisation of Sites***, Rotterdam, 57-61, 1994.

O’Reilly, M. P., “Cyclic load testing of soils”, ***in M. P. O’Reilly and S.F. Brown, eds., Cyclic Loading of Soils***, Blackie, London, 70-121, 1991.

Ohta, Y. and Goto, N., “Estimation of s-wave velocity in terms of characteristic indices of soil”, ***Butsuri-Tanko***, 1976.

Ohta, Y. and Goto, N., “Emprical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes”, ***Earthqake Engineering and Structural Dynamics***, 167-187, 1978.

Okamoto, T., Kokusho, T., Yoshida, Y. and Ksunoki, K., “Comparison of surface vs subsurface wave source for P-S logging in sand layer”, ***Proceedings of the 44th Annual Conferance***, Japanese Society of Civil Engineering 3, 996-997, 1989.

Onur, M. İ., “Dinamik etkiler altında zemin deformasyonun incelenmesi”, ***Anadolu Üniversitesi***, 2007.

Özaydın, K., Zemin Dinamiği, ***İTÜ*** 1982.

Pall, S., Marsch C., “Response of Friction Damped Braced Frames”, ***J: Struc. Engrg.,*** ASCE, 108(6), 1313-1323, 1982.

Parmele, R.A., “The influence of foundation parameterson the seismic response of interaction systems”, ***Proceedings of the 3rdJapan EarthquakeEngineering Symposium***, 1970.

Pyke, R. M., “Settlement and liquefaction of sands under multi-directional loading”, ***PhD Dissertation, Universty of California***, Berkeley, 1973.

Redpath, B. B., “Seismic refraction exploration for engineering site investigations”, Technical report E-73-4, ***Explosive Excavation Research Laboratory***, California, s. 55, 1973.

Redpath, B. B., Edwards, R. B., Hale, R. J. and Kintzer, F. Z., “Development of field techniques to measure damping values for near-surface rocks and soils”, ***Report URS/John A. Blume and Associates***, San Francisco, s. 120, 1982.

Redpath, B. B. and Lee, R. C., “In situ measurements of shear wave attenuation at a strong motion recording site”, ***Report U.S. Geological Survey Contract 14-08-001-21823, URS/John A. Blume and Associates***, San Francisco, 1986.

Richart, F. E., Hall, J. R. and Woods, R. D., “Vibrations of soils and foundations”, Prentice Hall, ***Englewood Cliffs***, New Jersey, s. 401, 1970.

Rix, G.J. and Stokoe, K.H., “Correlation of initial tangent modulus and cone penetration resistance”, Calibration Chamber Testing, International Symposium on calibration Chamber testing, A.B. Huang, ed., ***Elsevier publishing***, New York, 1991.

Sawangsuriya, A., Bosscher, P. J., and Edil, T. B., “Alternative testing techniques formodulus of pavement bases and subgrades”, ***Proceedings of the 13th Annual Great Lakes Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Conference***, ASCE, Milwaukee, s. 108-121.

Schwarz, S. D. and Musser, J. M., J. R., “Various tecniques for making in situ shear wave velocity measurements-a description and evaluation”, ***Proceedings, International Conferance on Microzonation***, Washington 2, s. 594-608, 1972.

Seed, H.B. and De Alba, P., “Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of soils”, ***Proceedings***, Insitu’86, ASCE, 1986.

Sherif, M. A., Ishibashi, I. and Lee, C. D., “Earth pressure against rigid retainning walls”, ***Journal of the Geotechnical Engineering Division***, ASCE 108, 679-695.

Takewaki, İ., “Optimal Damper Placement for Minumum Transfer Functions”, ***Earthquake Engineerin and Struct.*** 26, 1113-1124, 1997.

Takewaki, İ., “Optimal Damper Position in Beams for Minumum Dynamic Compliance”, ***Comp. Methods & Applied Mechanic Engineering*** 156(1-4), 363-373, 1998.

Takewaki, İ., Uetani, K., “Optimal Damper Placement for Building Structure Icluding Surface Ground Amplification”, ***Procc. 13th ASCE Engineerin Mechanics Division Specialty Conf.***, Baltimore, 1999.

Takewaki, İ., “Displacement-Acceleration Control Via Stiffness-Dampin Collaboration”, ***Earthquake Engineering and Struct.*** 28, 1567-1585, 1999.

Takewaki, İ., “İnverse Stifness Design of Shear-Flexural Building Models in Including Soil-Structure İnteraction”, ***Engineering Structures*** 2, 1045-1054, 1999.

Takewaki, İ., “Soil-Structure Random Response Reduction Via TMD-VD Simultaneous Use”, ***Comp. Metods. Apl. Mech. Eng*** 190, 677-690, 2000.

Takewaki, İ., “Optimal damper placement for planar building frames using transfer functions”, ***Struct Multidisc Optim*** 20, 280–287 , 2000.

Takewaki, İ., “Soil-Structure Random Response Reduction Via TMD-VD Simultaneous Use”, ***Comp. Metods. Apl. Mech. Eng.*** 190, 677-690, 2000.

T.C. M.E.B., İnşaat Teknolojisi, Deprem İzolatör Sistemleri 440FB0005, ***Ankara***, 2011.

Tsuji, M., Nakamura, T., “Optimum Viscous Dampers for Stiffness Design of Shear Buildings”, ***Struct. Des. Of Tall Buildings*** 5, 217-234, 1996.

Toğrol, E. ve Sivrikaya, O., Arazi Deneyleri ve Geoteknik Tasarımda Kullanımları, ***Birsen Yanınevi***, İstanbul, 2009.

U.S. Geological Survey Professional Paper, 1360. Sayı

Vucetic, M. and Dobry, R., “Effecet of Soil Plasticity on Cyclic Response”, ***Journal of Geotechnical Engineering***, ASCE 117, 89-107, 1991.

Ward, W. A., “Interpretation of CPT data for design of earth dams near Tehachapi-California”, ***Proceedings In situ’86, Blackburg, Virginia, Geotecnical Special Publication 6***, ASCE, New York, s. 1119-1133, 1986.

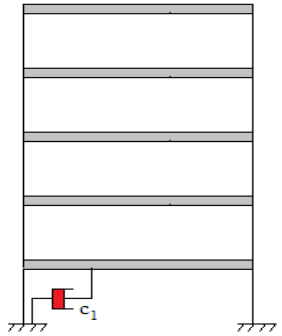
Youd, T. L., “Packing changes and liquefaction susceptibility”, ***Journal of the Geotechnical Engineering Division***, ASCE 103, 918-922, 1977.

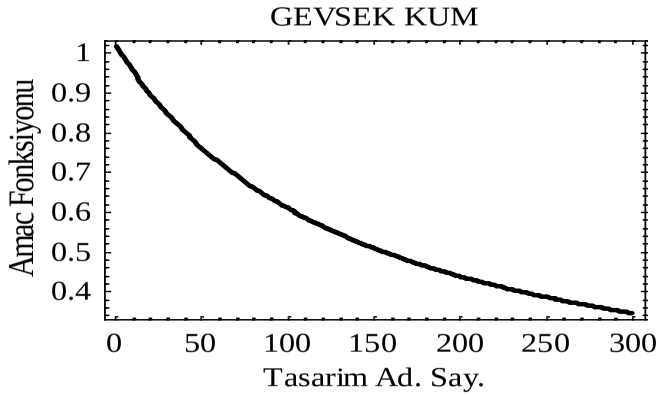
Zhang, R. H., Soong, T.T., “Seismic Design of Visco-elastic Dampers for Structural Aplication”, ***J. Structural Engineering,*** ASCE 118(5), 1375-1392, 1992.

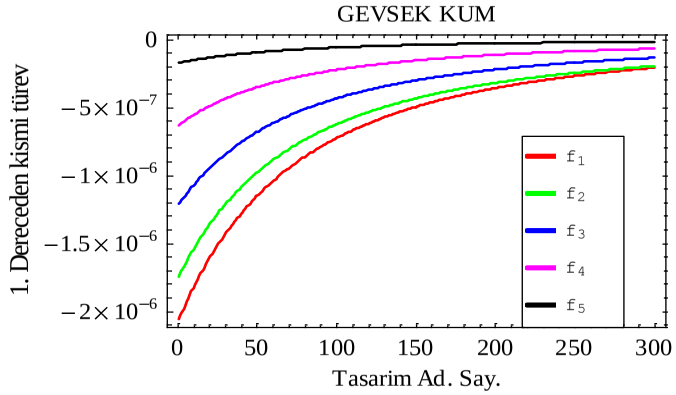
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları

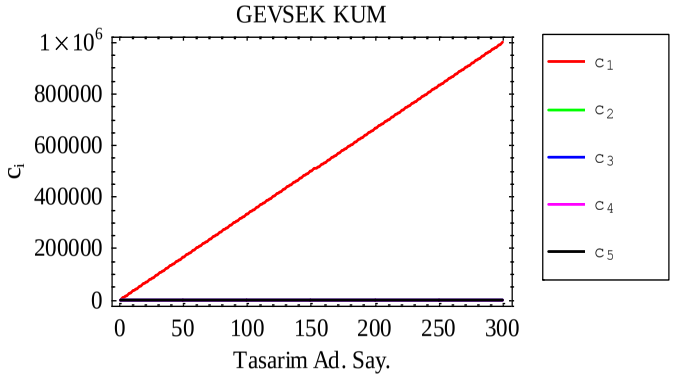
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları

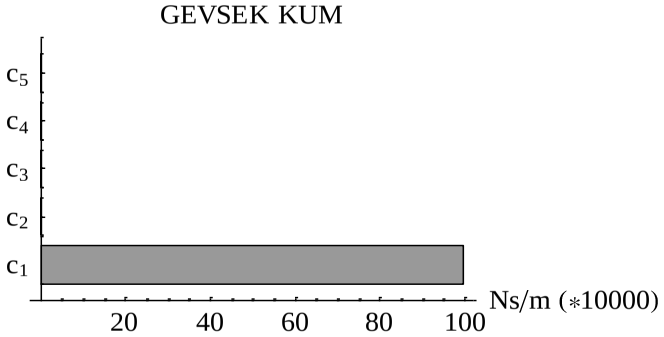
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		GEVŞEK KUM (ν=0,25 v_s=150 m/s ρ=1450 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 1.10^6 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,840835	7,47256	
0,266028	23,6185	
0,167287	37,5593	
0,129776	48,4155	
0,113508	55,3545	
0,0607409	103,442	
1,2812E-9	4,90413E9	





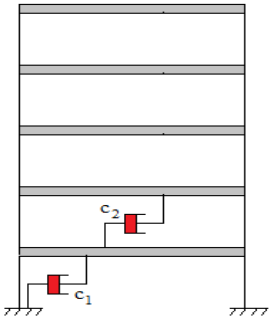


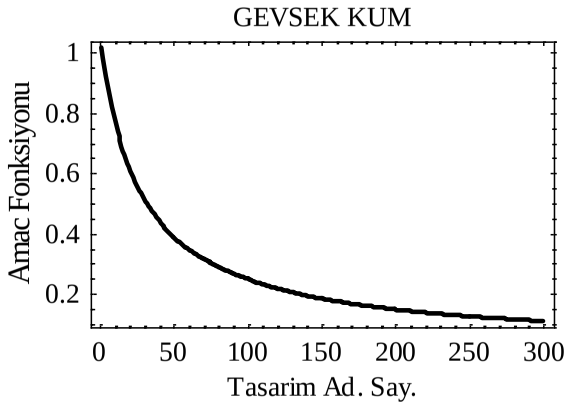


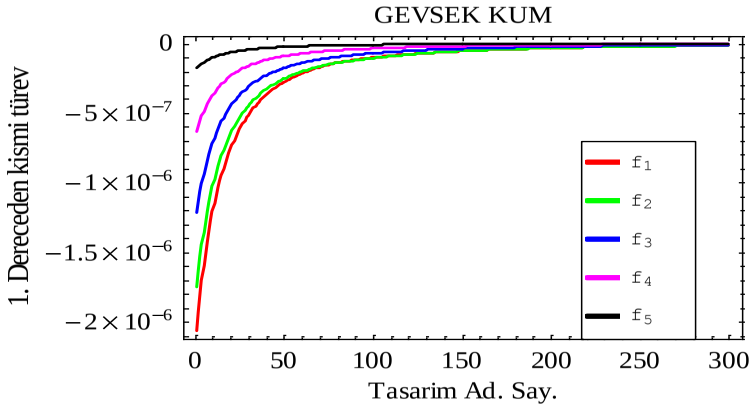


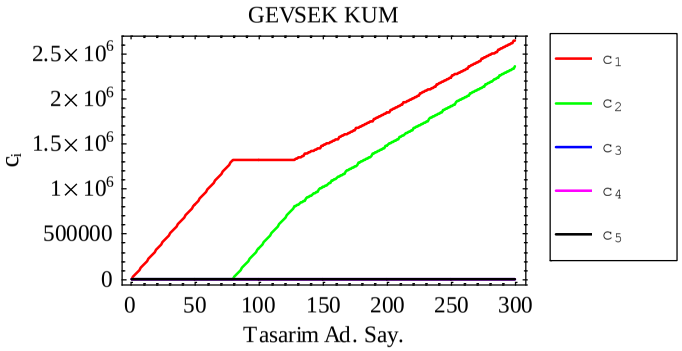
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

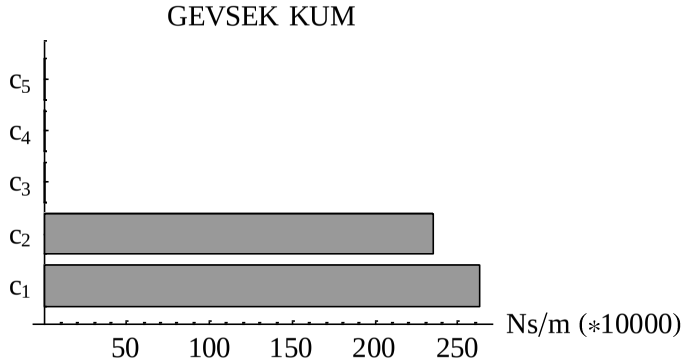
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		GEVŞEK KUM (ν=0,25 v_s=150 m/s ρ=1450 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 5.10^6 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,840835	7,47256	
0,266028	23,6185	
0,167287	37,5593	
0,129776	48,4155	
0,113508	55,3545	
0,0607409	103,442	
1,2812E-9	4,90413E9	







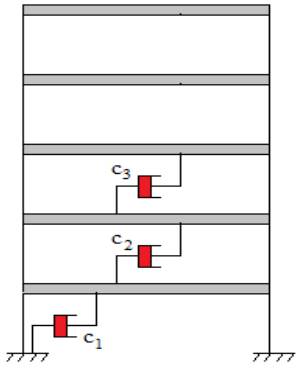


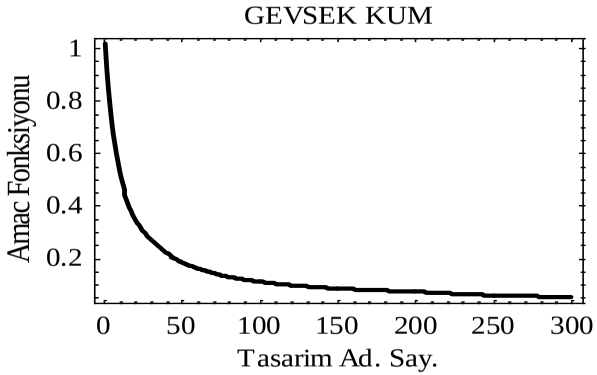


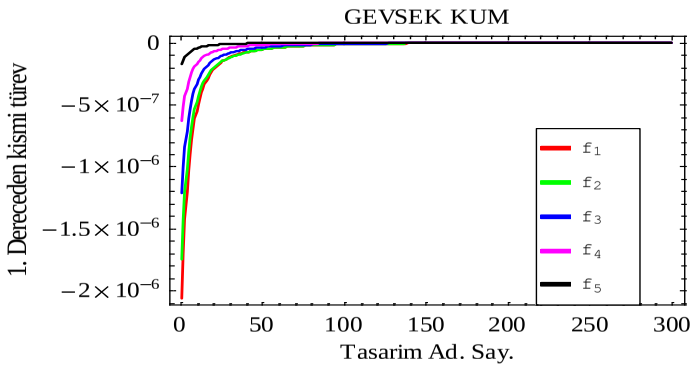
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

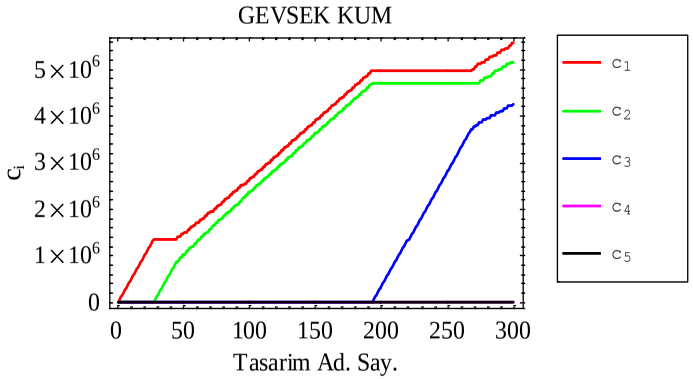
Zemin Cinsi	GEVŞEK KUM (ν=0,25 v_s=150 m/s ρ=1450 kg/m^3)
	($\sum c_i$=W) **W= 15.10^6 (Ns/m)** 'lik sönüm için

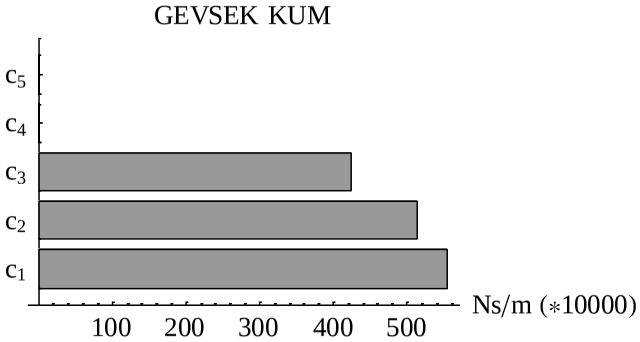
Periyot (s)	/ Frekans (1/s)
0,840835	7,47256
0,266028	23,6185
0,167287	37,5593
0,129776	48,4155
0,113508	55,3545
0,0607409	103,442
1,2812E-9	4,90413E9





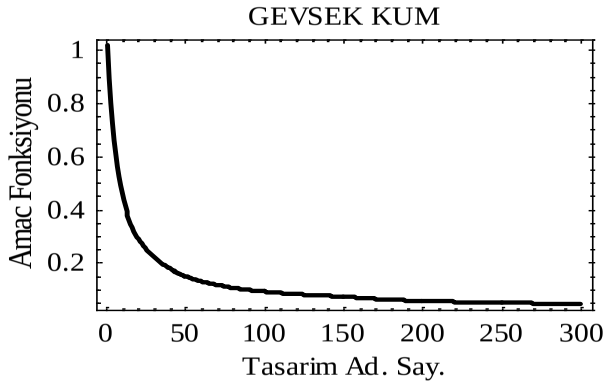


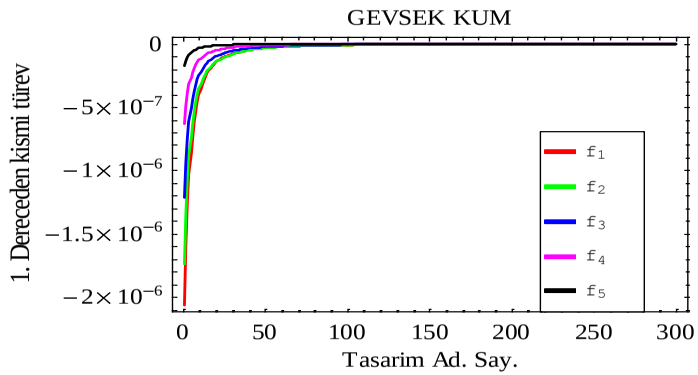


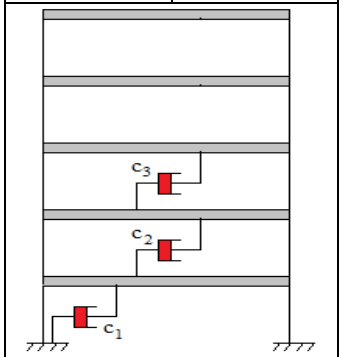


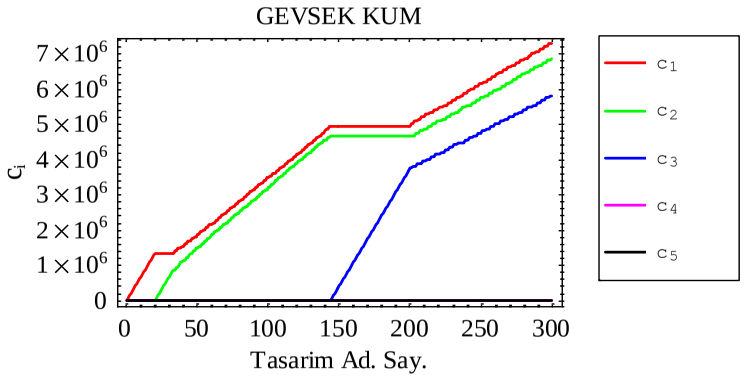
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

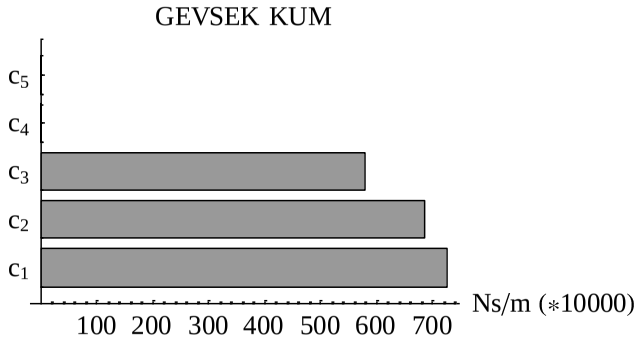
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		GEVŞEK KUM (ν=0,25 v_s=150 m/s ρ=1450 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 20.10^6 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,840835	7,47256	
0,266028	23,6185	
0,167287	37,5593	
0,129776	48,4155	
0,113508	55,3545	
0,0607409	103,442	
1,2812E-9	4,90413E9	





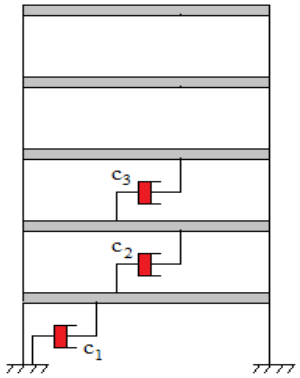


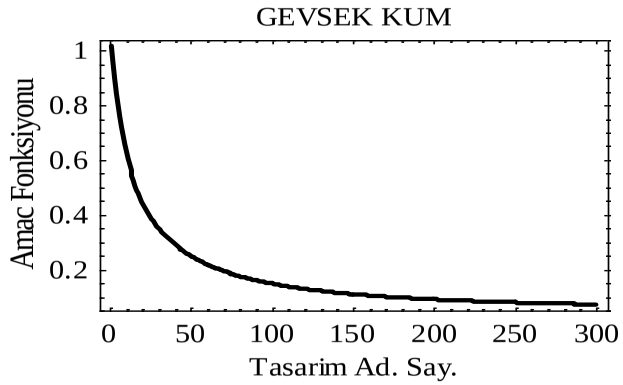


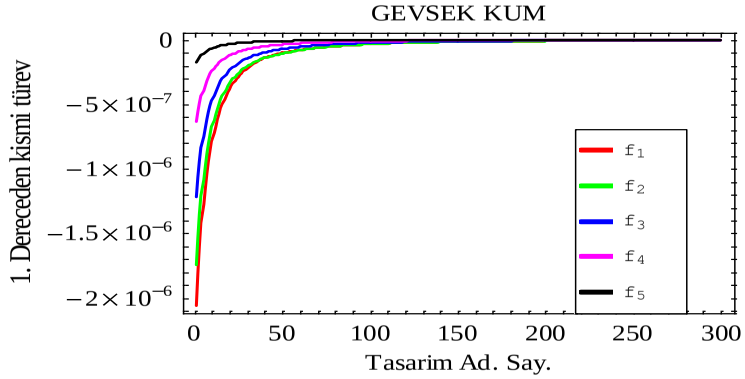


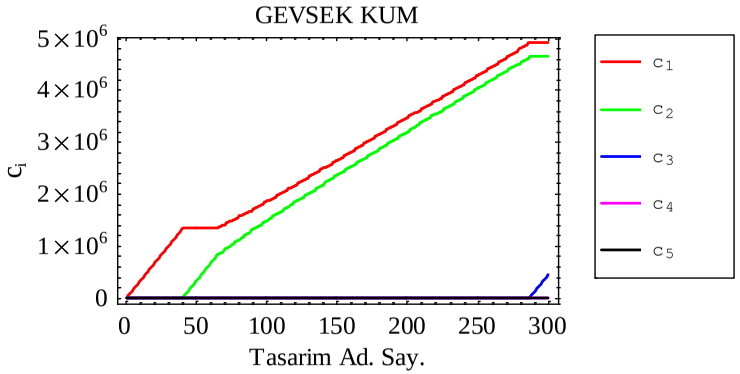
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

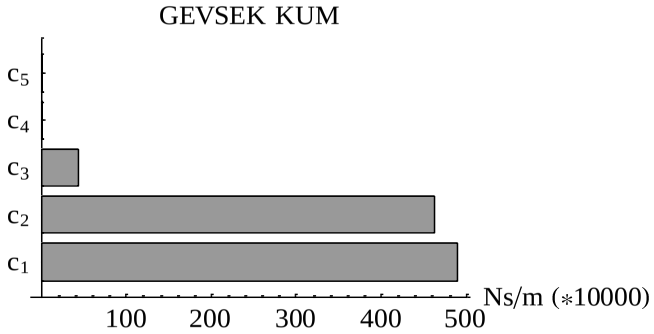
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		GEVŞEK KUM (ν=0,25 v_s=150 m/s ρ=1450 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 1.10^7 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,840835	7,47256	
0,266028	23,6185	
0,167287	37,5593	
0,129776	48,4155	
0,113508	55,3545	
0,0607409	103,442	
1,2812E-9	4,90413E9	





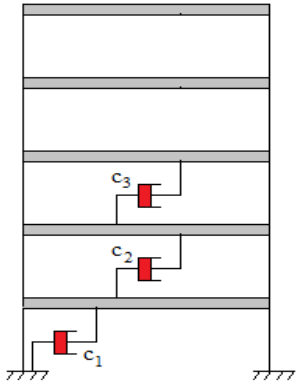


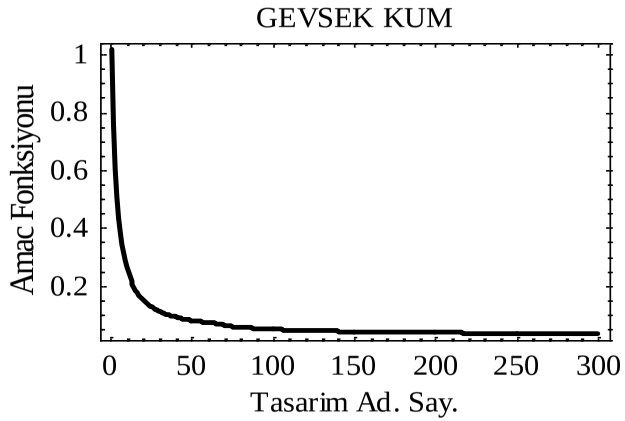


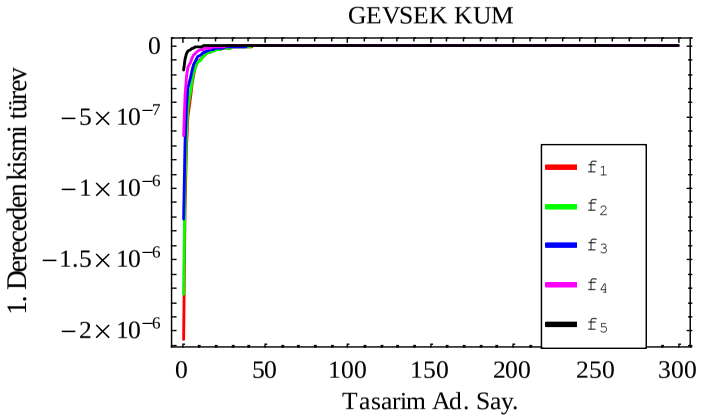


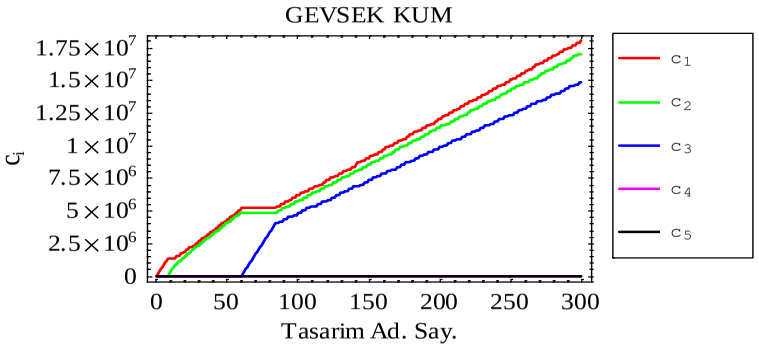
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

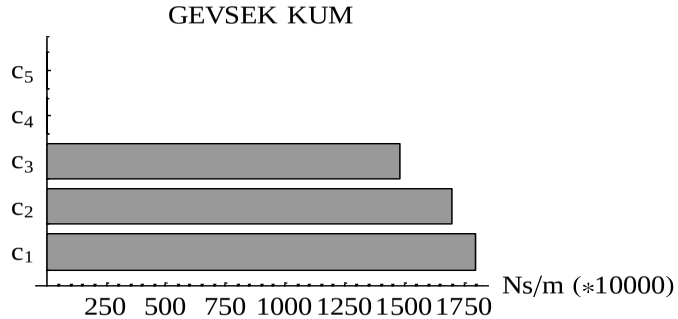
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		GEVŞEK KUM (ν=0,25 v_s=150 m/s ρ=1450 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 5.10^7 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,840835	7,47256	
0,266028	23,6185	
0,167287	37,5593	
0,129776	48,4155	
0,113508	55,3545	
0,0607409	103,442	
1,2812E-9	4,90413E9	







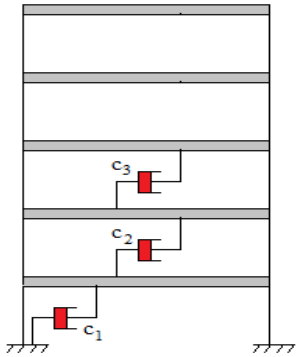


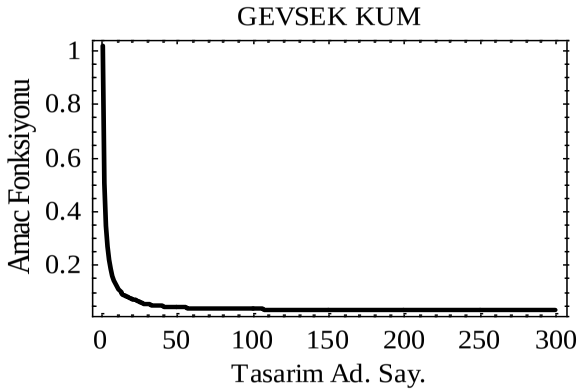


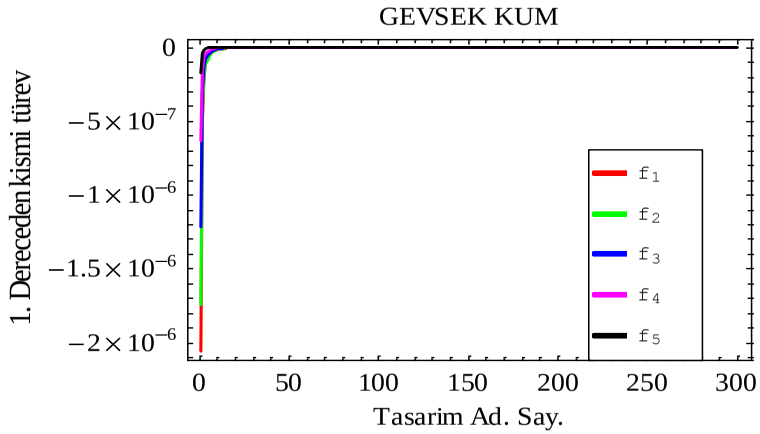
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

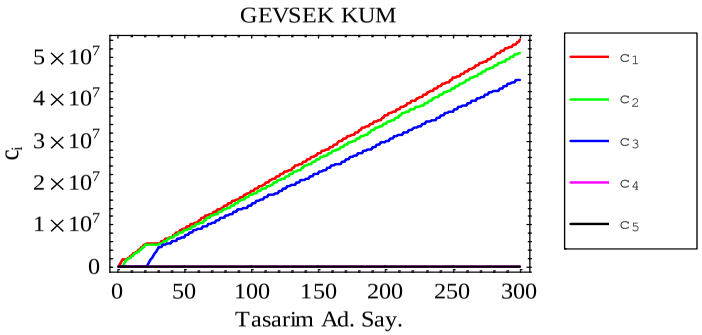
Zemin Cinsi	**GEVŞEK KUM** *(ν=0,25 v_s=150 m/s ρ=1450 kg/m^3)*
Periyot (s) / Frekans (1/s)	**($\sum c_i$=W)** **W= 15.10^7 (Ns/m)** 'lik sönüm için

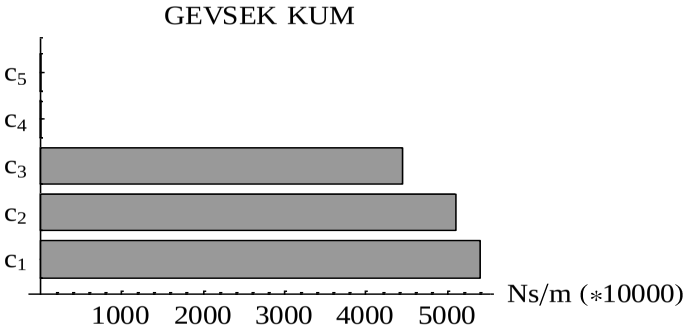
0,840835	7,47256
0,266028	23,6185
0,167287	37,5593
0,129776	48,4155
0,113508	55,3545
0,0607409	103,442
1,2812E-9	4,90413E9







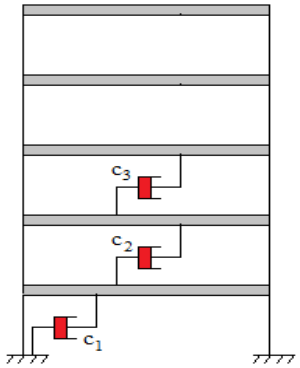


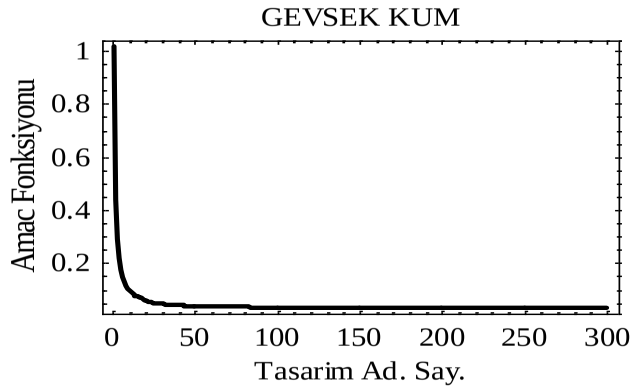


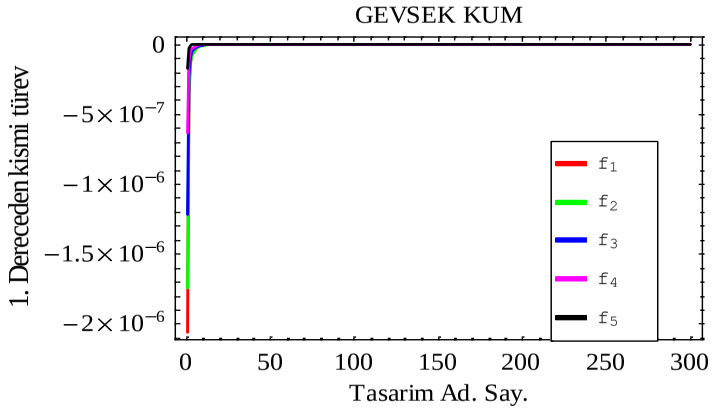
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

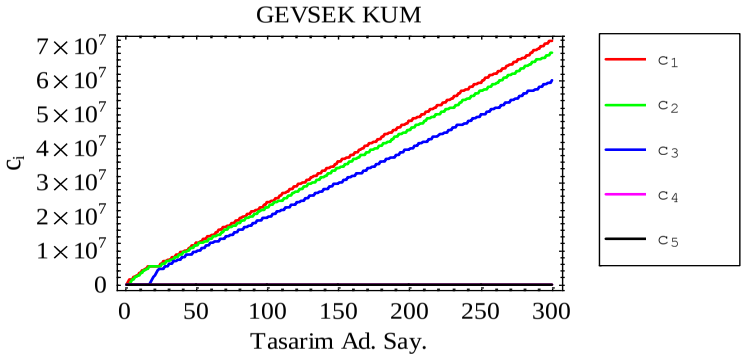
Zemin Cinsi	GEVŞEK KUM (ν=0,25 v_s=150 m/s ρ=1450 kg/m^3)
Periyot (s) / Frekans (1/s)	($\sum c_i$=W) W= 20.10^7 (Ns/m) 'lik sönüm için

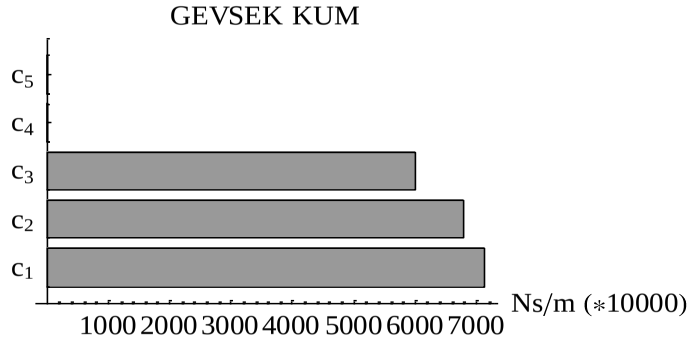
Periyot (s)	Frekans (1/s)
0,840835	7,47256
0,266028	23,6185
0,167287	37,5593
0,129776	48,4155
0,113508	55,3545
0,0607409	103,442
1,2812E-9	4,90413E9





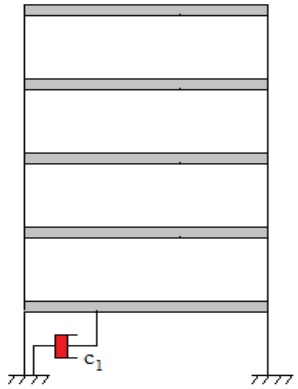


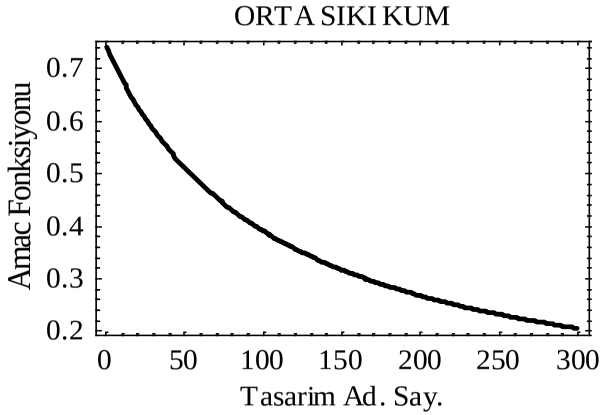


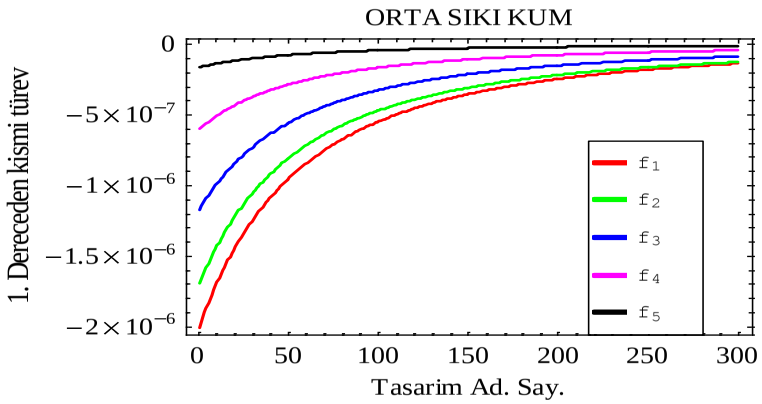


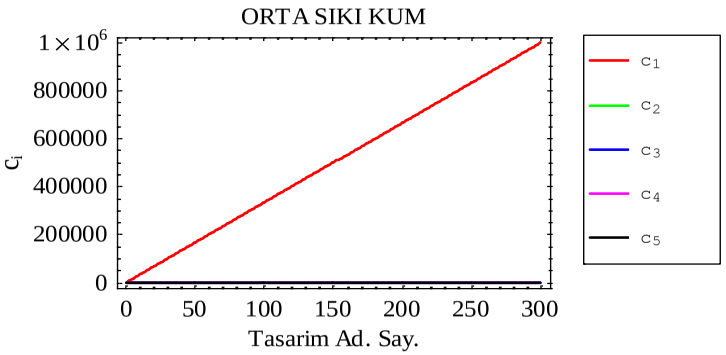
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

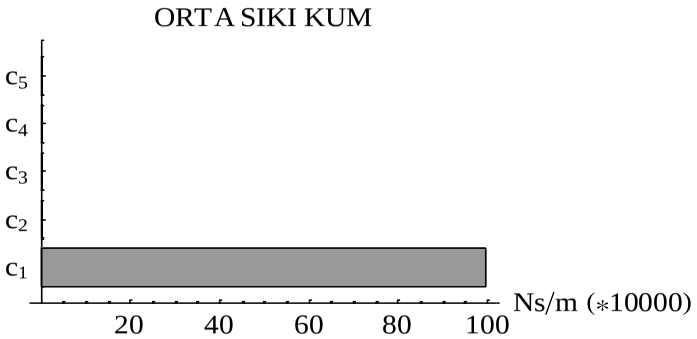
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		ORTA SIKI KUM (ν=0,3 v_s=300 m/s ρ=1650 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 1.10^6 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,780869	8,04641	
0,262843	23,9047	
0,166431	37,7526	
0,12945	48,5377	
0,113441	55,3871	
0,0297232	211,39	
3,01104E-9	2,08672E9	







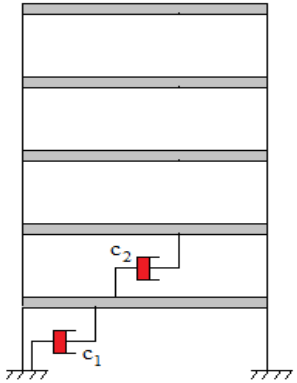


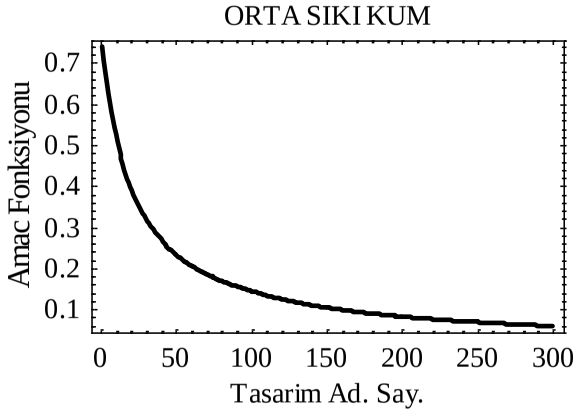


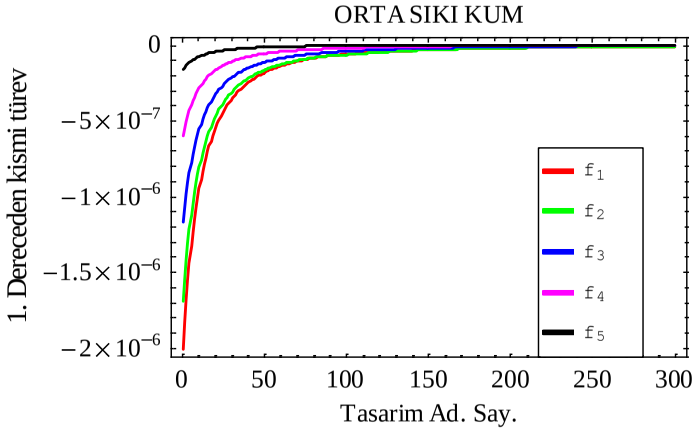
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

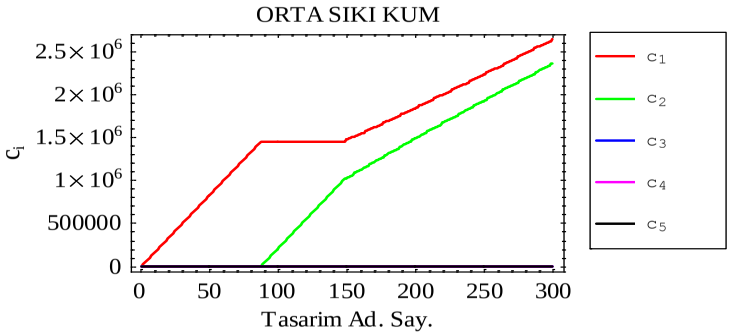
Zemin Cinsi	**ORTA SIKI KUM** (ν=0,3 v_s=300 m/s ρ=1650 kg/m^3)
Periyot (s) / Frekans (1/s)	**($\sum c_i$=W)** **W= 5.10^6 (Ns/m)** 'lik sönüm için

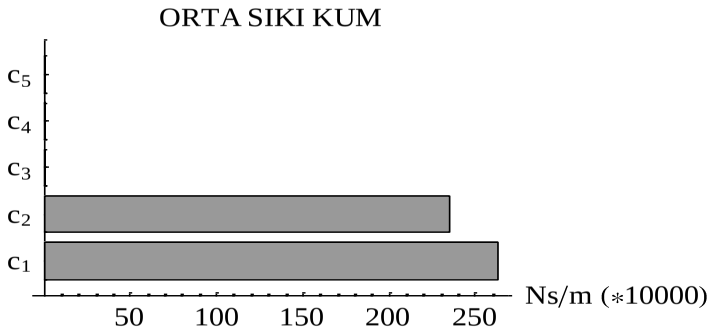
Periyot (s)	**Frekans (1/s)**
0,780869	8,04641
0,262843	23,9047
0,166431	37,7526
0,12945	48,5377
0,113441	55,3871
0,0297232	211,39
3,01104E-9	2,08672E9







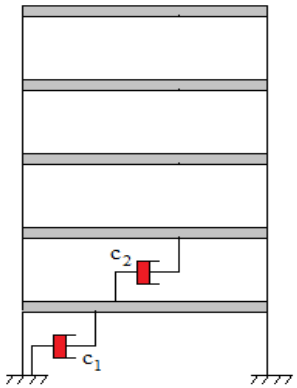


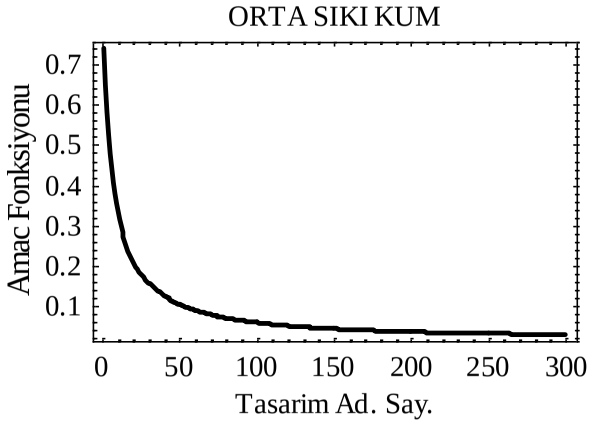


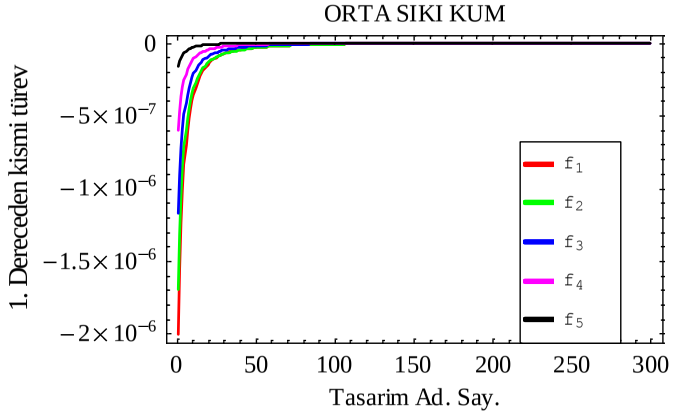
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

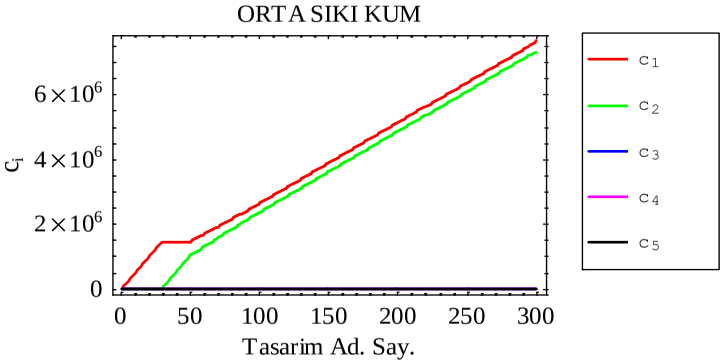
Zemin Cinsi	**ORTA SIKI KUM** *(ν=0,3 v_s=300 m/s ρ=1650 kg/m^3)*
Periyot (s) / Frekans (1/s)	**($\sum c_i$=W)** **W= 15.10^6 (Ns/m)** 'lik sönüm için

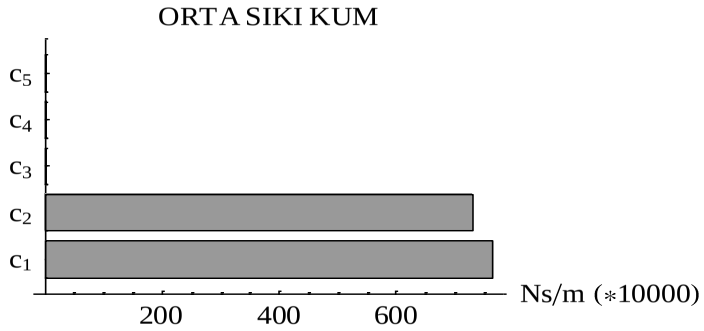
Periyot (s)	Frekans (1/s)
0,780869	8,04641
0,262843	23,9047
0,166431	37,7526
0,12945	48,5377
0,113441	55,3871
0,0297232	211,39
3,01104E-9	2,08672E9





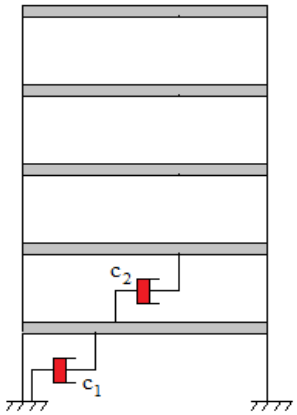


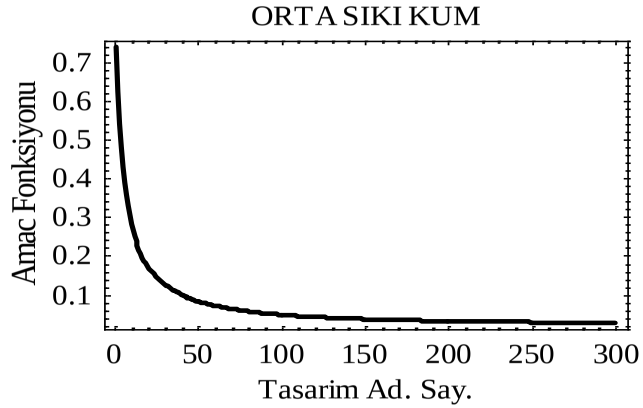


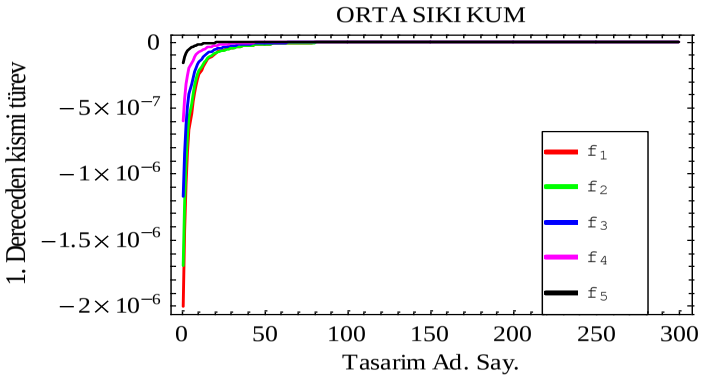


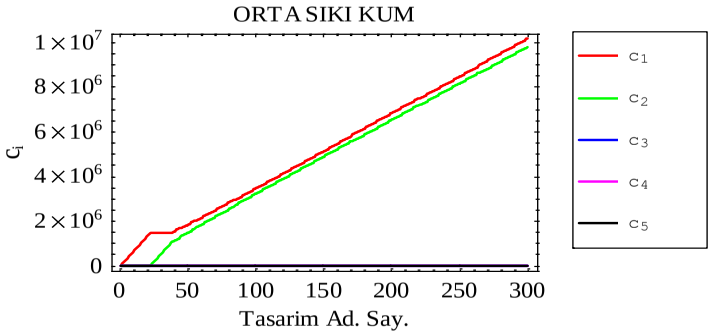
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

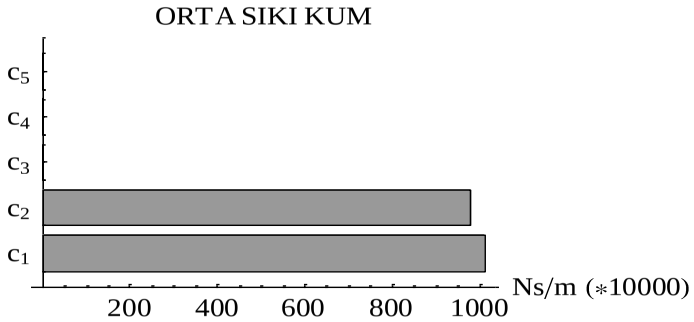
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		ORTA SIKI KUM (ν=0,3 v_s=300 m/s ρ=1650 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 20.10^6 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,780869	8,04641	
0,262843	23,9047	
0,166431	37,7526	
0,12945	48,5377	
0,113441	55,3871	
0,0297232	211,39	
3,01104E-9	2,08672E9	





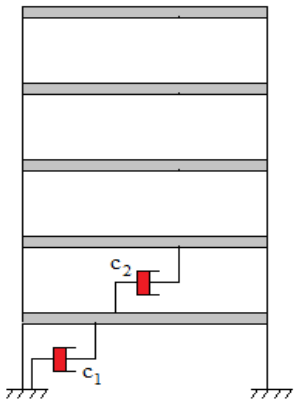


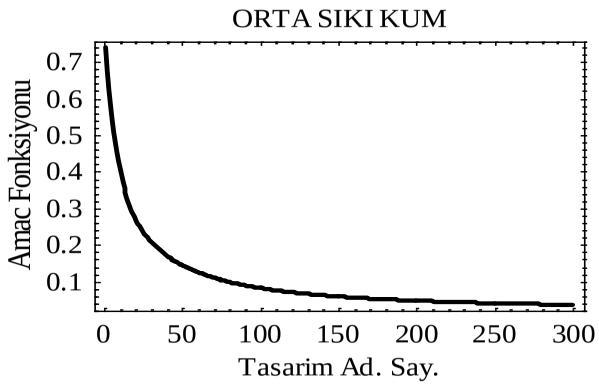


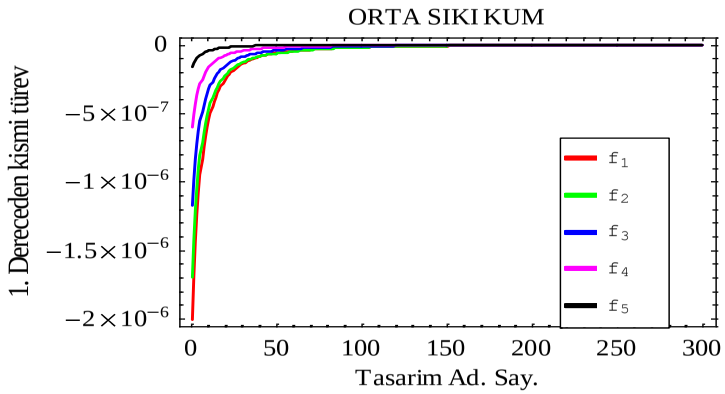


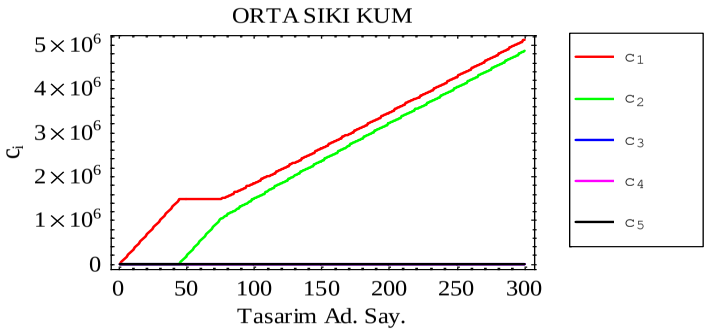
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

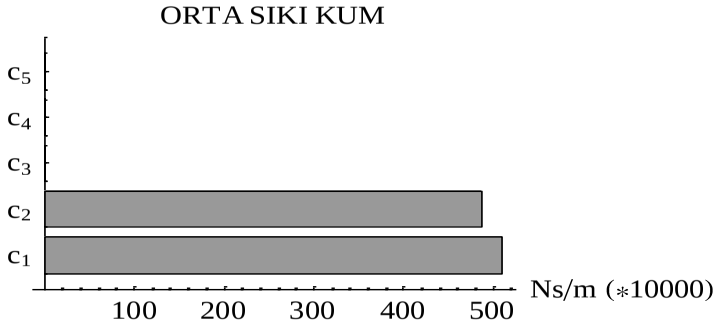
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		ORTA SIKI KUM (ν=0,3 v_s=300 m/s ρ=1650 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 1.10^7 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,780869	8,04641	
0,262843	23,9047	
0,166431	37,7526	
0,12945	48,5377	
0,113441	55,3871	
0,0297232	211,39	
3,01104E-9	2,08672E9	





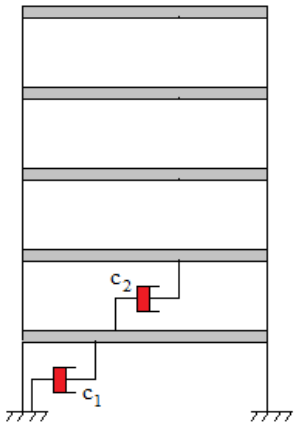


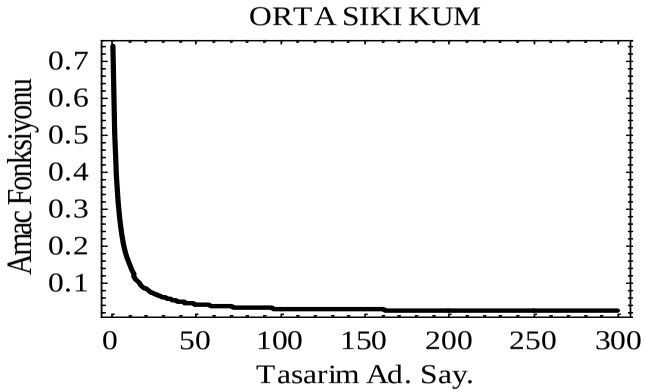


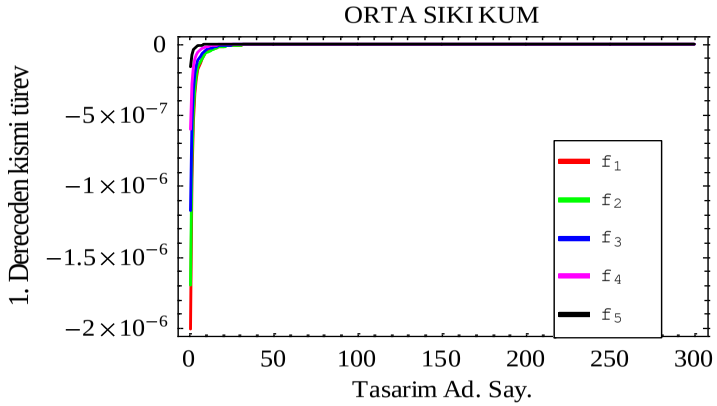


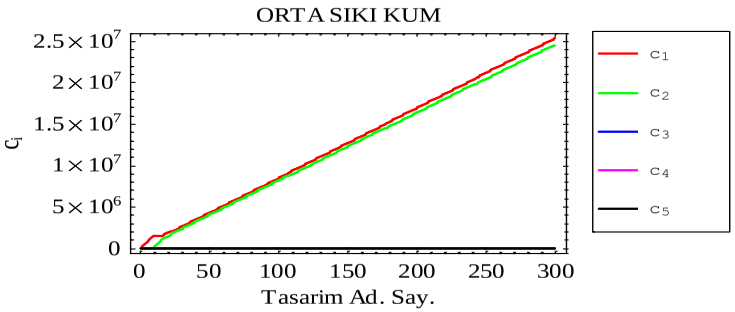
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

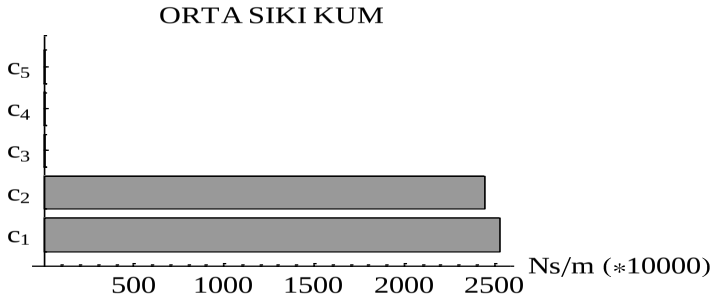
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		ORTA SIKI KUM (ν=0,3 v_s=300 m/s ρ=1650 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 5.10^7 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,780869	8,04641	
0,262843	23,9047	
0,166431	37,7526	
0,12945	48,5377	
0,113441	55,3871	
0,0297232	211,39	
3,01104E-9	2,08672E9	





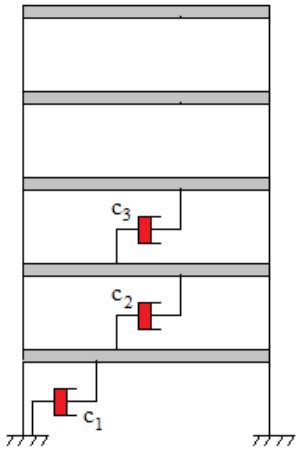


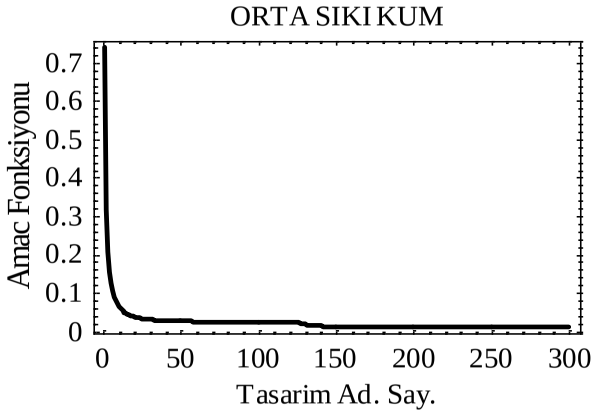


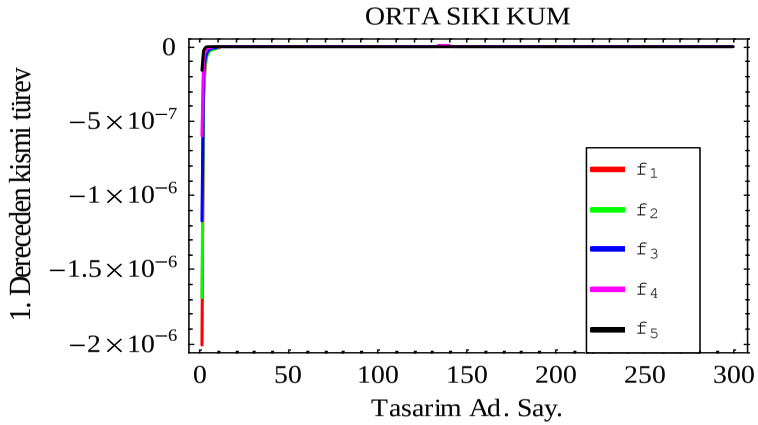


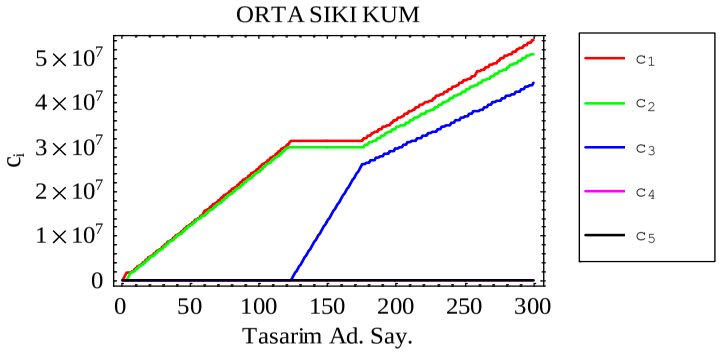
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

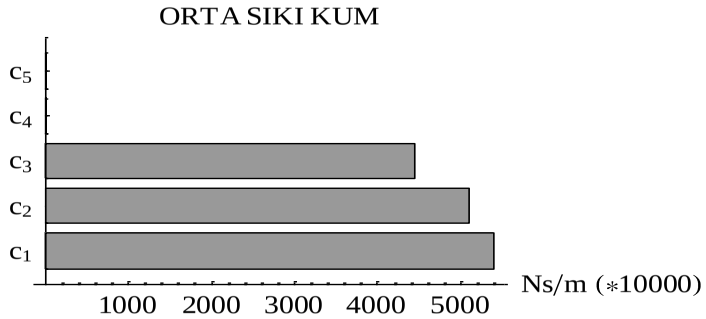
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		ORTA SIKI KUM (ν=0,3 v_s=300 m/s ρ=1650 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 15.10^7 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,780869	8,04641	
0,262843	23,9047	
0,166431	37,7526	
0,12945	48,5377	
0,113441	55,3871	
0,0297232	211,39	
3,01104E-9	2,08672E9	





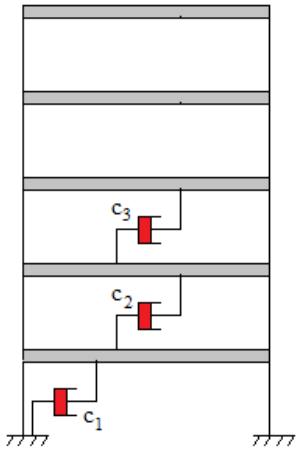


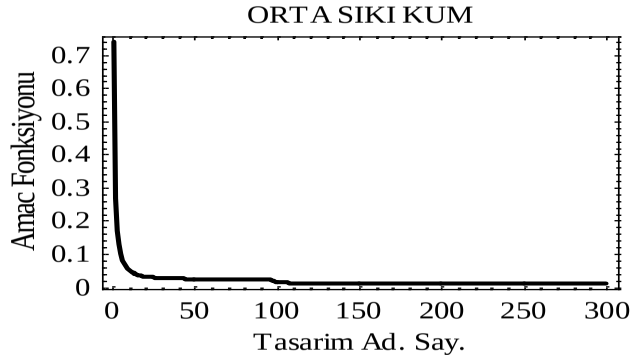


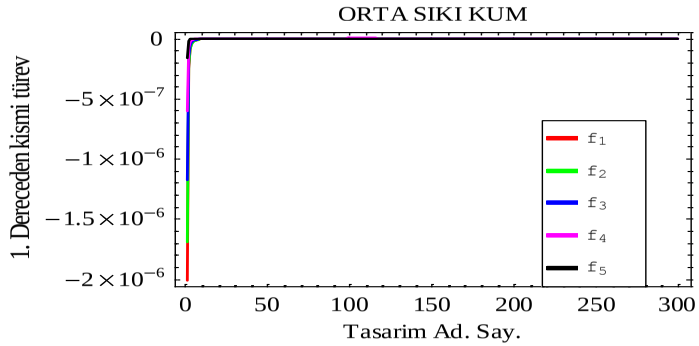


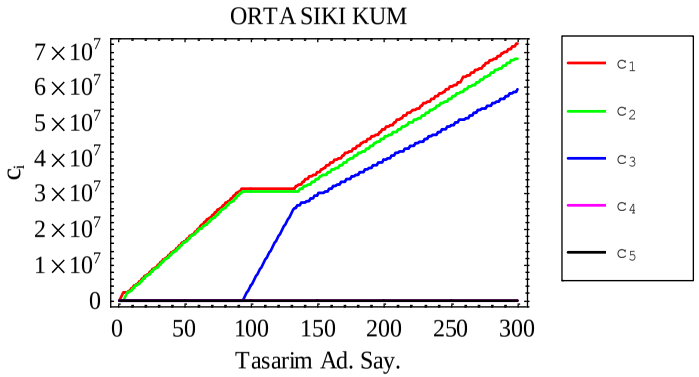
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

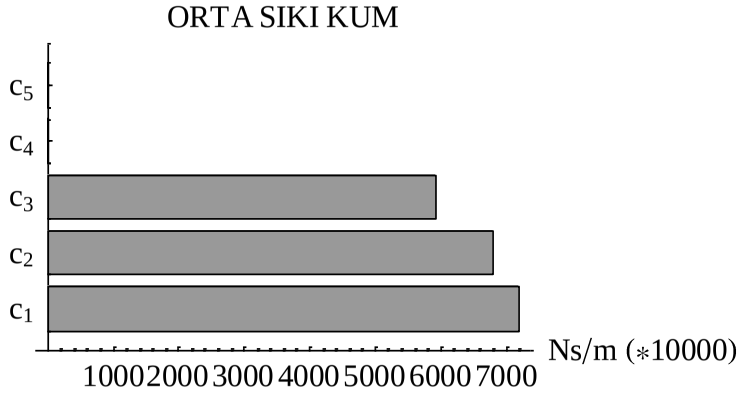
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		ORTA SIKI KUM (ν=0,3 v_s=300 m/s ρ=1650 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 20.10^7 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,780869	8,04641	
0,262843	23,9047	
0,166431	37,7526	
0,12945	48,5377	
0,113441	55,3871	
0,0297232	211,39	
3,01104E-9	2,08672E9	





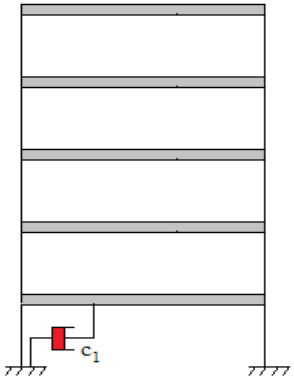


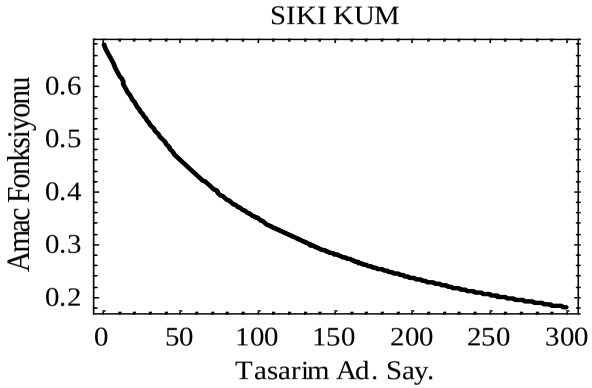


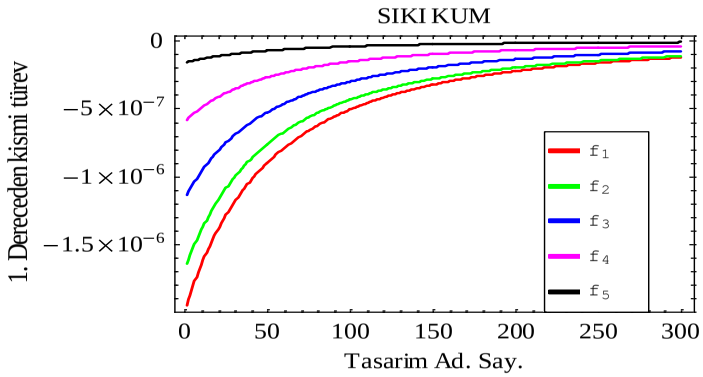


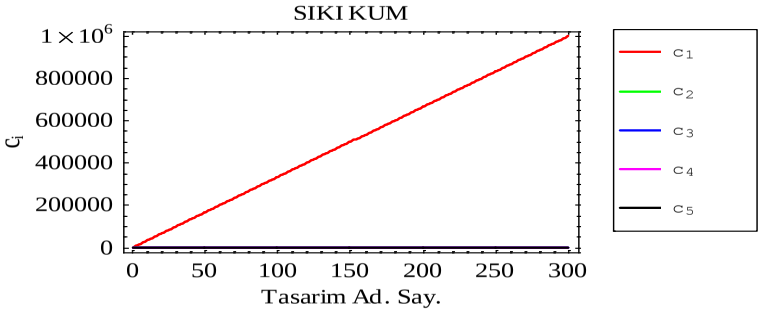
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

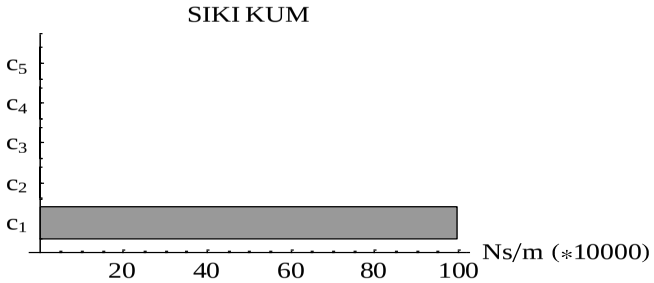
Zemin Cinsi / **Periyot (s) / Frekans (1/s)**		**SIKI KUM** *(ν=0,35 v_s=450 m/s ρ=1850 kg/m^3)*
		($\sum c_i$=W) **W= 1.10^6 (Ns/m)** ‘lik sönüm için
0,768722	8,17355	
0,262193	23,964	
0,166248	37,7941	
0,129386	48,5616	
0,113427	55,394	
0,0149989	418,909	
0,-1,27099E-9 i	0,+4,94352 E9 i	





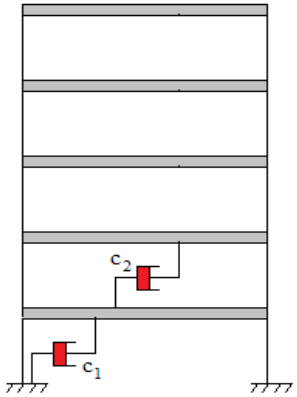


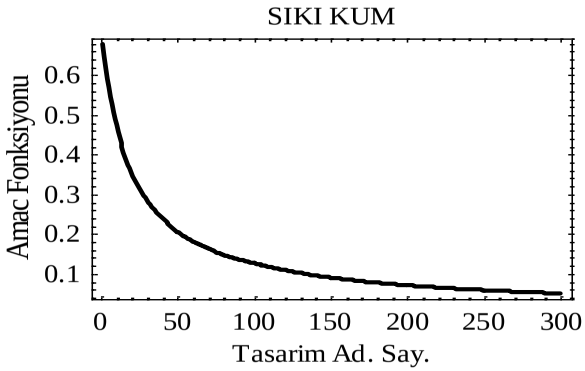


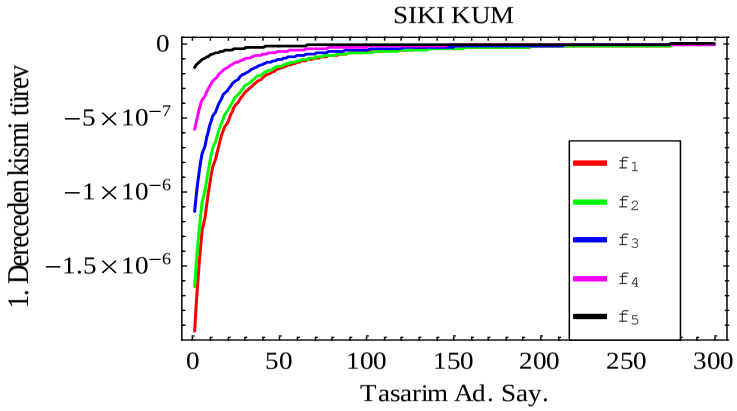


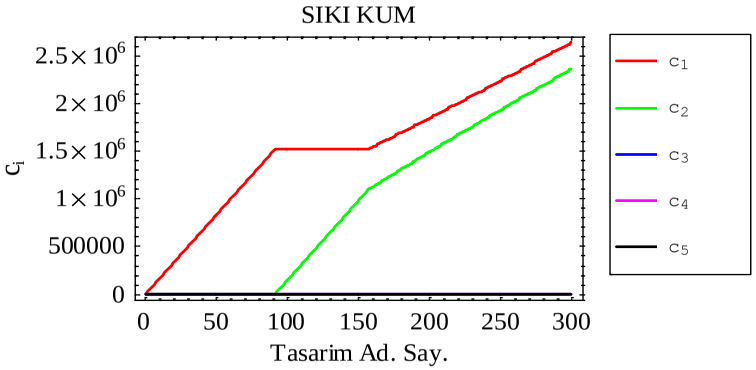
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

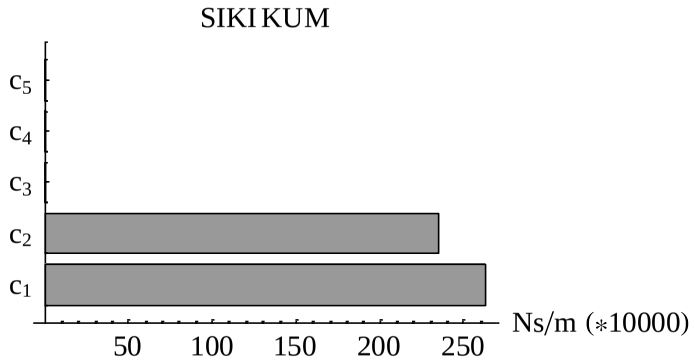
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		SIKI KUM (ν=0,35 v_s=450 m/s ρ=1850 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 5.10^6 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,768722	8,17355	
0,262193	23,964	
0,166248	37,7941	
0,129386	48,5616	
0,113427	55,394	
0,0149989	418,909	
0,-1,27099E-9 i	0,+4,94352 E9 i	





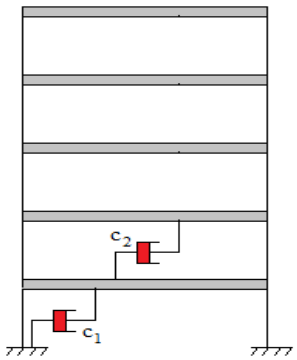


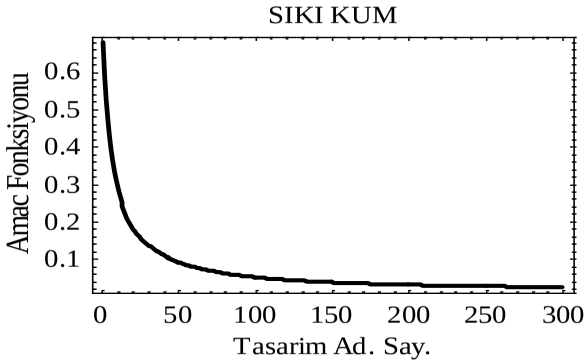


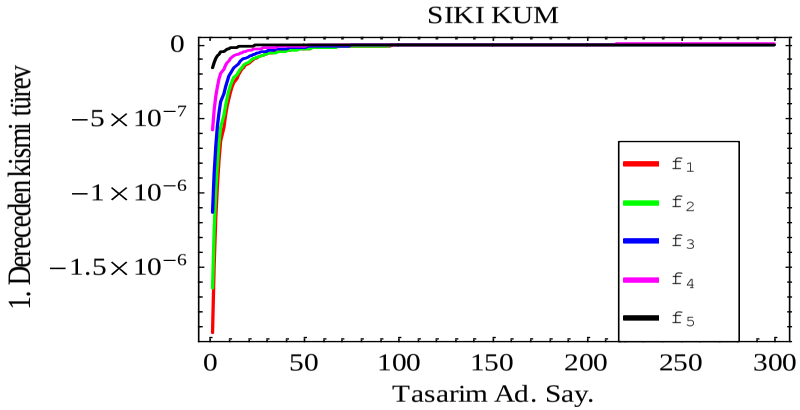


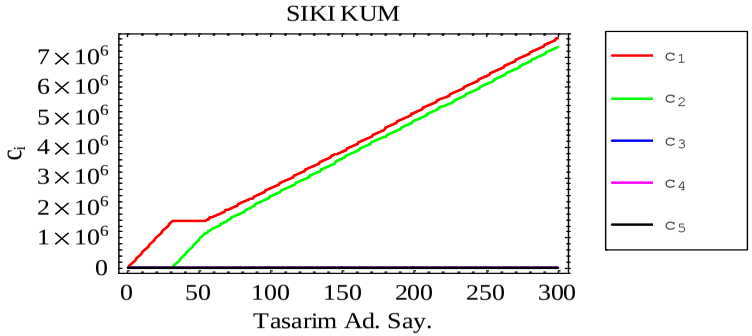
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

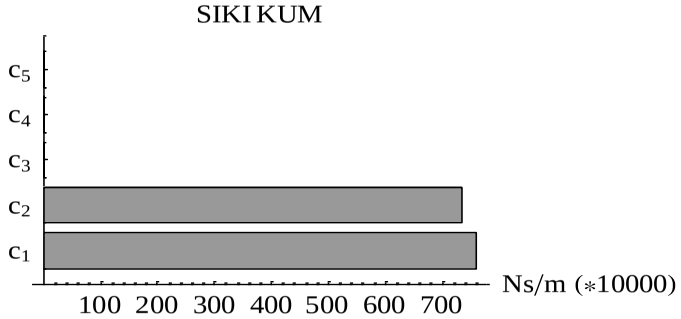
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		SIKI KUM (ν=0,35 v_s=450 m/s ρ=1850 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 15.10^6 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,768722	8,17355	
0,262193	23,964	
0,166248	37,7941	
0,129386	48,5616	
0,113427	55,394	
0,0149989	418,909	
0,-1,27099E-9 i	0,+4,94352 E9 i	





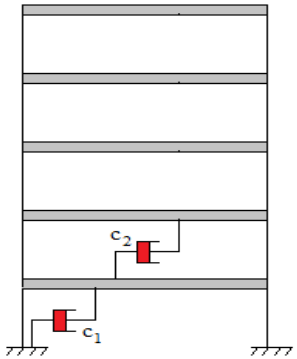


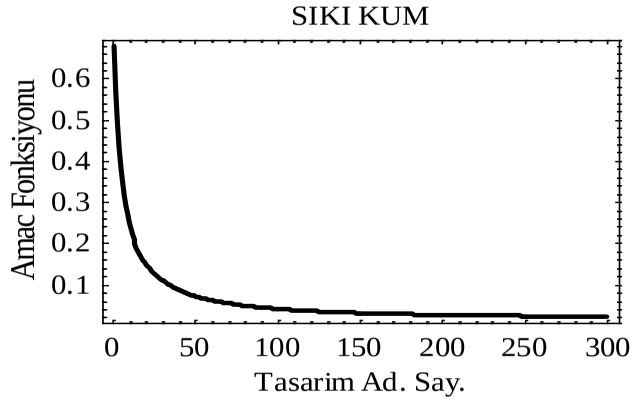


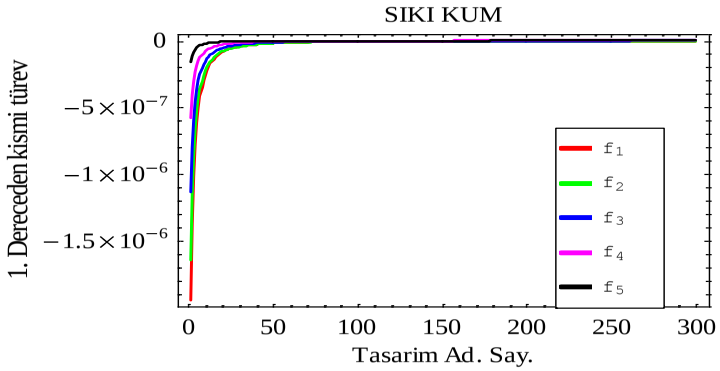


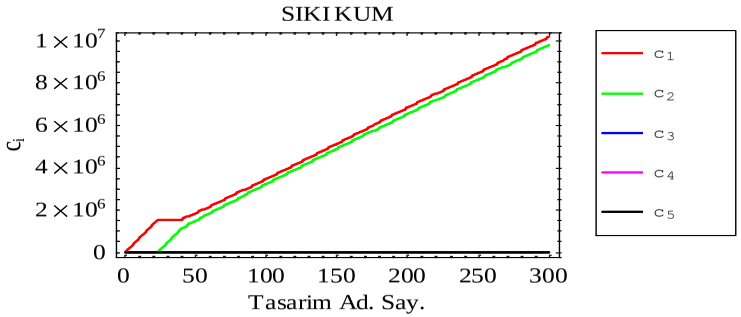
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

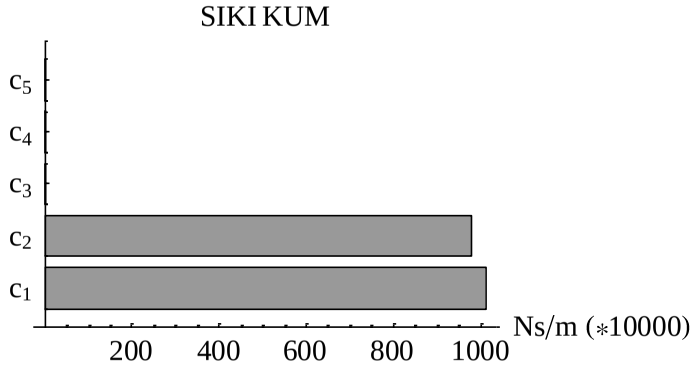
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		SIKI KUM (ν=0,35 v_s=450 m/s ρ=1850 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 20.10^6 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,768722	8,17355	
0,262193	23,964	
0,166248	37,7941	
0,129386	48,5616	
0,113427	55,394	
0,0149989	418,909	
0,-1,27099E-9 i	0,+4,94352 E9 i	







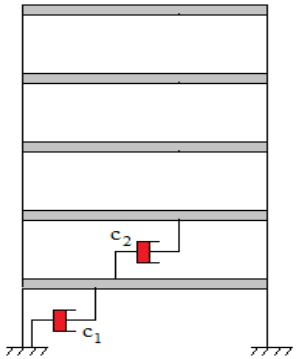


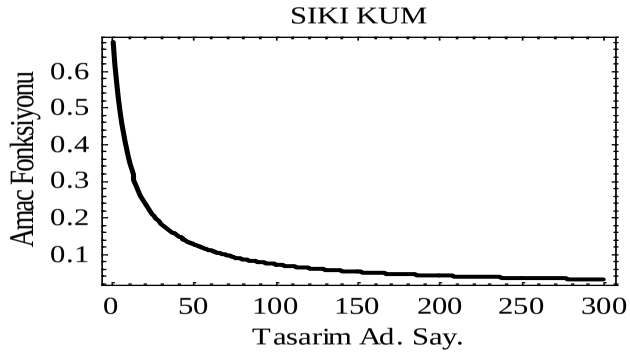


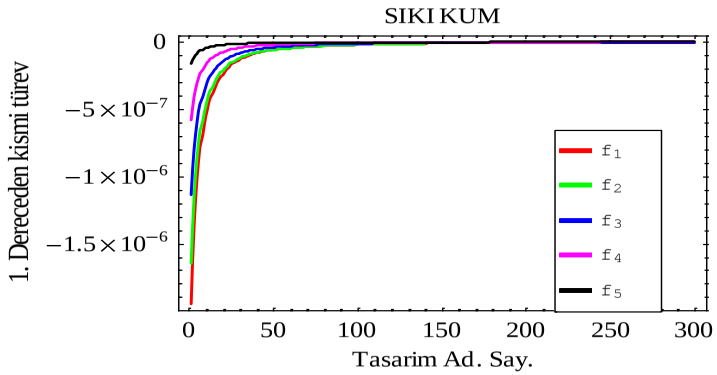
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

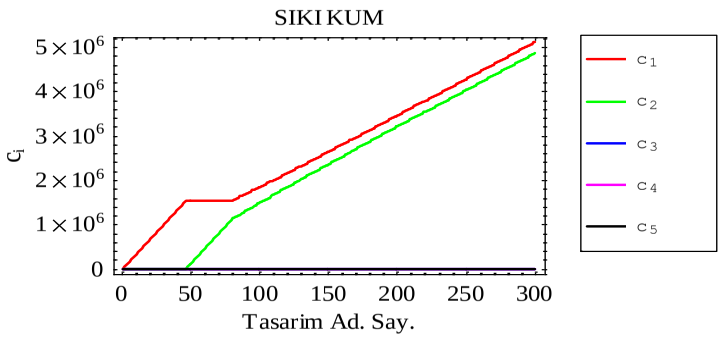
Zemin Cinsi	**SIKI KUM** *(ν=0,35 v_s=450 m/s ρ=1850 kg/m^3)*
Periyot (s) / Frekans (1/s)	**($\sum c_i$=W)** W= **1.10^7 (Ns/m)** 'lik sönüm için

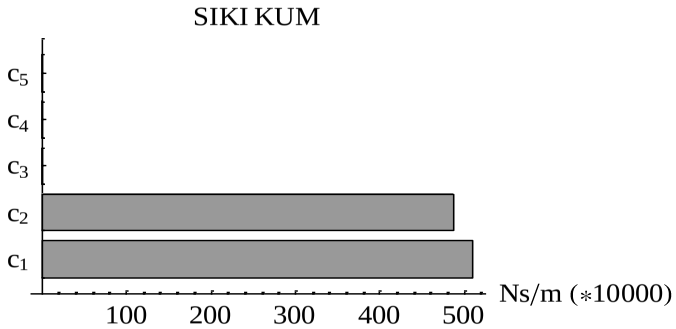
0,768722	8,17355
0,262193	23,964
0,166248	37,7941
0,129386	48,5616
0,113427	55,394
0,0149989	418,909
0,-1,27099E-9 i	0,+4,94352 E9 i







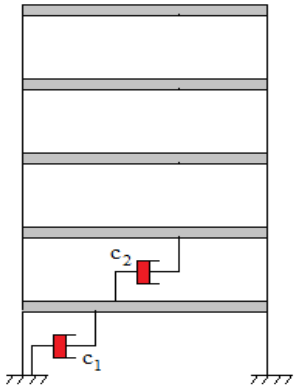


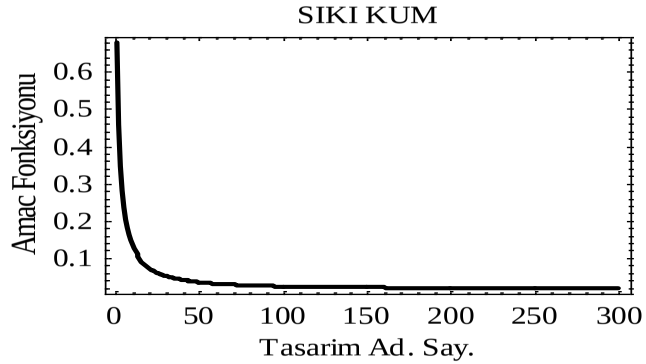


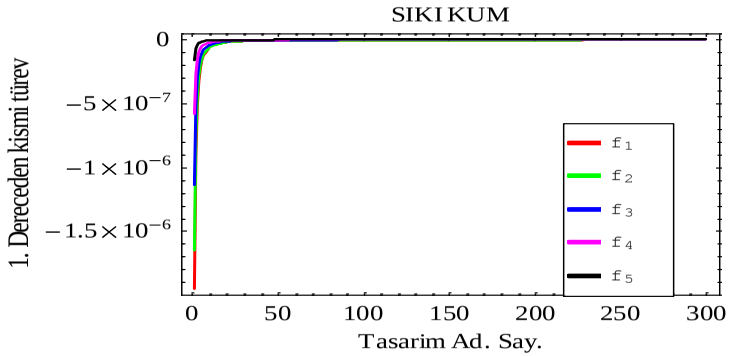
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

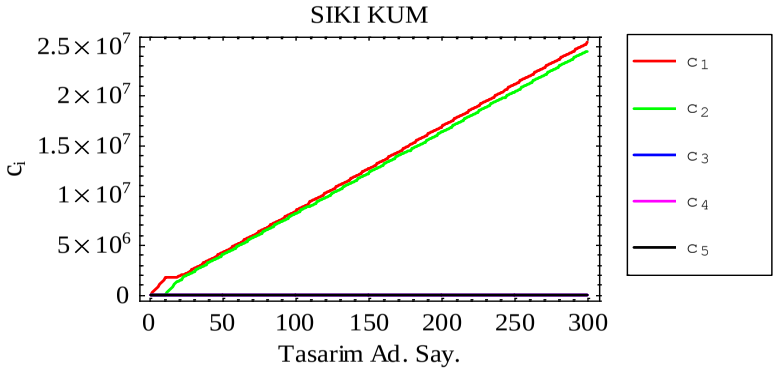
Zemin Cinsi	**SIKI KUM** *(ν=0,35 v_s=450 m/s ρ=1850 kg/m^3)*
Periyot (s) / Frekans (1/s)	**($\sum c_i$=W)** **W= 5.10^7 (Ns/m)** 'lik sönüm için

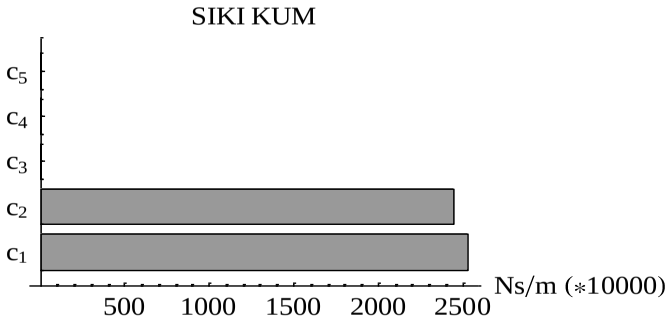
0,768722	8,17355
0,262193	23,964
0,166248	37,7941
0,129386	48,5616
0,113427	55,394
0,0149989	418,909
0,-1,27099E-9 i	0,+4,94352 E9 i





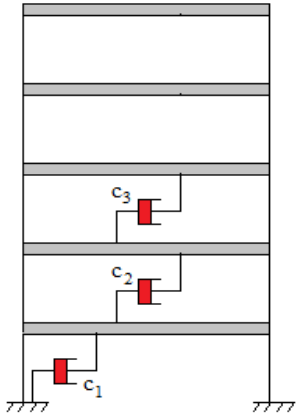


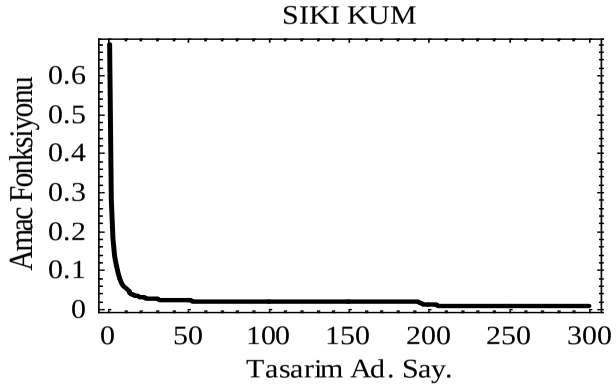


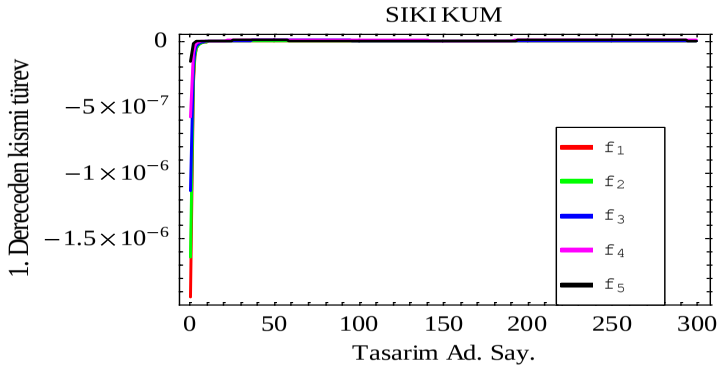


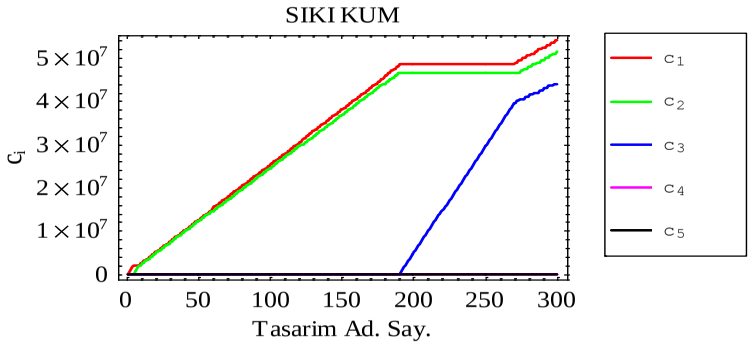
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

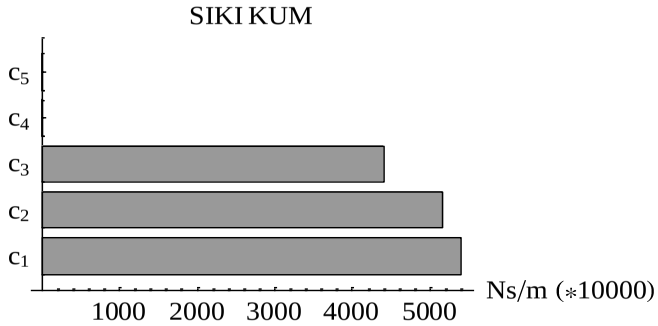
Zemin Cinsi / Periyot (s) / Frekans (1/s)		SIKI KUM (ν=0,35 v_s=450 m/s ρ=1850 kg/m^3)
		($\sum c_i$=W) W= 15.10^7 (Ns/m) 'lik sönüm için
0,768722	8,17355	
0,262193	23,964	
0,166248	37,7941	
0,129386	48,5616	
0,113427	55,394	
0,0149989	418,909	
0,-1,27099E-9 i	0,+4,94352 E9 i	







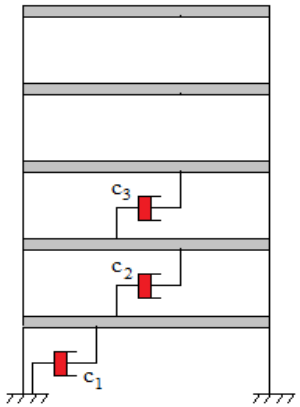


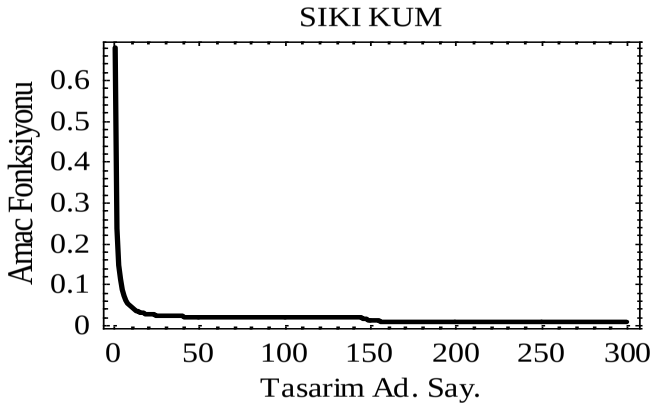


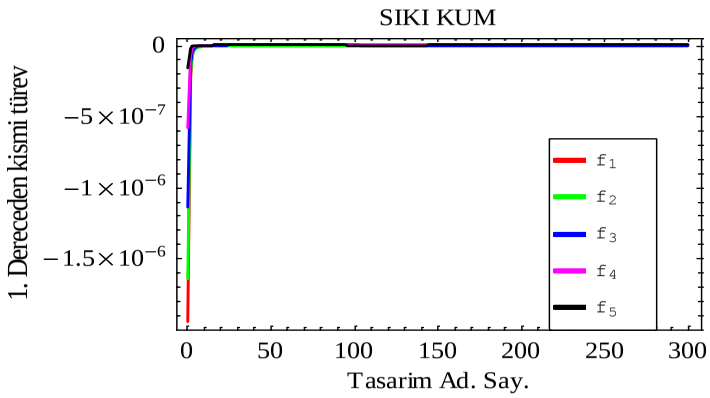
EK- A Optimizasyon Analiz Sonuçları (Devamı)

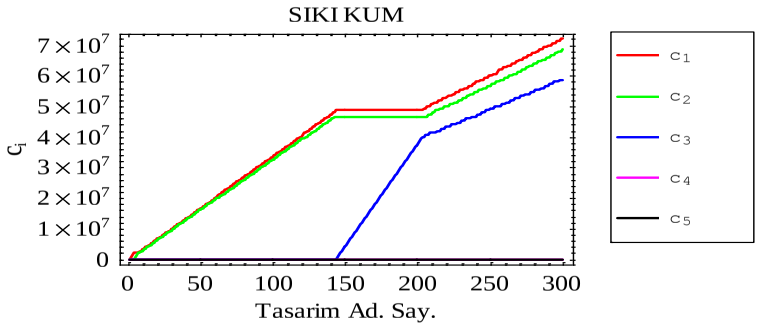
Zemin Cinsi	**SIKI KUM** (ν=0,35 v_s=450 m/s ρ=1850 kg/m^3)
Periyot (s) / Frekans (1/s)	**($\sum c_i$=W)** **W= 20.10^7 (Ns/m)** 'lik sönüm için

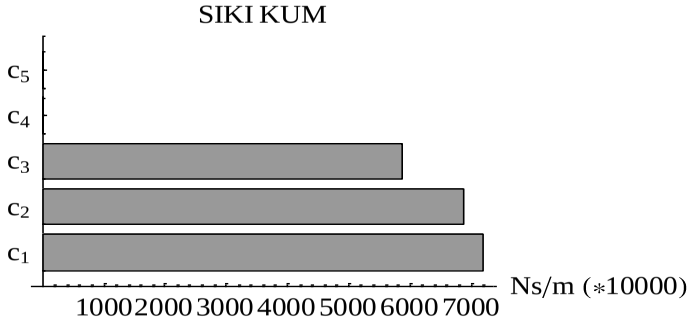
Periyot (s)	Frekans (1/s)
0,768722	8,17355
0,262193	23,964
0,166248	37,7941
0,129386	48,5616
0,113427	55,394
0,0149989	418,909
0,-1,27099E-9 i	0,+4,94352 E9 i









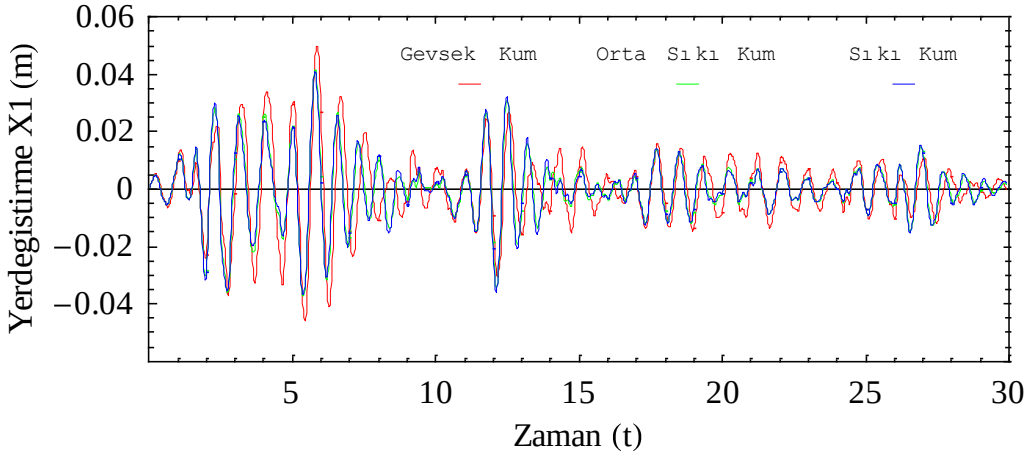


EK- B Deprem Analiz Sonuçları

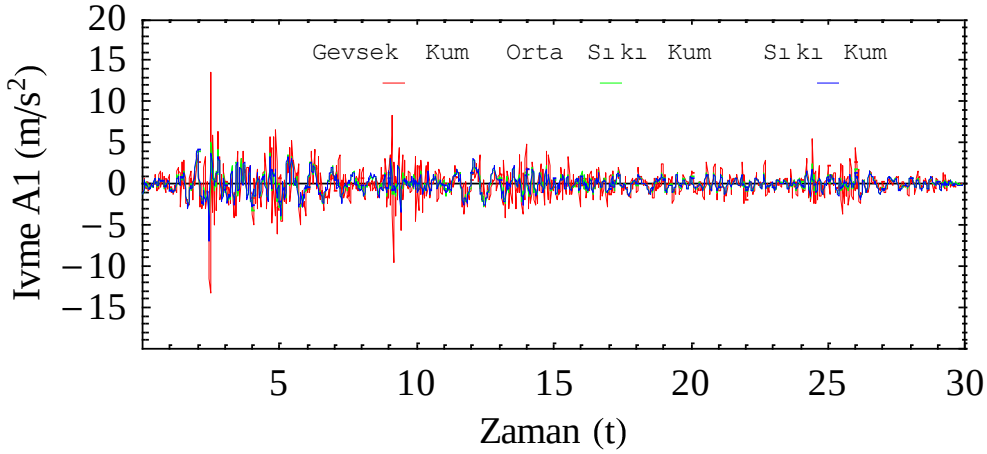
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro

1.10^6 SÖNÜMLÜ

- Yerdeğiştirme



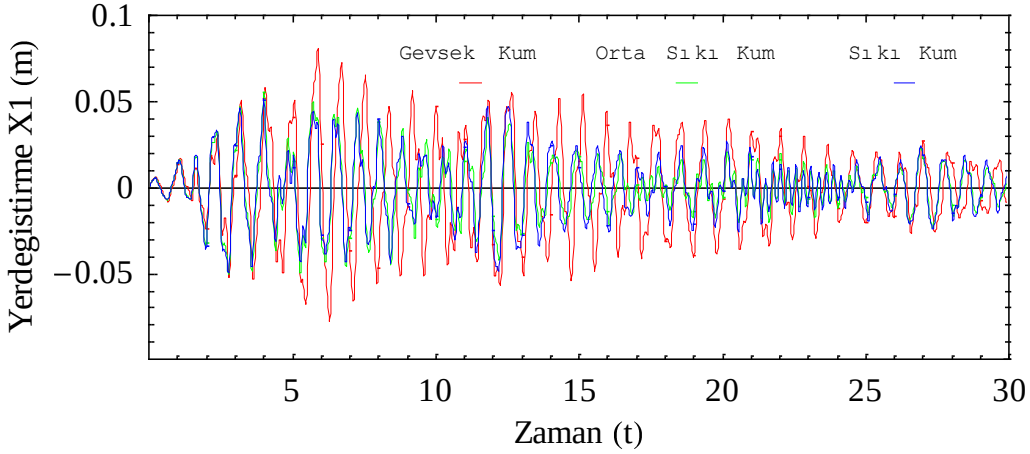
- İvme



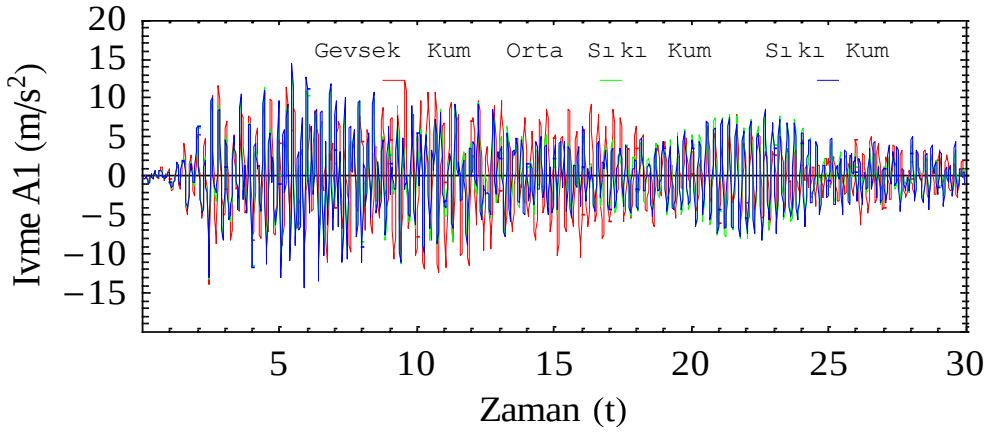
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^6 SÖNÜMSÜZ

- Yerdeğiştirme



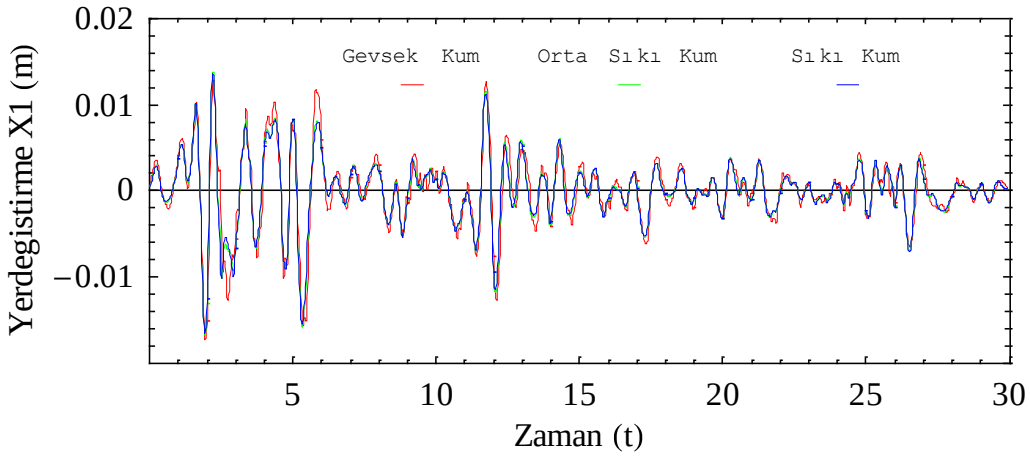
- İvme



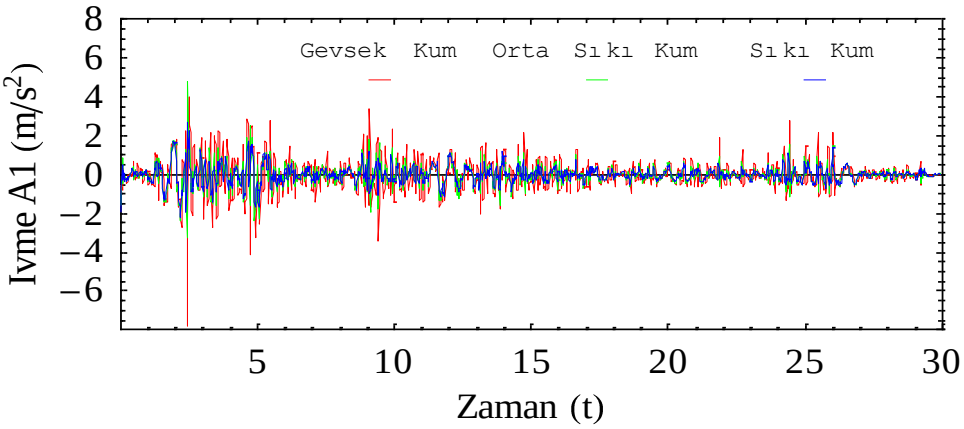
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^7 SÖNÜMLÜ

- Yerdeğiştirme



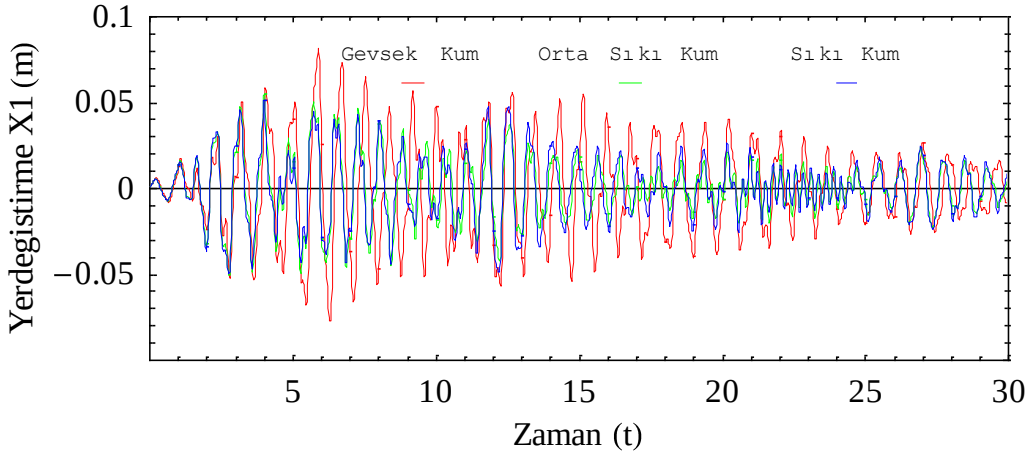
- İvme



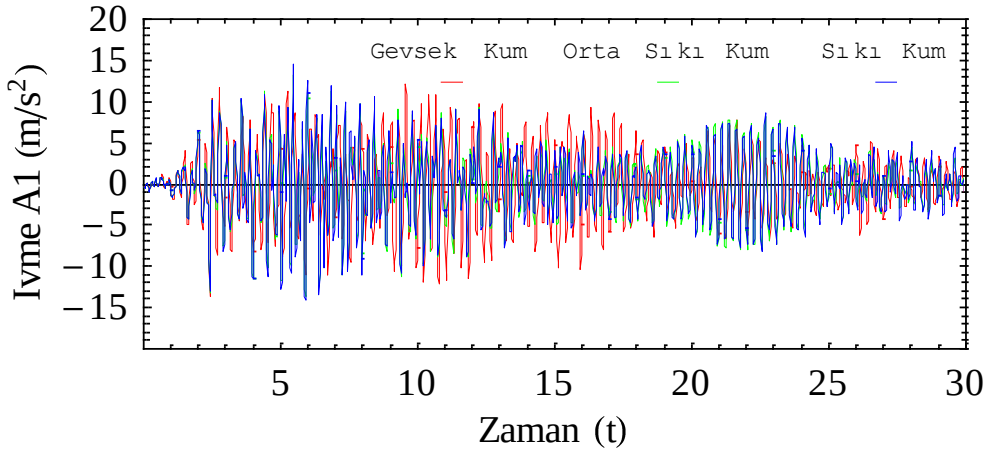
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^7 SÖNÜMSÜZ

- Yerdeğiştirme



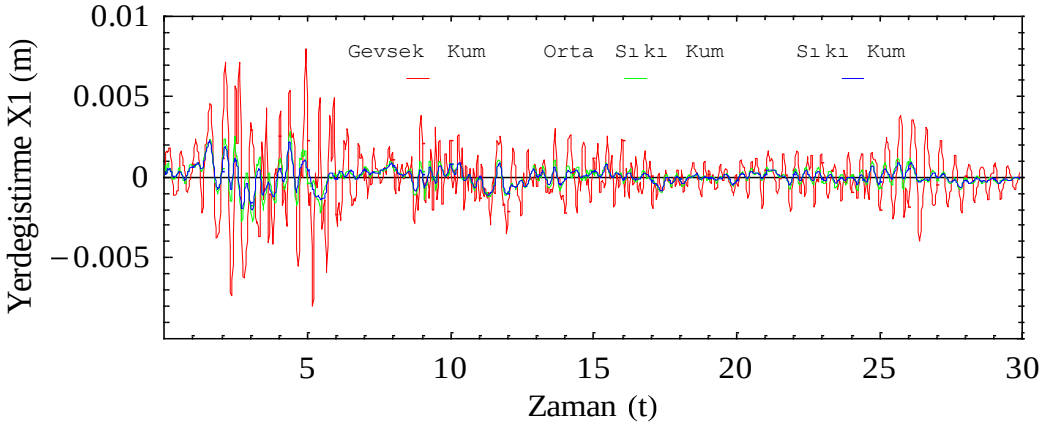
- İvme



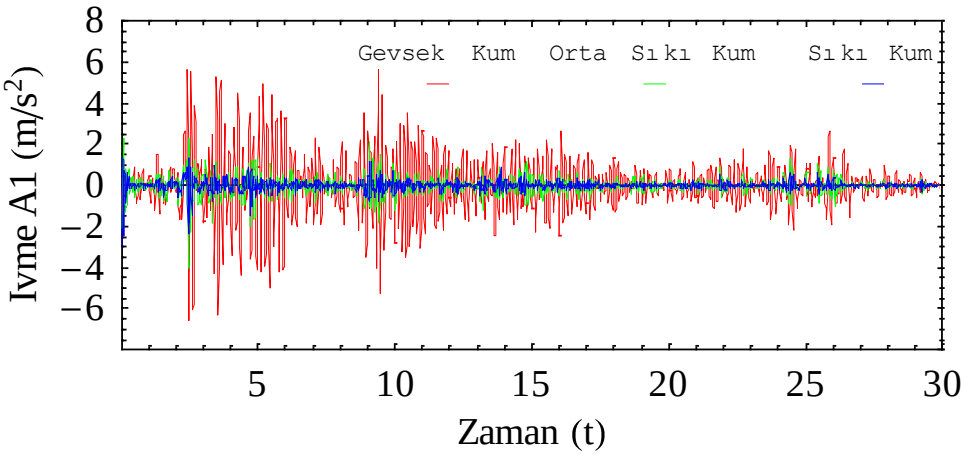
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

15.10[7] SÖNÜMLÜ

- Yerdeğiştirme



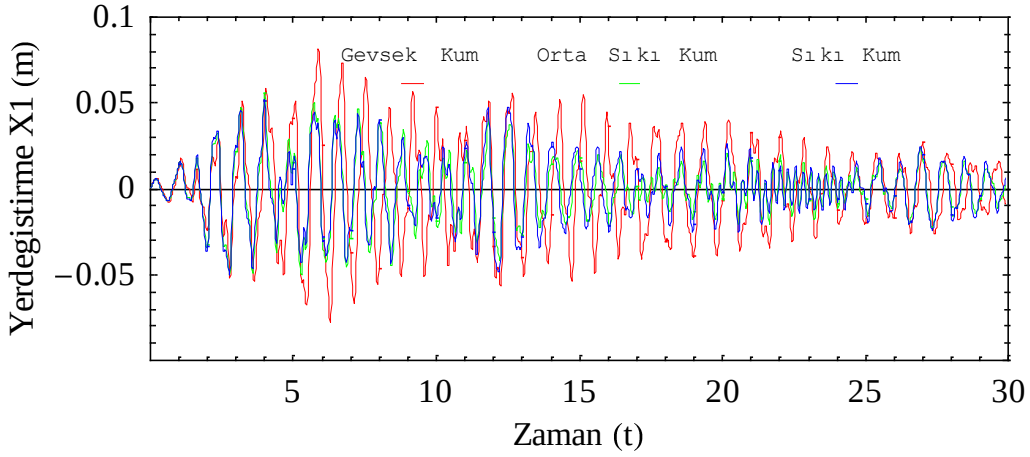
- İvme



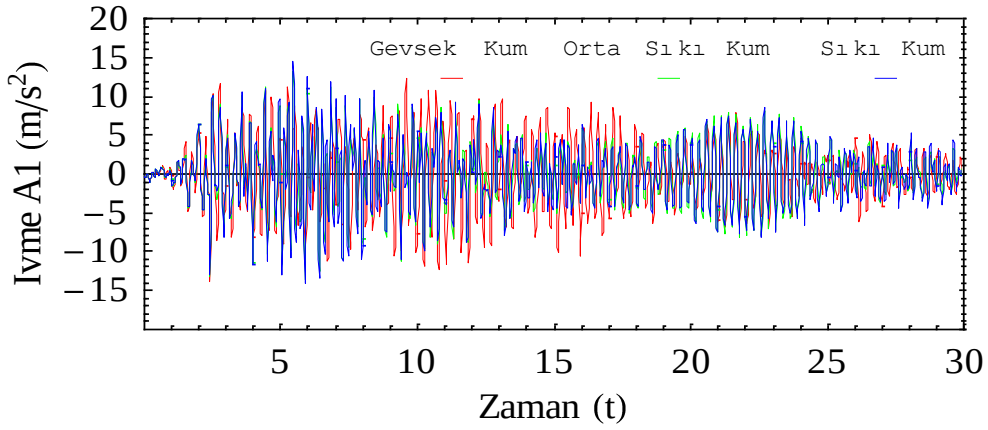
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

15.10^7 SÖNÜMSÜZ

- Yerdeğiştirme



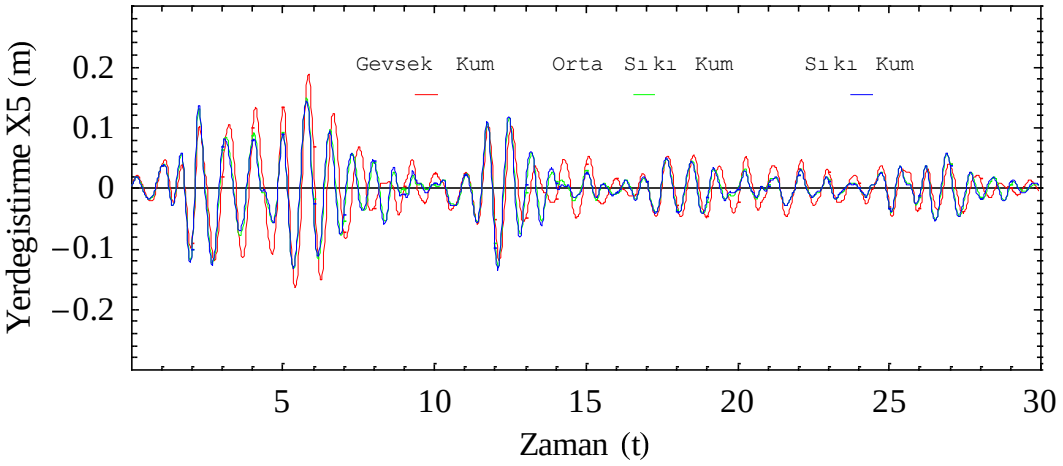
- İvme



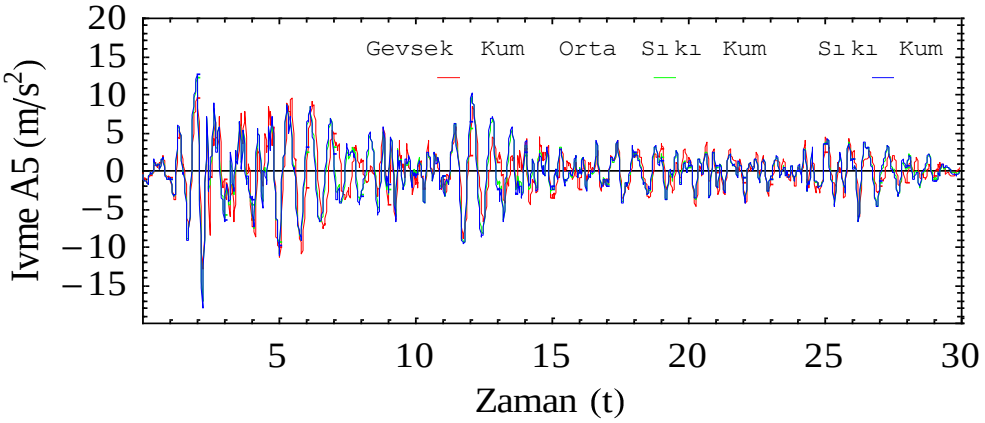
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^6 SÖNÜMLÜ

- Yerdeğiştirme



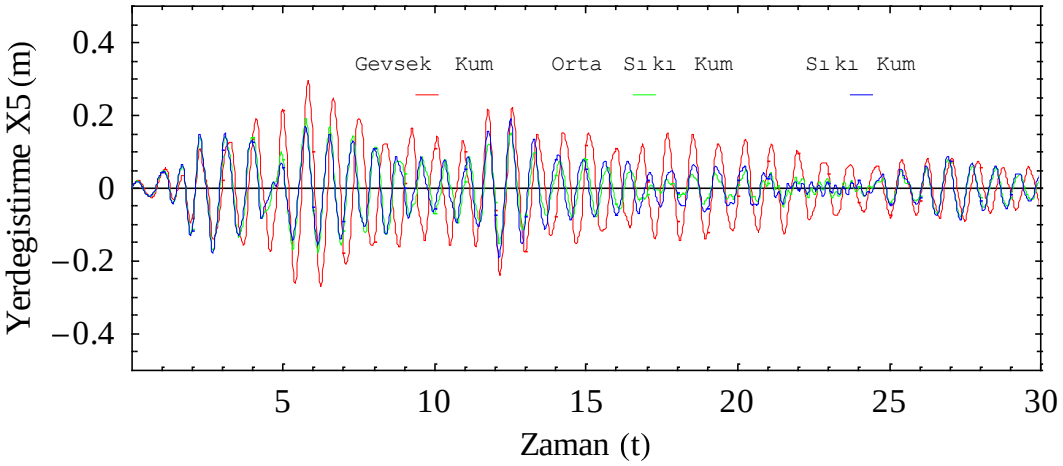
- İvme



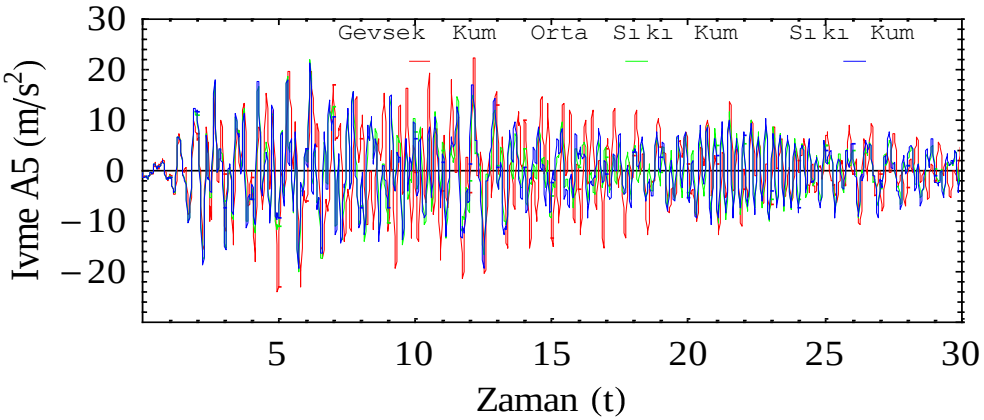
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^6 SÖNÜMSÜZ

- Yerdeğiştirme



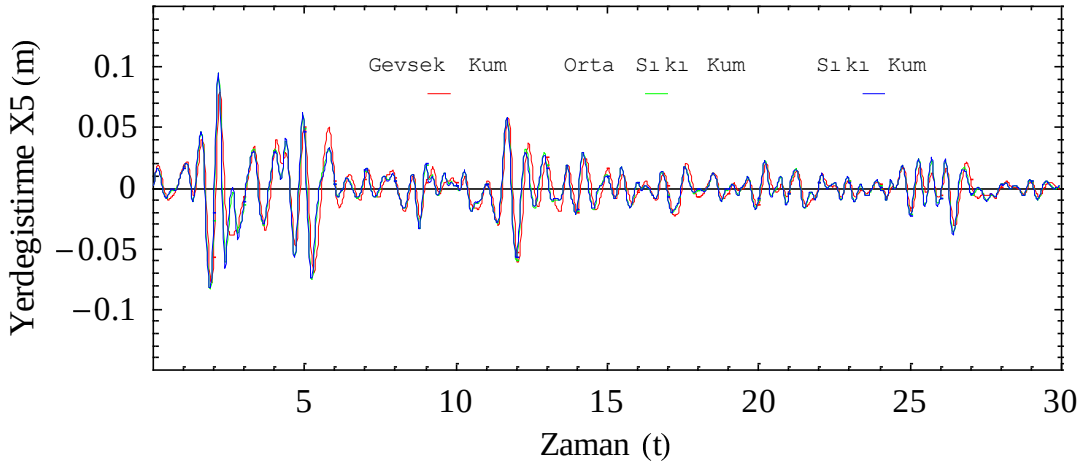
- İvme



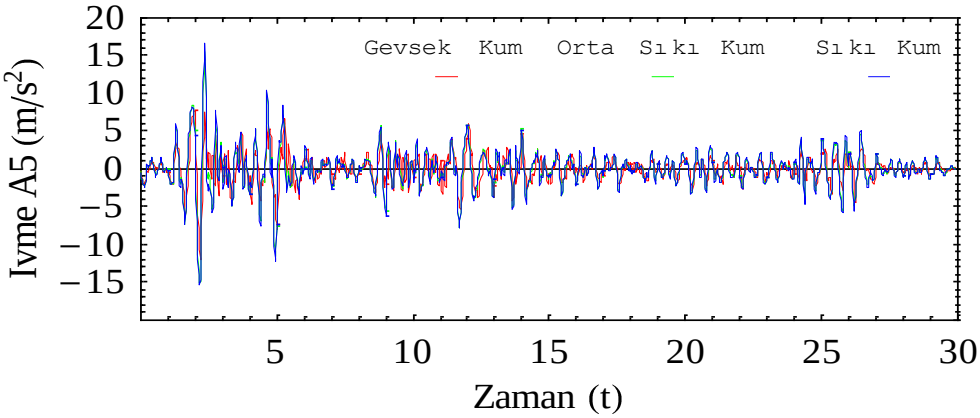
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^7 SÖNÜMLÜ

- Yerdeğiştirme



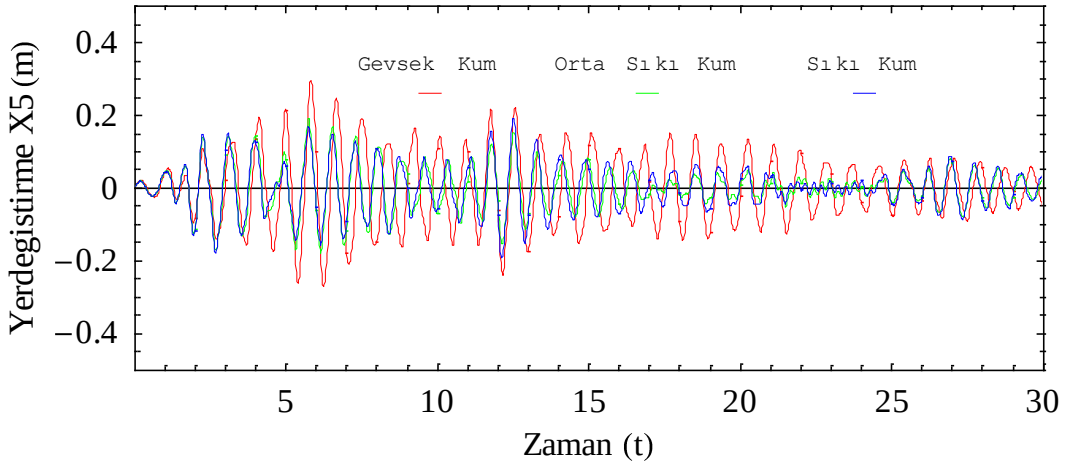
- İvme



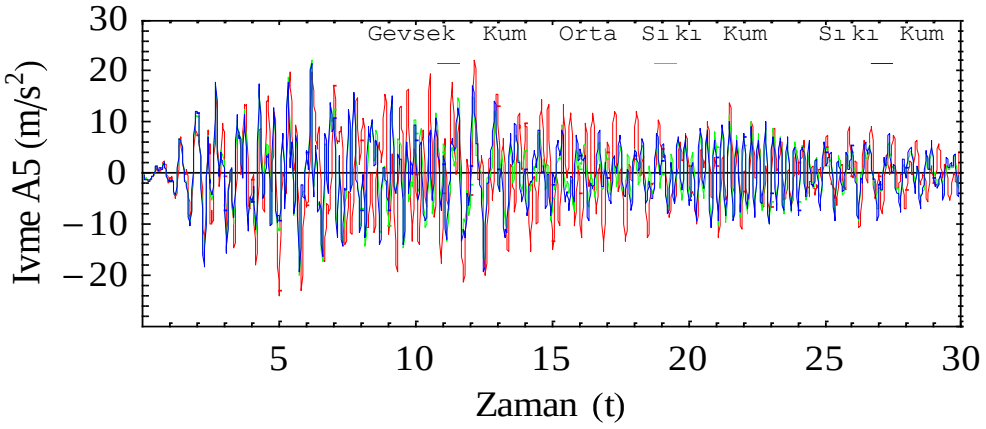
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^7 SÖNÜMSÜZ

- Yerdeğiştirme



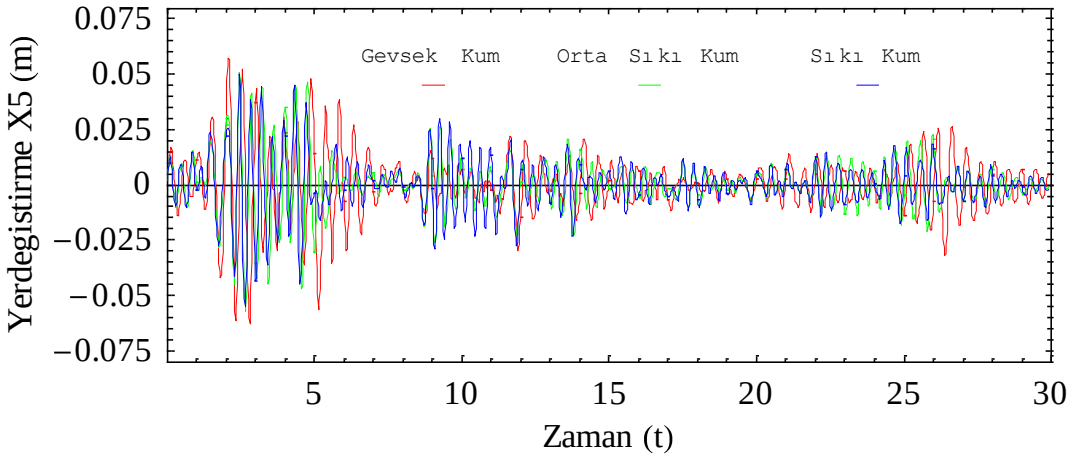
- İvme



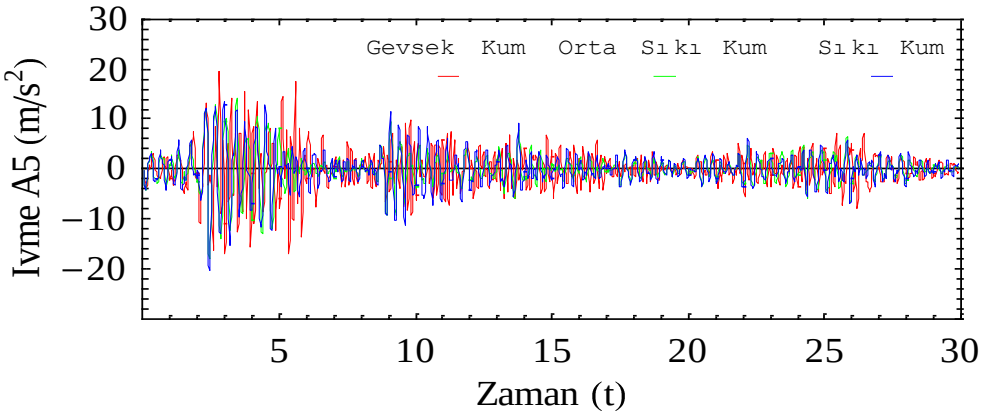
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

15.10^7 SÖNÜMLÜ

- Yerdeğiştirme



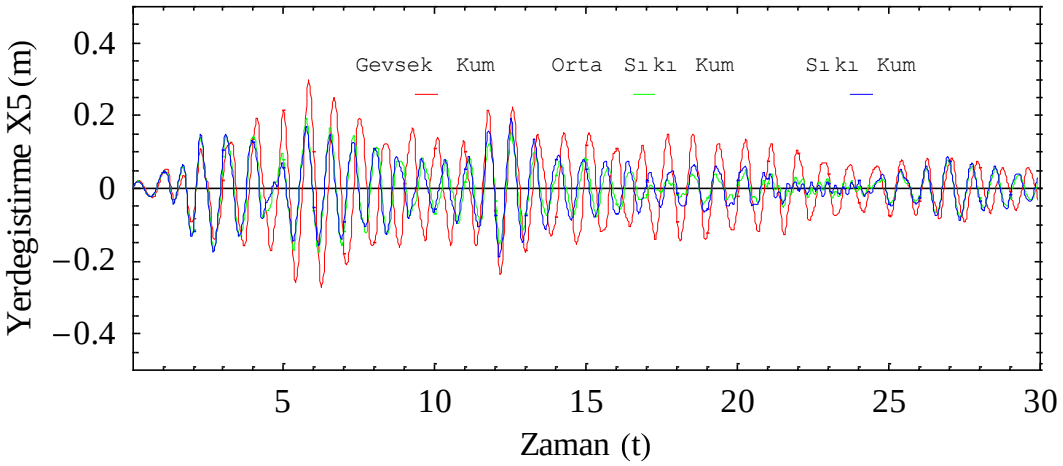
- İvme



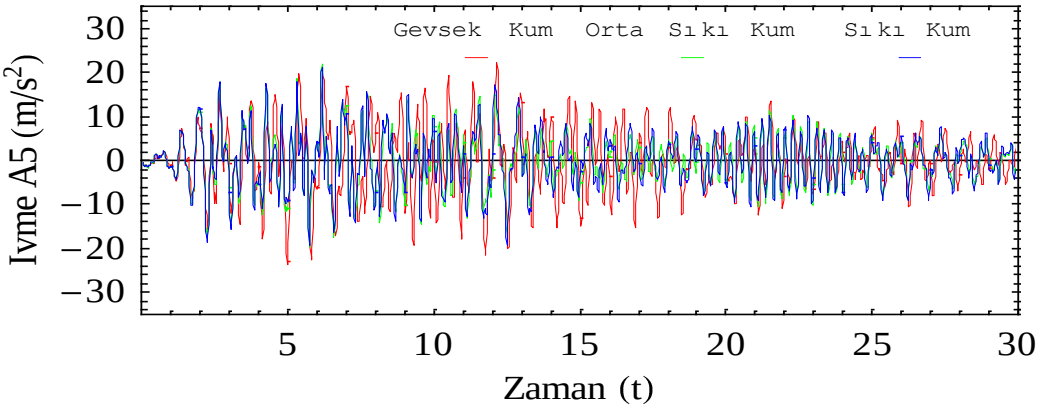
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

15.10^7 SÖNÜMSÜZ

- Yerdeğiştirme



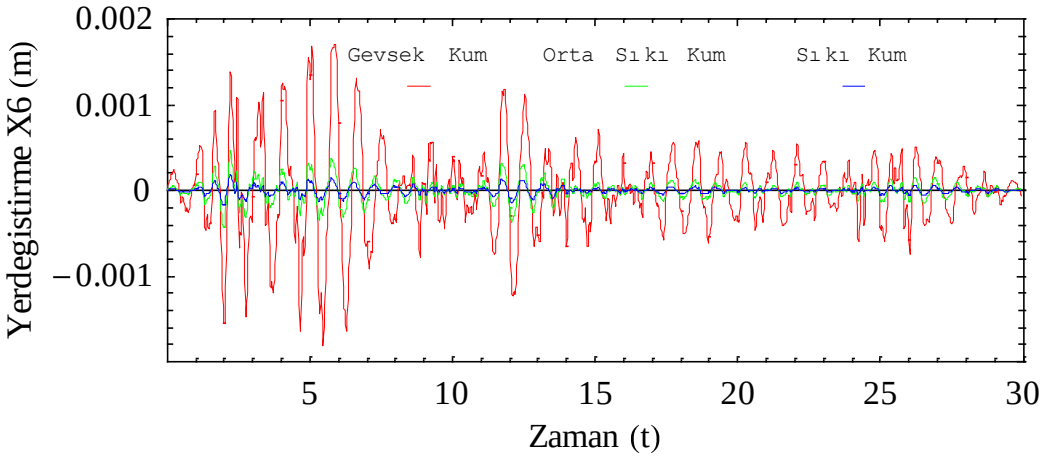
- İvme



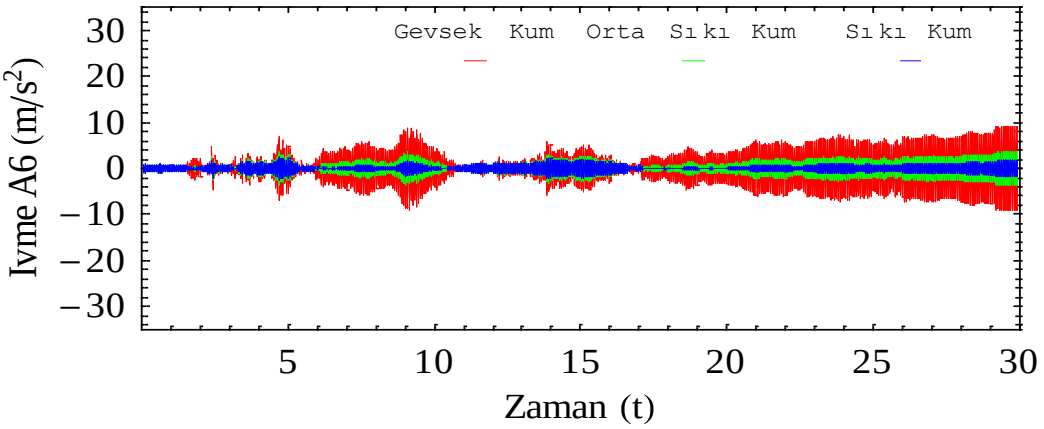
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^6 SÖNÜMLÜ

- Yerdeğiştirme



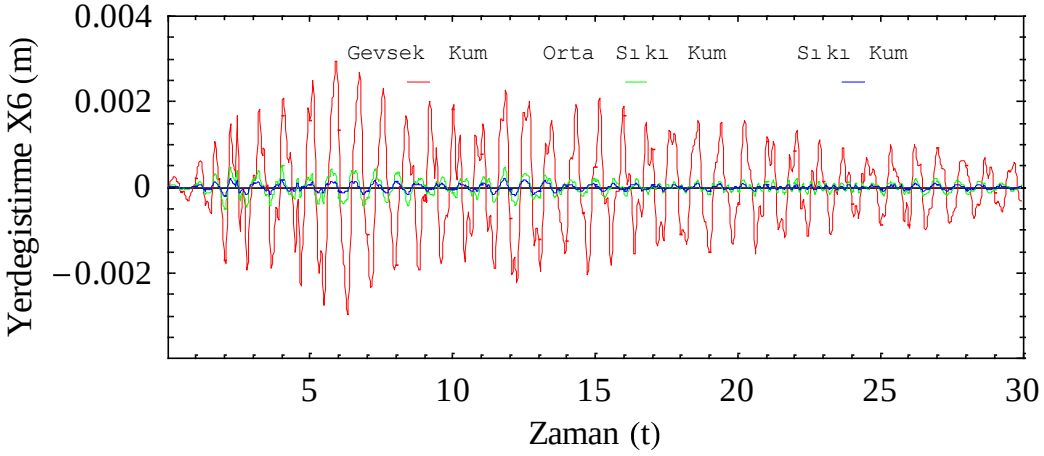
- İvme



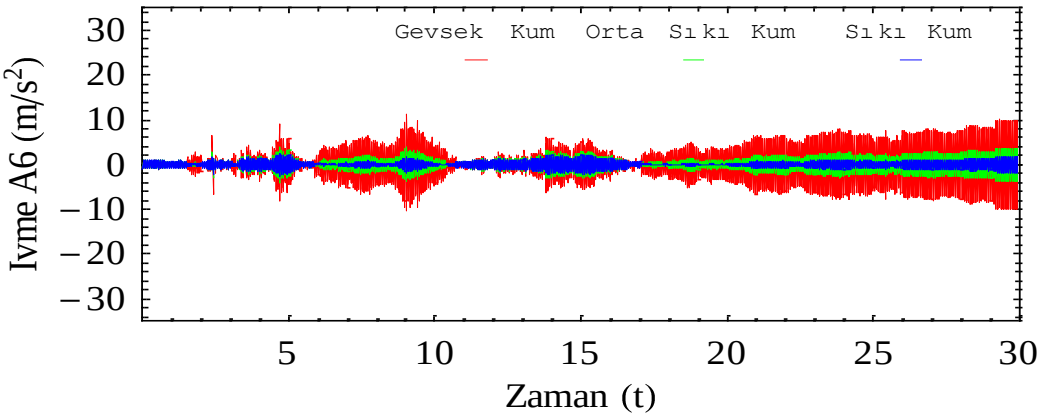
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^6 SÖNÜMSÜZ

- Yerdeğiştirme



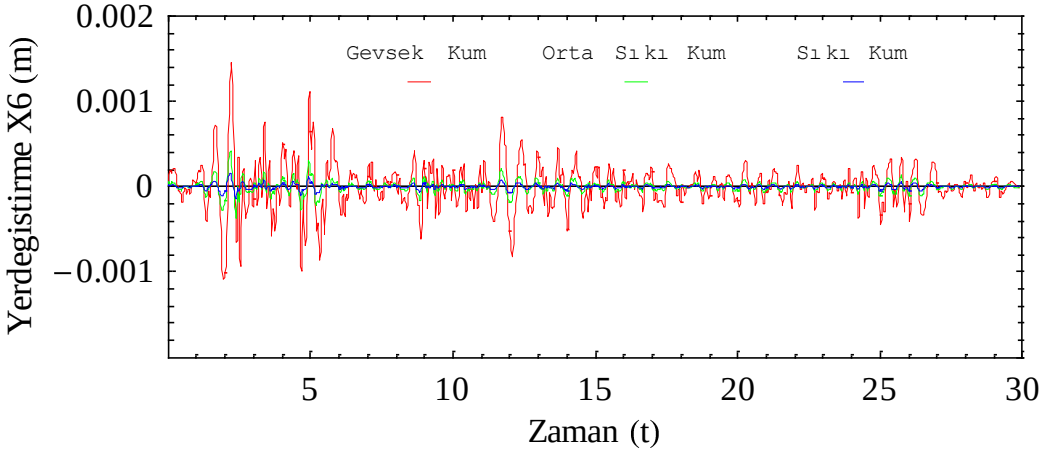
- İvme



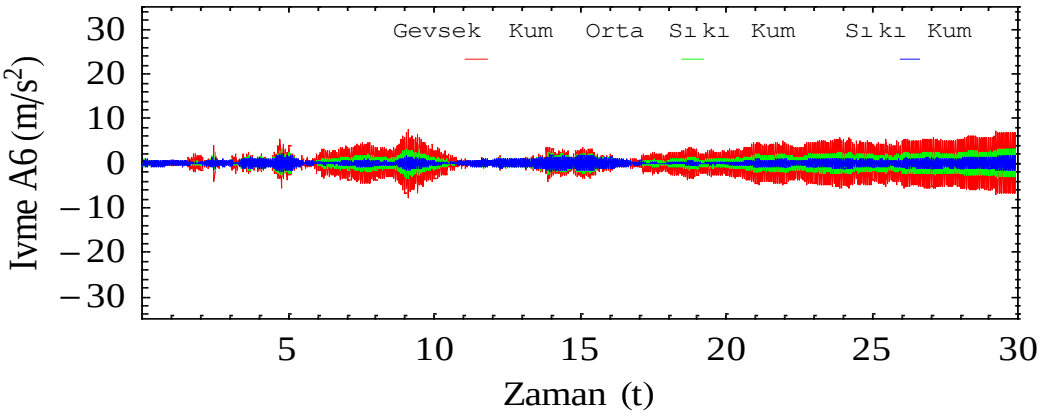
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^7 SÖNÜMLÜ

- Yerdeğiştirme



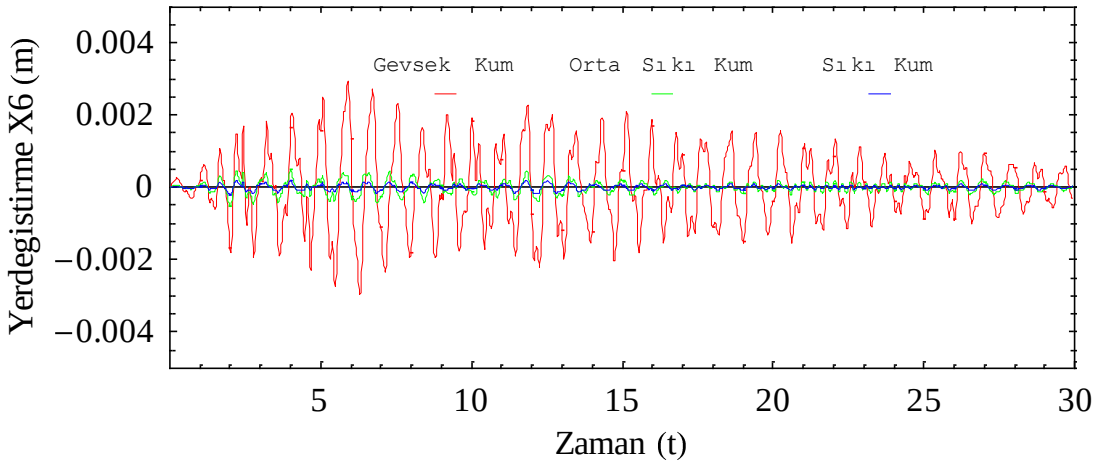
- İvme



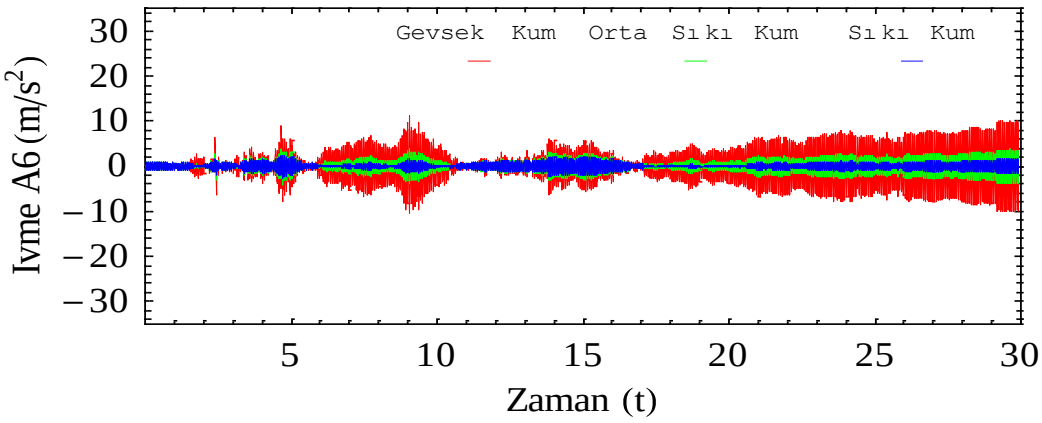
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

1.10^7 SÖNÜMSÜZ

- Yerdeğiştirme



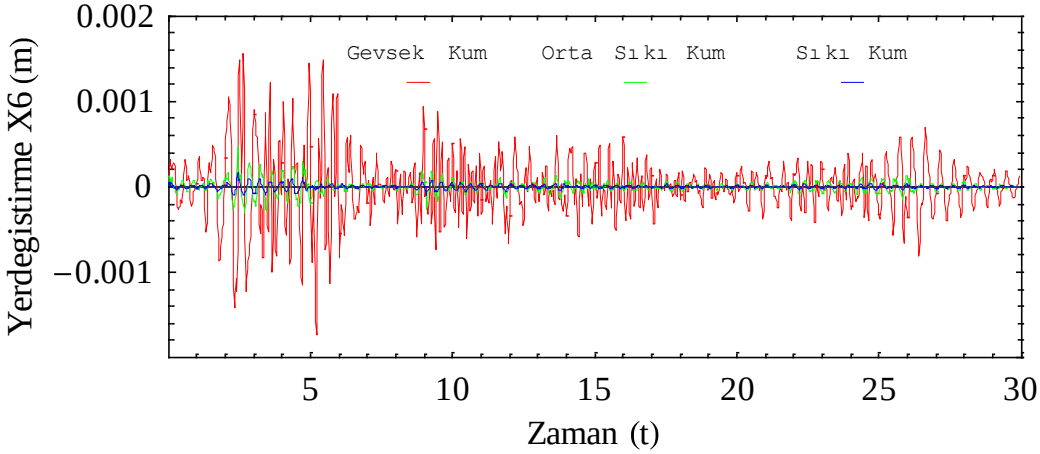
- İvme



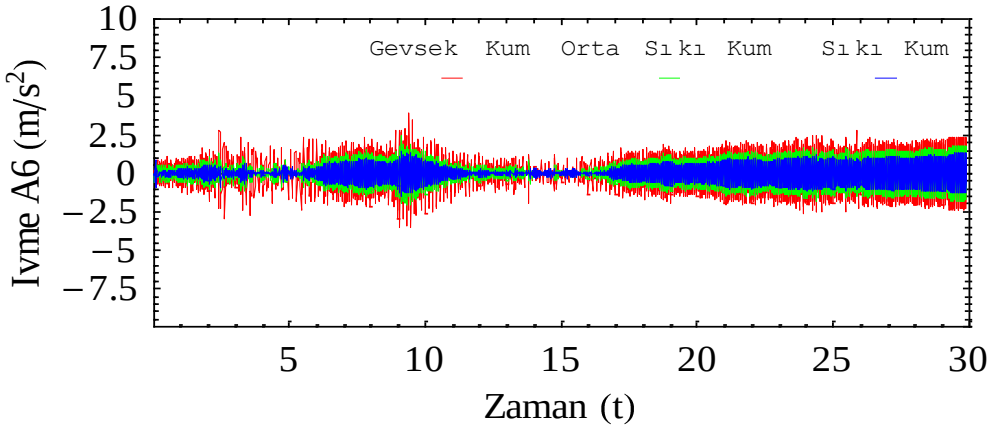
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

15.10^7 SÖNÜMLÜ

- Yerdeğiştirme



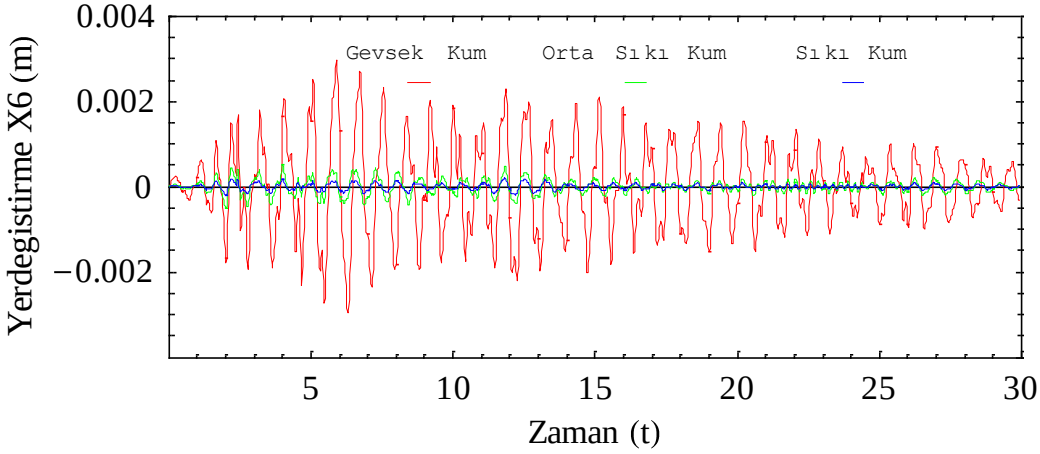
- İvme



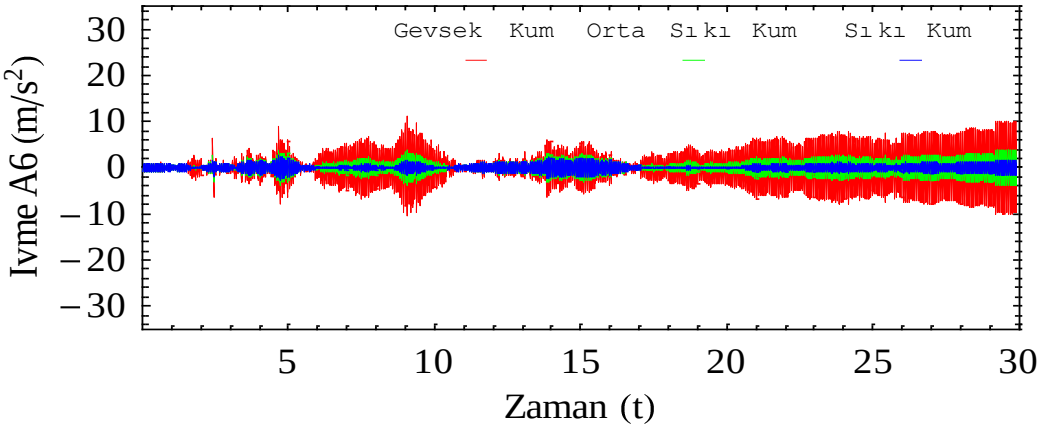
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

15.10^7 SÖNÜMSÜZ

- Yerdeğiştirme



- İvme



ÖZ GEÇMİŞ

Hilal HASMADEN, 28. 09. 1989 tarihinde Rize' de doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Rize' de tamamladı. 2008 yılında girdiği Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' nden Haziran 2012' da mezun oldu. 2012 – 2013 Öğretim Yılında Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı' nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve öğrenimine devam etmektedir.