



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPILARDA AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİN (AKS)
KULLANIMI VE ZEMİN ETKİSİ

ŞEYMA TEBERİK

Ocak 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPILARDA AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİN (AKS)
KULLANIMI VE ZEMİN ETKİSİ

ŞEYMA TEBERİK

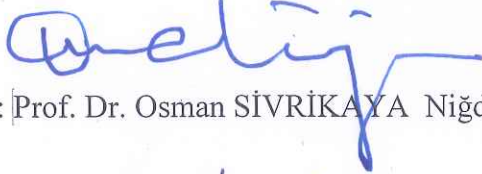
Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Ocak 2019

Şeyma TEBERİK tarafından 1. Danışman **Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA** ve 2. Danışman **Doç. Dr. Ersin AYDIN** danışmanlığında hazırlanan “Yapılarda ayarlı kütle sönümleyicilerin kullanımı ve zemin etkisi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :  Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi |

Üye :  Doç. Dr. Ersin AYDIN Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi |

Üye :  Doç. Dr. Zülküf KAYA Erciyes Üniversitesi |

Üye :  Doç. Dr. Baki ÖZTÜRK Hacettepe Üniversitesi |

Üye :  Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi |

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.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR V.

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.

ŞEYMA TEBERİK

ÖZET

YAPILARDA AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ KULLANIMI (AKS) VE ZEMİN ETKİSİ

TEBERİK, Şeyma

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Birinci Danışman : Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

İkinci Danışman : Doç. Dr. Ersin AYDIN

Ocak 2019, 133 sayfa

Bu çalışmada kayma çerçevesi olarak modellenen bina tipi bir yapının tepesine yerleştirilen ayarlı kütle sönümleyicisinin (AKS), optimum parametreleri farklı zemin durumlarına göre araştırılmıştır. Optimum parametreler zeminin rijit, sıkı kum, orta sıkı kum ve gevşek kum olması durumları için hesaplanmıştır. Optimizasyon aşamasında literatürde rijit zemin durumu için verilen bir optimizasyon yöntemi, hem rijit hem de farklı sıklığa sahip kumlu zemin durumları için uygulanmıştır. Yapı ve zemin etkileşim modeli için yönetici denklemler kurulmuş, AKS'nin optimizasyonundan sonra, bulunan tasarımlar deprem etkisi altında incelenmiş ve kat yerdeğiştirmeleri, rölatif kat yerdeğiştirmeleri ve tepe nihai ivmesi açısından irdelenmiştir. Yapılan analizler göstermiştir ki optimum AKS tasarımları farklı zemin durumlarında, yapının davranışını iyileştirmektedir.

Anahtar sözcükler: Ayarlı kütle sönümleyici, zemin-yapı etkileşimi, kumlu zemin, sıklık

SUMMARY

USE OF TUNED MASS DAMPER (TMD) IN STRUCTURES AND SOIL EFFECT

TEBERİK, Şeyma

Nigde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Ersin AYDIN

January 2019, 133 pages

In this study, the optimum parameters of the tuned mass damper (TMD) placed at the top of a building type structure that was modeled as a shear frame were investigated according to different sand soil conditions. Optimum parameters were calculated for the rigid, dense sand, medium dense sand and loose sand. In the optimization stage, an optimization method for rigid soil conditions has been applied for both rigid and different sandy soil conditions. Governing equations have been established for the structure and soil interaction model. After the optimization of TMD, the existing designs were examined under the effect of earthquake and the floor displacements, the interstorey drifts and the top absolute acceleration were examined. Analyzes have shown that the optimum TMD design improves the behavior of the structure in different soil conditions.

Keywords: Tuned mass damper, soil-structure interaction, sandy soil, relative density

ÖN SÖZ

Gelişen şehirlerde özellikle arsaların değerli olduğu bölgelerde yüksek yapılar tercih edilmektedir. Bütün yapıların deprem ve rüzgar gibi dinamik etkilerden korunması için kullanılan ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum tasarımı inşaat mühendisliği alanında ilgi odağı olmaktadır. Bu konu yaygın olarak çalışma alanı oluşturmuş ve halen çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Zemin durumlarının AKS tasarımındaki etkileri önemlidir. Bu çalışmada deprem etkisi altındaki yapılarda AKS tasarımı ve yapının deprem davranışı farklı zemin durumları (gevşek, orta sıkı ve sıkı kum) göz önüne alınarak incelenmiştir.

Tez çalışmam süresince her türlü maddi ve manevi desteği veren babam Mehmet Yaşar TEBERİK'e, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen saygı değer hocalarım Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA'ya ve Doç. Dr. Ersin AYDIN'a, manevi desteğinin hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve değerli dostuma teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ.....	xvi
SİMGE VE KISALTMALAR	xvii
BÖLÜM I. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam	1
BÖLÜM II. ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN DİNAMİK ETKİ ALTINDA İNCELENMESİ	3
2.1 Tekrarlı Yük Altında Zemin Davranışı ve Özellikleri	3
2.1.1 Eşdeğer doğrusal modeller	3
2.1.1.1 Kayma modülü	4
2.1.1.2 Kayma modülü oranı	8
2.1.1.3 Sönüm oranı	9
2.1.2 Tekrarlı doğrusal olmayan modeller	11
2.1.3 İleri yapıcı modeller	12
2.2 Tekrarlı Yüklenen Zeminlerin Dayanımı	12
2.2.1 Yenilme tanımları	13
2.2.1.1 Devirsel dayanım	13
2.2.1.2 Tekdüze dayanım	14
BÖLÜM III. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	15

3.1 Zeminin Dinamik Özelliklerinin Ölçülmesi	15
3.2 Arazi Deneyleri	17
3.2.1 Düşük deformasyon deneyleri	18
3.2.1.1 Sismik yansıma deneyi	18
3.2.1.2 Sismik kırılma deneyi	19
3.2.1.3 Sabit durum titreşim deneyi	20
3.2.1.4 Yüzey dalgaları deneyinin spektral analizi	20
3.2.1.5 Askıda loglama deneyi	21
3.2.1.6 Kuyudan kuyuya sismik deney	22
3.2.1.7 Sismik kuyu aşağı deneyi	23
3.2.1.8 Sismik koni deneyi	24
3.2.2 Büyük deformasyon deneyleri ile	24
3.2.2.1 Standart penetrasyon deneyi (SPT)	25
3.2.2.2 Koni penetrasyon deneyi (CPT)	26
3.3 Laboratuvar Deneyleri	28
3.3.1 Düşük deformasyon deneyleri	28
3.3.1.1 Rezonant kolon deneyi	28
3.3.1.2 Ultrasonik pals deneyi	29
3.3.1.3 Piezoelektrik bender elemanı deneyi	29
3.3.2 Büyük deformasyon deneyleri	30
3.3.2.1 Tekrarlı üç eksen deneyi	30
3.3.2.2 Tekrarlı doğrudan basit kesme deneyi	31
3.3.2.3 Tekrarlı burulmalı kesme deneyi	32
3.3.3 Model deneyleri	33
3.3.3.2 Santrifüj deneyleri	33
3.3.3.1 Sarsma tablası deneyleri	33

BÖLÜM IV. ZEMİN YAPI ETKİLEŞİMİ	35
4.1 Zemin Yapı Etkileşim Problemleri	35
4.2 Zemin Yapı Etkileşim Problemlerinde Çözüm Yöntemleri	38
4.2.1 Direkt (doğrudan) yöntem	39
4.2.2 Alt sistem yöntemi	40
4.3 Viskoz Sınır Şartı.....	41
4.4 Yerel Zemin Koşulları	42
4.4.1 Zemin özelliklerinin üst yapıya etkisi.....	43
BÖLÜM V.YAPILARIN KONTROLÜ ve MODERN YAPI TASARIMI	45
5.1 Aktif Yapı Kontrolü	46
5.2 Pasif Yapı Kontrolü	47
5.3 Karma (Hybrid) Kontrol	48
5.4 Sismik Yalıtım	48
5.4.1 Sismik yalıtımın sağladığı avantajlar.....	49
BÖLÜM VI. AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ (AKS)	51
6.1 Ayarlı Kütle Sönümleyiciler Üzerine Yapılan Çalışmalar	52
6.2 AKS'nin Dünyadaki Örnek Uygulamaları	56
6.2.1 John Hancock Tower	56
6.2.2 Citicorp Center.....	57
6.2.3 Canadian National Tower	58
6.2.4 Chiba Port Tower.....	59
6.2.5 Crystal Tower	61
6.2.6 London Millenium Bridge	62
6.3 Yapıya Etkiyen Deprem ve Rüzgar Yüklerinde AKS Kullanımı	63
6.3.1 Rüzgar etkisinde AKS kullanımı	63
6.3.2 Deprem etkisinde AKS davranışı	64
6.3.3 Çoklu AKS'ler (ÇAKS)	65

6.4 Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin Teorik Esasları	66
6.4.1 AKS'lerin tek serbestlik dereceli (SDOF) sistemlerde incelenmesi	66
6.4.1.1 Sönümsüz ana kütle ve sönümsüz AKS	67
6.4.1.2 Sönümsüz ana kütle ve sönümlü AKS	70
6.4.1.3 Sönüm içeren ana kütle ve sönüm içeren AKS	79
6.4.1.4 Çok serbestlik dereceli sistemlerin AKS tasarımı	83
BÖLÜM VII. AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ DAĞILIMINA ZEMİN ETKİSİ....	87
7.1 Problemin Formülasyonu	87
7.2 Sayısal Örnek.....	92
7.2.1 Analizler ve Yorumlar	93
7.2.1.1 Optimizasyon.....	93
7.2.1.2 Zaman tanım alanında deprem analizi	94
BÖLÜM VIII SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	105
KAYNAKLAR.....	107
Ekler	118
ÖZ GEÇMİŞ.....	133

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	10
Çizelge 3.1. v_s ile SPT-N değeri arasındaki korelasyonlar	26
Çizelge 3.2. v_s ile q_c arasındaki ilişkiler.....	27
Çizelge 4.1. Zemin büyütme oranlarının zemin türlerine göre değişimi.....	43
Çizelge 5.1. Yapı kontrol sistemlerinin sınıflandırılması	46
Çizelge 7.1. Uygulamada kullanmak üzere seçilen v_s , v , G , ρ değerleri	92

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	6
Şekil 2.4. Plastisitesi farklı ince daneli zeminlerin modül azalım eğrileri.....	8
Şekil 2.5. İnce daneli zeminlerin sönümleme oranlarının devirsel kayma birim deformasyonu ve plastisite indisi ile değişimi	10
Şekil 2.6. Zeminlerin sönüm oranının birim kayma seviyesi ile değişimi	11
Şekil 2.7. Kumlu ve killi zeminlerde “sönüm” ile “kayma deformasyonu” arasındaki ilişki.....	11
Şekil 2.8. Ortalama ve devirsel kayma gerilmesi ile kayma birim deformasyonunun tanımları	13
Şekil 2.9. Değişik zeminlerin devirsel dayanım oranının devir sayısı ile değişimi	14
Şekil 3.1. Değişen deformasyon seviyelerinde değişik geoteknik yapılar, arazi ve laboratuvar deneylerinin Kayma Modülüne (G) etkisi	16
Şekil 3.2. Sismik jeofizik deneyleri için darbesel örselenme geliştirmenin değişik yöntemleri: Sığ derinlikte patlama (a), düşey çarpma (b) ve yatay çarpma(c).....	18
Şekil 3.3. Gelen ve yatay katman sınırından yansıyan P dalgasının ışın izi (a) ve doğrudan ve yansımış dalgaların varış zamanlarındaki değişim (b)	19
Şekil 3.4. Sismik kırılma deney düzeneği	19
Şekil 3.5. Dinamik olarak titreşen bir pabucun yakınında zemin yüzeyinde Rayleigh dalgasından kaynaklanan deformasyon	20
Şekil 3.6. Bir YDSA deneyinde kaynak ve alıcıların tipik düzeni.....	21
Şekil 3.7. YDSA testinden deneysel dispersiyon eğrisi	21
Şekil 3.8. Askıda Loglama deneyi	22
Şekil 3.9. Kuyudan kuyuya sismik deneyi: iki kuyu düzenini kullanarak doğrudan ölçüm (a) ve üç kuyu düzenini kullanarak aralık ölçümü (b)	23
Şekil 3.10. Sismik kuyu yukarı (a) ve sismik kuyu aşağı deneyi (b)	23

Şekil 3.11 San Fransisco Körfez bölgesinde bir kuyu aşağı deneyine ait varış zamanı eğrisi	24
Şekil 3.12. SPT numune alıcı (a) ve SPT örtü kalınlığı düzeltme faktörü (b)	25
Şekil 3.13. Sismik koni özelliği de olan tipik CPT (Baldi vd., 1988) (a) ve CPT deneyinden elde edilen kayıtlar (b)	27
Şekil 3.14. Tipik Rezonant kolon deney düzeneği: yükleme sisteminin tepeden görünümü (a) ve yükleme sistemi ve zemin numunesinin profil görünümü (b).....	29
Şekil 3.15. Piyezoelektrik bender elemanı. Pozitif voltaj elemanın bir tarafa; negatif voltajda da diğer tarafa eğilmesine neden olur.....	30
Şekil 3.16. Tipik üç eksenli düzeneği	31
Şekil 3.17. NGI tekrarlı basit kesme düzeneği. Zemin numunesi tek donatılı kauçuk membran içindedir.....	32
Şekil 3.18. İçi boş silindir düzeneği	32
Şekil 3.19. Dinamik zemin basıncı deneyinde kullanılan zemin hazneli sarsma tablası	34
Şekil 3.20. Bir geoteknik santrifüjünün enine kesiti	34
Şekil 4.1. Zemin-Yapı etkileşiminin incelenmesi için değişik modeller	36
Şekil 4.2. Dinamik Sınırsız Ortam-Yapı Etkileşimi.....	37
Şekil 4.3. Katlı bir sistemde zeminin rijit (a) ve zemin kayma dalgası hızı 50 m/s olması durumunda ilk beş mod şeklinin ve frekansının değişimi (b).....	38
Şekil 4.4. Zemin modelleme şekilleri	39
Şekil 4.5. Direkt Yöntem’de sınır şartları	40
Şekil 4.6. Alt sistem yöntemi	41
Şekil 5.1. Aktif kontrolün şematik diyagramı	47
Şekil 5.2. Aktif kütle sönümleyicilerin yerleştirildiği Kyobashi Seiwa binası	47
Şekil 5.3. Kauçuk izolatörlerin kolonlarda uygulama yerleri	49
Şekil 5.4. Sismik izolatörlerin kolon altına montaj detayı	49
Şekil 6.1. Yapıya ilave sönüm sağlayan pasif sönümleyici sistemlerinin teorik olarak binanın tepesine bağlanarak kullanılması ve binanın tepesine AKS yerleştirilerek yapıyı kontrol etme düşüncesi	51
Şekil 6.2. Çeşitli AKS tipleri.....	52
Şekil 6.3. Tek serbestlik dereceli AKS modeli	52
Şekil 6.4. Kazıklı temele sahip esnek alt ve üst yapının birlikte modeli	55
Şekil 6.5. Üst katta yerleştirilen kütleli sönümleyici yay sistemi ile zemin yüzeyinin birlikte modeli	55

Şekil 6.6. Zemin ile yapının birlikte modellenmesi	56
Şekil 6.7. Çok katlı bir yapının en yüksek noktasına AKS yerleştirilmesi	63
Şekil 6.8. Binanın en tepesine yerleştirilmiş SDOF bir sistemde ÇAKS yerleşimi	65
Şekil 6.9. AKS ve elemanları.....	66
Şekil 6.10. AKS bağlanmış tek serbestlik dereceli sistem	67
Şekil 6.11. Sönümsüz yapı, sönümlü AKS'li sistem modeli	70
Şekil 6.12. H_2 'nin g 'ye göre optimum olmayan değişimi	73
Şekil 6.13. f_{opt} değeri için H_2 değerinin g 'ye göre değişimi.....	75
Şekil 6.14. f_{opt} değerinin kütle oranına göre değişimi	76
Şekil 6.15. $g_{1,2,opt}$ değerinin kütle oranına göre değişimi	77
Şekil 6.16. AKS için optimum sönüm oranının kütle oranına göre değişimi.....	77
Şekil 6.17. Maksimum dinamik büyütme faktörünün optimum parametreler için kütle oranına göre değişimi	77
Şekil 6.18. ξ_e değerinin, kütle oranı μ 'ye göre değişme miktarı.....	78
Şekil 6.19. Sönüm içeren ana kütle ve sönüm içeren AKS modeli	80
Şekil 7.1. Zemin-yapı profili.....	87
Şekil 7.2. Yapı modelinin deformasyon şekli	88
Şekil 7.3. Yapı-zemin etkileşimli 5 katlı ayarlı kütle sönümleyici modeli	92
Şekil 7.4. Dinamik büyütme faktörünün zemin sınıfına göre optimum dağılımı	94
Şekil 7.5. El Centro deprem datası	94
Şekil 7.6. Rijit durumda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li rölatif yerdeğiştirme dağılımı .	95
Şekil 7.7. Gevşek kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li rölatif yerdeğiştirme dağılımı.....	96
Şekil 7.8. Orta sıkı kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li rölatif yerdeğiştirme dağılımı.....	96
Şekil 7.9. Sıkı kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li rölatif yerdeğiştirme dağılımı.....	96
Şekil 7.10. Rijit durumda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li yerdeğiştirme dağılımı.....	97
Şekil 7.11. Gevşek kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li yerdeğiştirme dağılımı.....	97
Şekil 7.12. Orta sıkı kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li yerdeğiştirme dağılımı.....	98
Şekil 7.13. Sıkı kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li yerdeğiştirme dağılımı.....	98

Şekil 7.14. Rijit durumda 5. Katta sönümsüz ve AKS'li ivme dağılımı.....	98
Şekil 7.15. Gevşek kumlu zemin durumunda 5. Katta sönümsüz ve AKS'li ivme dağılımı.....	99
Şekil 7.16. Orta sıkı kumlu zemin durumunda 5. Katta sönümsüz ve AKS'li ivme dağılımı.....	99
Şekil 7.17. Sıkı kumlu zemin durumunda 5. Katta sönümsüz ve AKS'li ivme (tepe) dağılımı.....	99
Şekil 7.18. Farklı sıklığa sahip zemin durumlarına göre sönümsüz ve AKS'li maksimum yerdeğiştirme dağılımı.....	100
Şekil 7.19. Farklı sıklığa sahip zemin durumlarına göre sönümsüz ve AKS'li maksimum rölatif yerdeğiştirme dağılımı.....	102
Şekil 7.20. Farklı sıklığa sahip zemin durumlarına göre sönümsüz ve AKS'li 5. Kattaki maksimum ivme dağılımı.....	103

FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 6.1. John Hancock Tower.....	57
Fotoğraf 6.2. Citicorp Center	58
Fotoğraf 6.3. Canadian National TV Tower	59
Fotoğraf 6.4. Chiba Port Tower	60
Fotoğraf 6.5. Chiba Port Tower'daki AKS Sistemi.....	60
Fotoğraf 6.6. AKS Sistemin Yaylarındaki Şekil Değişirme.....	61
Fotoğraf 6.7. Crystal Tower.....	61
Fotoğraf 6.8. Buz Depolama Tankı, Crystal Tower.....	62
Fotoğraf 6.9. Ayarlı Kütle Sönümleyici Uygulaması, Millenium Bridge	63

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

Açıklama

A	: Etkili alan
c	: Efektif sönüm
C	: Sistemin sönüm matrisi
C_B	: Yapının sönüm matrisi
C_d	: AKS'nin 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	: Materyal 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	: Ana kütlelerin yay katsayısı matrisi
k_d	: AKS'nin yay katsayısı
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_d	: AKS'nin kütlesi
N	: Tekrarlı yük sayısı
p_0	: 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
$\mathbf{r}$	: 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
$\bar{u}$	: Ana kütlelin yerdeğiştirme vektörünün genliği
u_6	: Yapının zeminden kaynaklanan yatay yerdeğiştirme
u_7	: Temel dönmesinden kaynaklanan açısal yerdeğiştirme
$U(t)$	: Zaman bağlı yerdeğiştirme
$U_{da}(\omega)$	: Yerdeğiştirme vektörünün Fourier dönüşümü
v_s	: Zeminin kayma dalga hızı
W	: Toplam sönüm
X	: Transfer fonksiyonu
X_5	: Tepedeki görelı yerdeğiştirme
X_6	: Zeminin yatay yerdeğiştirme
X_7	: Zeminin açısal yerdeğiştirme
α	: Empedans katsayısı
ω	: Ana kütlelin doğal frekansı
ω_d	: AKS'nin doğal frekansı
ϕ	: Faz farkı
γ	: Tekrarlı deformasyonun büyüklüğü
$\dot{\gamma}$	: Birim deformasyon hızı
γ_c	: Kayma birim deformasyon genliği
ζ_0	: Yapısal sönüm
ξ	: AKS'nin doğal frekansının ana kütlelin doğal frekansına
ξ_d	: AKS'nin sönüm oranı
$\xi_{d\ opt}$	: AKS'nin sönüm oranının optimum değeri
$g_{12\ opt}$	: Dışarıdan ana kütlele uygulanan kuvvetin doğal frekansına oranının optimum değeri

f	: AKS'nin frekansının ana kütlenin frekansına oranı
μ	: Kütle oranı
g	: Dış etki frekansının ana kütlenin doğal frekansına oranı
H_2	: Transfer fonksiyonu, dinamik büyütme faktörü
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
$\dot{u}$	: Hız vektörü
$\ddot{u}$	: İvme vektörü
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
AKS	: Ayarlı Kütle Sönümleyici
ÇAKS	: Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici
SDOF	: Tek Serbestlik Dereceli Sistem

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Dünya nüfusunun günden güne artması, köyden kente göçüşün hızla devam etmesi ve bununla beraber yaşanılabilir alanların kısıtlı ve maliyetli olması nedeniyle artan konut ihtiyacını karşılamak amacıyla çok katlı ve geniş kütleli yapıların artması birçok sorunu da beraberinde getirmiştir.

Depreme dayanıklı yapı tasarımında temel amaç; güvenlik, hizmet ve konfor şartlarını sağlamaktır. Yapı teknolojisi ne kadar ilerlerse ilerlesin, deprem bölgelerinde ileri yapı teknolojisinin yanında deprem içinde ekstra bir önlem alınmalıdır. Gelişen teknoloji ve ihtiyaç duyulan önlemler göz önüne alındığında yer hareketlerinin meydana getirdiği enerjiyi sönmölemek için çeşitli kontrol mekanizmaları oluşturulmuştur.

Deprem esnasında yapıya gelen kuvvetler, yapının rijitliğinin değıştiğı kolon-döşeme birleşimlerine etki etmektedir. Bu hassas noktalarda yapının kütle ve rijitlik merkezlerinin çakışmasına bağılı olarak, deprem etkisi ile rölatif kat ötelemelerini minimize etmek amacıyla, temel ile temele bağılı kolonlar arasında sönmöleyici elemanlar kullanılması bilinen bir çözüm yöntemidir.

Deprem etkisi altındaki yapı tasarımının son yıllarda çok ilgi görmesi ve gerçekten bir ihtiyaç olması, yapıların dış etkilere karşı rijitlik, dayanım ve özellikle sönmö özelliklerini değıştiren; pasif, aktif ve yarı aktif sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu elemanların optimizasyonları pek çok bilimsel çalışmaya konu olmaktadır. Pasif sönmöleyicilerin optimizasyonu hem yapısal davranışın daha iyileştirilmesi, hem de 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; AKS'lerin optimizasyon yöntemlerine ek olarak zemin etkileri; gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zeminler göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca deprem etkisi altındaki yapılarda AKS tasarımı ve yapının deprem davranışı farklı zemin durumları (gevşek, orta sıkı ve sıkı kum) göz önüne alınarak incelenmiştir. Yani ayarlı kütle sönümleyicilerin tasarımında zeminlerin davranışı da göz önüne alınarak tasarım yapılmıştır. Optimum tasarım da literatürde verilen yöntemler, ampirik denklemler ve analitik yöntemler kullanılmıştır.

Bu tez çalışması, sekiz bölümden oluşmakta olup; birinci bölümde tezin amacı ve kapsadığı alanlar, ikinci bölümde zemin özelliklerinin dinamik etki altında incelenmesi, üçüncü bölümde zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi, dördüncü bölümde zemin yapı etkileşimi problemlerini ifade edilmesi ve çözüm yöntemleri, beşinci bölümde yapıların kontrolü ve modern yapı tasarımı, altıncı bölümde ayarlı kütle sönümleyiciler ve dünyadaki örnek uygulamaları, yedinci bölümde ayarlı kütle sönümleyici dağılımına zeminin etkisini gösteren bir uygulama, sekizinci bölümde ise sonuç ve önerilerden bahsedilmektedir.

BÖLÜM II

ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN DİNAMİK ETKİ ALTINDA İNCELENMESİ

2.1 Tekrarlı Yük Altında Zemin Davranışı ve Özellikleri

Depremlerin sebep olduğu hasarın dağılımı ve karakteri üzerinde zeminlerin tekrarlı yüklere verdiği tepkinin önemli bir etkisi vardır. Bu etki daha çok zeminin mekanik özellikleri ile kontrol edilir. Geoteknik deprem mühendisliği, değişik yükleme şekli ve birçok mekanizmadan oluşan, geniş bir aralıktaki problemleri kapsar ve zemin özelliklerindeki değişim, problemlerdeki zemin davranışını da etkiler. Dinamik yüklere maruz kalan zeminlerin davranışı da zeminin dinamik özellikleri tarafından kontrol edilmektedir. Deprem veya dalga yükleri gibi tekrarlı yüklemelere altında zemin davranışının incelenmesinde, zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesi önemli bir faktördür (Kramer, 2003).

Zeminin dinamik özellikleri; gerilme ve yoğunluğun yanında zeminin yapısı, gerilme deformasyon geçmişi, zeminin oluşum süreci ve zeminde meydana gelen çimentolanma gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Laboratuvar deneylerinden elde edilen verilere göre zemin rijitliği; boşluk oranı (e), plastisite indisi (I_p), aşırı konsolidasyon oranı (AKO), tekrarlı yük sayısı (N), tekrarlı birim deformasyon genliği (λ) ve ortalama asal efektif gerilme (σ'_{ort}) gibi faktörlere bağlıdır. Tekrarlı yük altında zemin davranışının daha iyi tanımlanması için üç model geliştirilmiştir; eşdeğer doğrusal model, tekrarlı doğrusal olmayan model ve ileri yapıcı modeldir (Kramer, 2003).

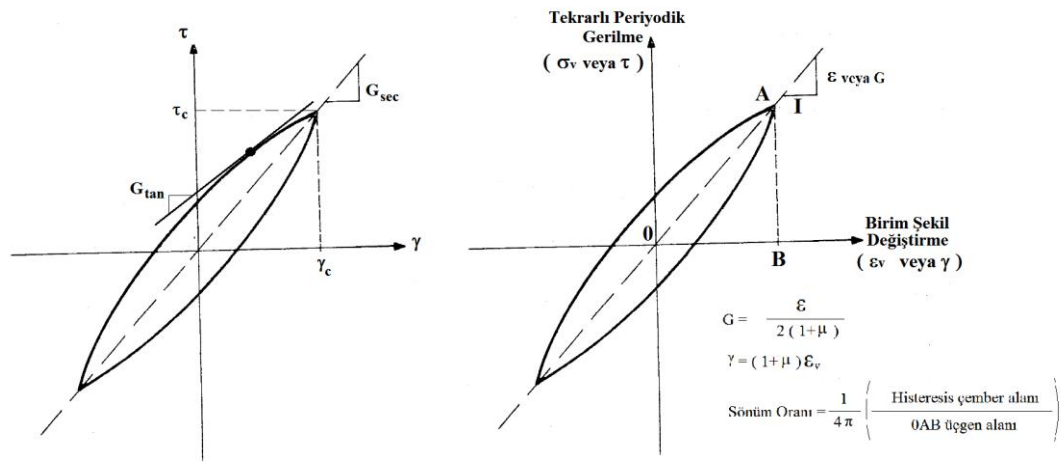
2.1.1 Eşdeğer doğrusal modeller

Yapının olmadığı düz bir arazide, simetrik tekrarlı yüklere maruz kalmış bir zemin, histerisis döngüsü sergileyebilir (Şekil 2.1). Eşdeğer doğrusal model, bu bahsedilen histerisis döngüsünün en önemli iki özelliğinin eğim ve genişlik olduğunu ifade etmektedir. Bu histerisis döngüsü iki şekilde tanımlanmaktadır; birincisi döngünün gerçek iziyle, ikincisi genel şekli tanımlayan parametreler yoluyla. Döngünün

eğimi, yükleme işlemi sırasında herhangi bir noktada tanjant kayma modülü (G_{tan}) ile tanımlanan, zeminin rijitlik derecesine bağlıdır. Kayma modülü (G_{tan}), bir döngünün her yerinde farklı bir değere sahiptir. Ancak bu durum hesaplamalarda karmaşık bir hal alacağı için, döngünün tamamının ortalama sekant kayma modülü (G_{sec}) ile yaklaşık bir değer belirlenebilmektedir ve kayma gerilmesi (τ_c), kayma birim deformasyon genliği (γ_c) olmak üzere;

$$G_{sec} = \tau_c / \gamma_c \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Eşdeğer doğrusal model yaklaşık bir model olduğundan gerilme ve kalıcı deformasyon problemlerinde kullanılmamaktadır. Bu model, tekrarlı yüklemelerden sonra birim deformasyonunun her zaman sıfıra döneceğini ifade etmektedir (Şekil 2.1).



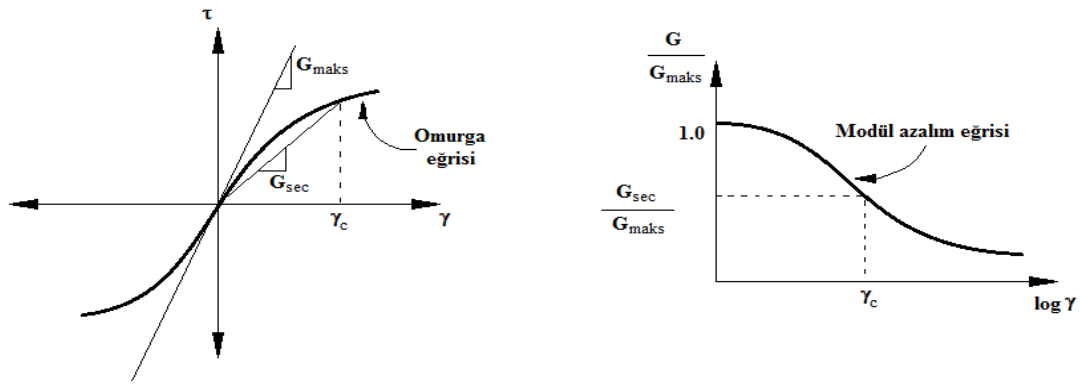
Şekil 2.1. Kayma modülleri ve sönüm oranı (Özaydın, 1982)

Bu model tekrarlı yüklerden sonra birim deformasyonun her zaman sıfıra döneceğini ifade etse de, deneysel araştırmalar sönüm oranının hiçbir zaman sıfır olmadığını ve deformasyon genliği ile arttığını göstermiştir (Kamer,2003).

2.1.1.1 Kayma modülü (G)

Zemin rijitliğini etkileyen faktörler; boşluk oranı (e), rölatif sıkılık (D_r), ortalama asal efektif gerilme (σ'_o), plastisite indisi (I_p), efektif gerilme (σ'_v), tekrarlı deformasyonun

büyüklüğü (γ), aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ve tekrarlı yük sayısı (N) olduğu laboratuvar deneyleri ile ispatlanmıştır (Çizelge 2.1). Bir zemin elemanın sekant kayma modülü (G_{sec}), kayma deformasyonunun büyüklüğüne bağlı olarak, değişiklik göstermektedir. Deformasyon arttıkça sekant kayma modülü (G_{sec}) azalır. Omurga eğrisi; farklı deformasyon büyüklüklerine ait histeresis halkalarının uç noktalarının oluşturduğu geometrik eğridir. Omurga eğrisinin orijindeki eğimi, kayma modülünün maksimum (G_{maks}) değerine karşılık gelir. Deformasyonun artması demek kayma modülü oranının (G/G_{maks}) 1'den daha düşük değere sahip olması demektir (Şekil 2.2). Maksimum kayma modülü (G_{maks}) ve kayma modülü oranını (G/G_{maks}), zemin elemanı rijitliğinin tamamlanmasında deformasyona ve diğer parametrelere göre değişiminin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Kramer, 2003).

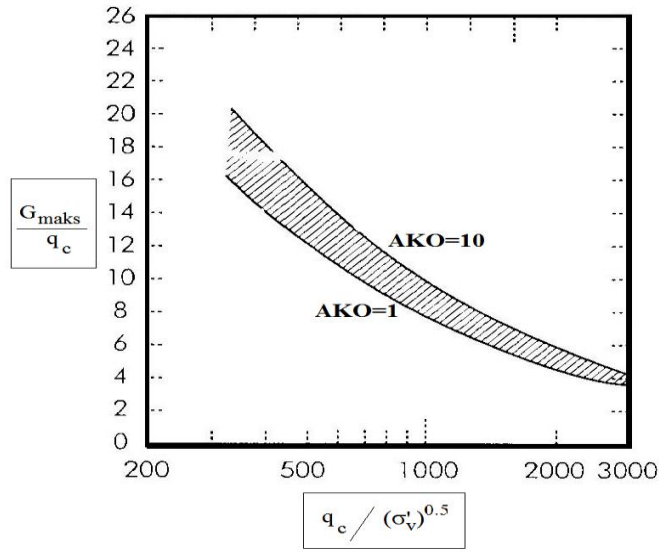


Şekil 2.2. G_{sec} 'in kayma birim deformasyonu ile tipik değişimini gösteren omurga eğrisi (Kramer, 2003)

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 2.1. 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.



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

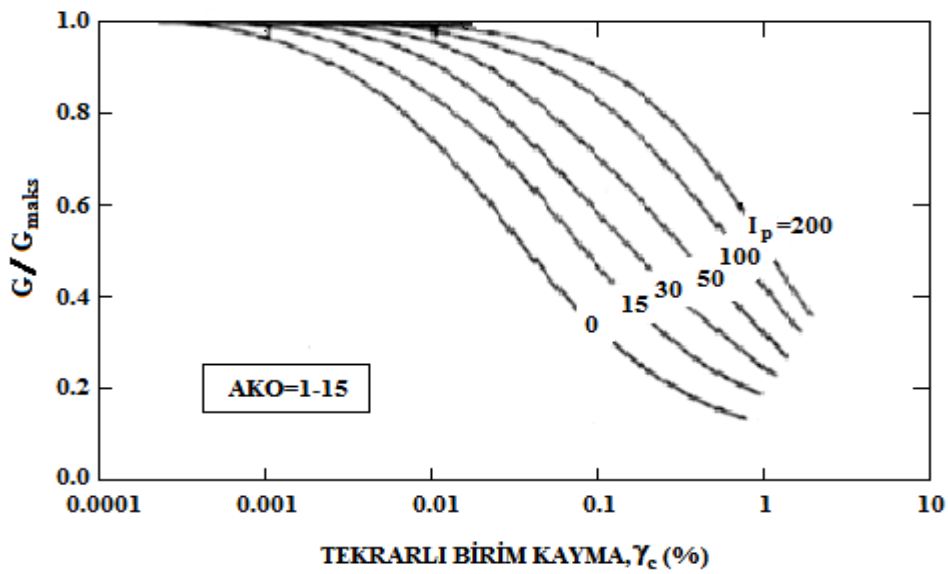
Çizelge 2.2. G_{maks} ile arazi deney parametreleri arasındaki ampirik ilişkiler (Kramer, 2003)

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 σ'_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 σ'_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 σ'_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 σ'_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
	$G_{maks} = \frac{530}{(\sigma'_v / p_a)^{0.25}} \frac{\gamma_D / \gamma_w - 1}{2,7 - \gamma_D / \gamma_w} K_0^{0.25} (p_a \sigma'_v)^{0.5}$	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	$3,6 \leq (G_{maks} / G_{ur,c}) \leq 4,8$	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

2.1.1.2 Kayma modülü oranı (G/G_{maks})

Geoteknik deprem mühendisliğinin ilk zamanlarında kaba ve ince daneli zeminlerin kayma modülündeki azalış davranışının farklı olduğu düşünülmektedir (Seed ve Idriss, 1970). Fakat son zamanlarda yapılan çalışmalar, plastik olmayan kaba daneli zeminler ile plastik ince daneli zeminlerin davranışları arasında aşamalı bir geçiş olduğunu göstermektedir.

Zeminin plastisitesinin kayma modülündeki azalış eğrisinin şeklini ilk kez Zang vd. (1972) ile Kokusho vd. (1982) ortaya koymuşlardır. Daha sonra çok çeşitli malzemelerin deneysel sonucunun incelenmesiyle, Darby ve Vucetic (1987) ile Sun vd. (1988) kayma modülünün azalış eğrisinin şeklinin, boşluk oranı (e) ve plastisite indisinden (I_p) etkilendiği sonucuna varmıştır (Şekil 2.4).



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

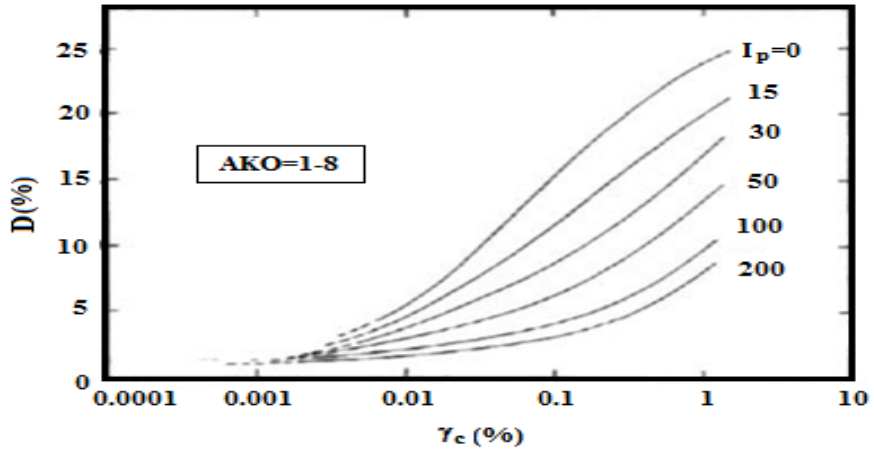
Dış etkilerin normal ve aşırı konsolide zeminlerde kayma modülü oranı üzerindeki etkilerinin kısa bir özeti Çizelge 2.3' de verilmiştir.

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
Etkilenmez	Etkilenmez
Aşırı konsolidasyon oranı, I_p	I_p ile artar
AKO	γ_c ile azalır
Plastisite indisi, I_p	$\dot{\gamma}$ ile G artar fakat G ve G_{maks} aynı $\dot{\gamma}$ 'da ölçülürse G/G_{maks} muhtemelen etkilenmez.
Tekrarlı birim deformasyon, γ_c	Killerde büyük γ_c 'nin N kez tekrarından sonra azalır (G_{maks} N devirden önce ölçülür), kumlarda (drenajlı şartlarda) artabilir veya (drenajsız şartlarda) azalabilir.
Birim deformasyon hızı, $\dot{\gamma}$	
Tekrarlı çevrim sayısı, N	

2.1.1.3 Sönüm oranı (D)

Teoride birim deformasyonda enerjinin histerisis sönümlenmesi söz konusu değildir. Ama deneyler sonucu çok düşük deformasyon seviyelerinde bazı enerji sönümlemesinin olduğunu göstermektedir. Bu nedenle sönümleme oranı hiçbir zaman sıfır değildir. Kayma modüllü davranışı plastisite özelliklerinden nasıl etkileniyorsa sönümleme davranışları da aynı şekilde etkilenir (Kokusho vd. , 1982; Dorby ve Vucetic 1987; Sun vd. ,1988). Sönüm oranı (D %); boşluk oranı (e), efektif gerilme (σ_v'), rölatif sıkılık (D_r), tekrarlı deformasyonun büyüklüğü (γ), aşırı konsolidasyon oranı (AKO), ortalama asal efektif gerilme (σ_m'), plastisite indisi (I_p), ve tekrarlı çevrim sayısı (N) gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterir. Plastisitesi yüksek olan zeminlerin sönüm oranı daha düşüktür (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. İnce daneli zeminlerin sönümleme oranlarının devirsel kayma birim deformasyonu ve plastisite indisi ile değişimi (Vucetic ve Dobry, 1991)

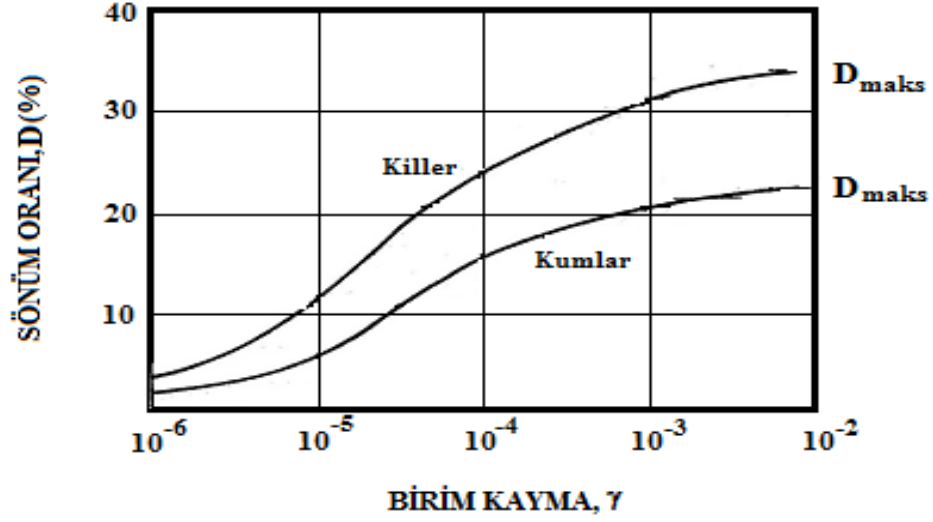
Beş tür sönüm bulunmaktadır. Bunlar; viskoz sönüm, yapısal sönüm, negatif sönüm, geometrik sönüm ve coulomb sönümdür. Bu sönüm türleri malzemenin iç yapısı ve özellikleriyle ilişkili olarak belirlenmektedir (Özaydın,1982).

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

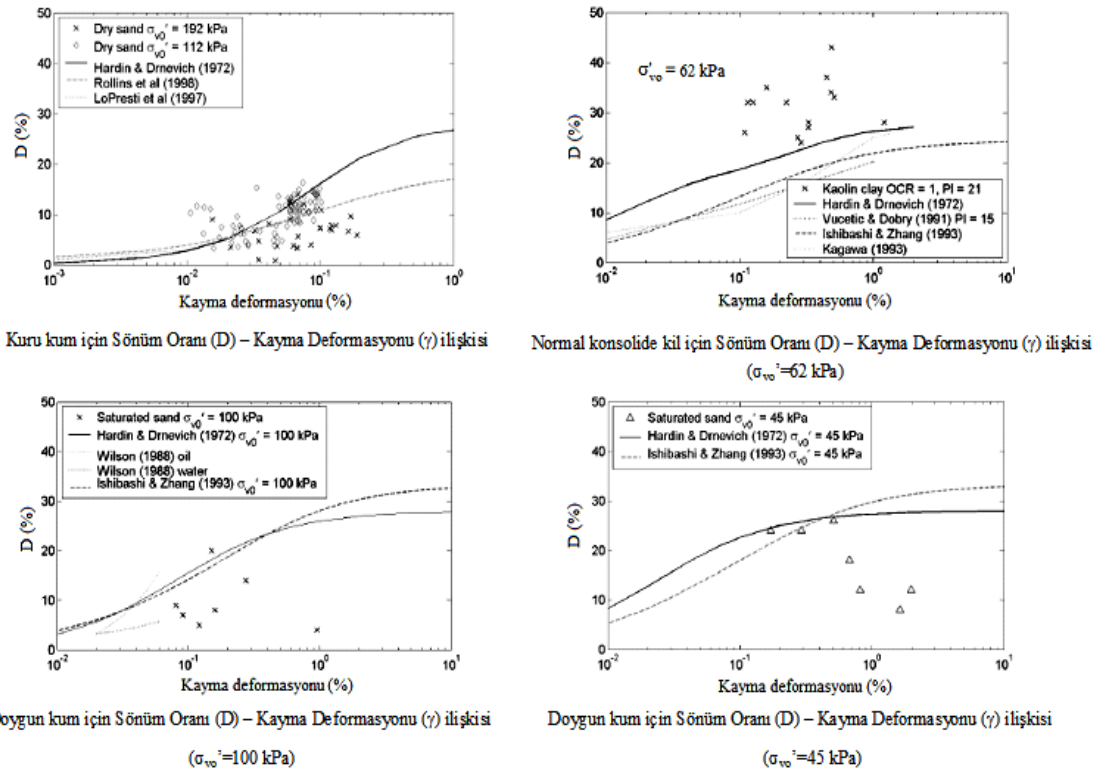
Çizelge 2.4. Dış etkilerin (belirli bir birim deformasyon seviyesinde) normal ve aşırı konsolide zeminlerde sönümleme oranı üzerine etkisi (Kramer, 2003)

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 artar. Bu orandaki değişim kil ve kumlar için deneysel veriler sonucu elde edilen eğrilerle ortaya konulabilmektedir (Şekil 2.6 ve 2.7).



Şekil 2.6. Zeminlerin sönüm oranının birim kayma seviyesi ile değişimi (Özaydın, 1982)



Şekil 2.7. Kumlu ve killi zeminlerde “sönüm” ile “kayma deformasyonu” arasındaki ilişki (Brennan vd., 2004)

2.1.2 Tekrarlı doğrusal olmayan modeller

Zeminin doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon davranışı, tekrarlı yükleme esnasında gerilme-birim deformasyonunu takip eden tekrarlı doğrusal olmayan

modellerle, doğruluğu yüksek oranda belirlenebilmektedir. Bu modeller boşluk suyu basıncıyla beraber, drenajsız tekrarlı yükleme etkisi altında efektif gerilmedeki değişiminde ortaya konulmaktadır. Tekrarlı doğrusal olmayan modellemede düzensiz yükleme, yoğunlaşma ve boşluk suyu basıncındaki değişimler modellenmeye çalışılmıştır. Bu modelleme eşdeğer doğrusal modellemeye göre daha avantajlı olduğu kabul edilmektedir. Bu avantajlardan en önemlisi; boşluk suyu basıncındaki değişimin ve dolayısıyla efektif gerilmedeki değişimlerin hesaplanabilmesidir. Tekrarlı doğrusal olmayan modeller zemin tepkisini hesaplamada kullanıldığında; deprem sarsıntısı öncesinde, esnasında ve sonrasında oluşan boşluk suyu basıncının dağılımının, oluşumunun ve sönümlenmesinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu, zeminde meydana gelebilecek sıvılaşmanın tehlikelerini değerlendirmede oldukça önemli ve yararlı bir faktördür (Kramer, 2003).

2.1.3 İleri yapıcı modeller

Zemin davranışını belirlemede en temel ve güvenilir yöntemler ileri yapıcı modellere bağlıdır. İleri yapıcı modeller; başlangıç gerilme şartlarına, gerilme izlerinin geniş aralığına, tekrarlı veya tekrarsız yükleme, drenajlı ve drenajsız şartlar gibi daha birçok zeminin davranışını tanımlayan mekaniğin temellerine dayanmaktadır.

İleri yapıcı modeller zeminlerin tekrarlı yüklemeye tepkisini modellemede önemli bir yere sahip olsa da çok fazla parametreye ihtiyaç duyulduğu için kullanımı ve tercih edildiği alanlar sınırlıdır (Kramer, 2003).

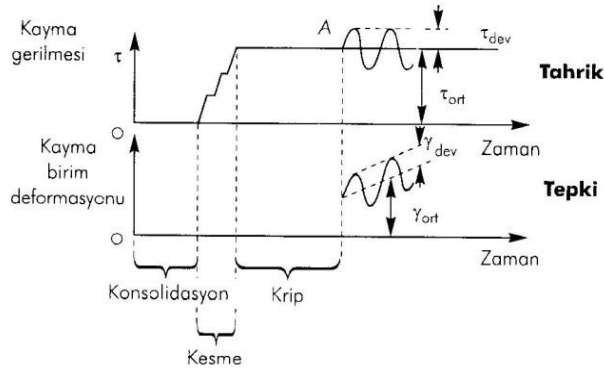
2.2 Tekrarlı Yüklenen Zeminlerin Dayanımı

Geoteknik deprem mühendisliğinde, zeminin tekrarlı yüklenmesi durumu zeminlerin sınır dayanımında önemli bir yere sahiptir. Özellikle şev stabilitesi, istinad yapıları ve temelin tasarımı gibi problemlerin çözüme kavuşturulmasında hayati öneme sahip tekrarlı yüklemenin zemin dayanımına etkisi çok iyi hakim olunması gereken bir konudur. Zemine ait davranışın incelenmesinde; kaba daneli kohezyonsuz ile ince daneli kohezyonlu zeminlerin drenajlı ve drenajsız durum altındaki numunelerini kullanmak en iyi ve sağlıklı sonuca ulaşılmasını sağlamaktadır. Kohenyonsuz

zeminlerin dayanımı sıvılaşma olayı ile doğrudan ilişkilidir ve deprem esnasında tekrarlı yüklenen zeminin dayanımı çok iyi hesaplanmalıdır (Kramer, 2003).

2.2.1 Yenilme tanımları

Tipik olarak bir zemin elemanının dayanımı “yenilme” noktasında oluşan kayma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Arazideki yenilmeler genellikle deneylerin izin verdiği ölçüde belirlenmektedir. Tekrarlı yüklenen zeminlerin dayanımı iki temel alanda ele alınır. Bunlardan ilki “Devirsel dayanım” tekrarlı yükleme sırasında tekrarlı ve/veya ortalama birim deformasyonunun sınır değerine dayalıdır. İkincisi ise “Tekdüze dayanım” tekrarlı yükleme durduktan sonra mobilize olan nihai statik dayanımdır (Şekil 2.8).

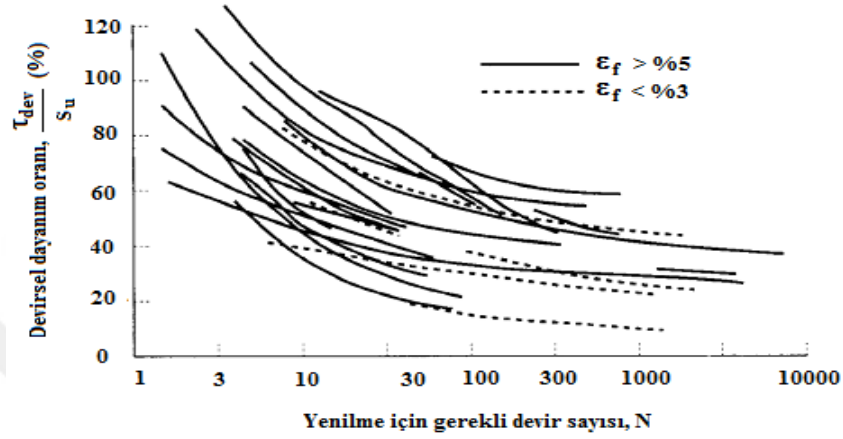


Şekil 2.8. Ortalama ve devirsel kayma gerilmesi ile kayma birim deformasyonunun tanımları (Goulois vd., 1985)

2.2.1.1 Devirsel dayanım

Geoteknik deprem mühendisliğinin birçok problemde tekrarlı ve kalıcı deformasyon seviyeleri oldukça ön plandadır. Bu kalıcı ve tekrarlı deformasyonlar denizde çok fazla dalga yüklerine maruz kalan yapıların temel tasarımında da önemlidir ve aslında bu devirsel dayanım konusundaki gelişme ve ilerlemelerin bu sahada yapılan çalışmalar ile sağlanmıştır. Bir zemin elemanının devirsel dayanımı, ortalama kayma gerilmesi τ_{ort} ile devirsel kayma gerilmesi τ_{dev} arasındaki ilişkiyle orantılıdır (Kramer, 2003).

$\tau_{ort}=0$ olduğunda tek yönlü birim deformasyon meydana gelmez ve bu durumda yenilme, tekrarlı kayma birim deformasyonu (γ_{dev}) cinsinden tanımlanmalıdır. Yenilme tanımı genelde tekrarlı kayma birim deformasyonunun yaklaşık % 3 için yapıldığında, τ_{ort}/s_u olarak tanımlanan devirsel dayanım oranı, artan devirsel sayısı ile birlikte azalır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Değişik zeminlerin devirsel dayanım oranının, devir sayısı ile değişimi (Lee ve Focht, 1976)

2.2.1.2 Tekdüze dayanım

Geoteknik deprem mühendisliğinin bir diğer önemli problemi de deprem sonrası şevlerin ve istinad duvarlarının statik duraylılığı ile temellerin kapasitesinin değerlendirilmesidir. Bu tarz problemlerde, deprem sona erdikten sonra zeminde mevcut kayma dayanımının değerlendirilmesi gerekmektedir. Deprem sonrası dayanımın, depremin sebep olduğu tüm tekrarlı yükleme etkilerini göstermesi gerektiği düşünülmektedir (Kramer, 2003).

Tekdüze dayanımdaki değişiklikler tekrarlı yükleme esnasında zeminde oluşan örselenmelerden meydana gelmektedir. Zeminin örselenme derecesi, tekrarlı deformasyonun genliği ile tekdüze yükleme etkisi altında oluşan yenilmedeki deformasyon arasındaki ilişkiden etkilenmektedir (Theirs ve Seed, 1969).

BÖLÜM III

ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

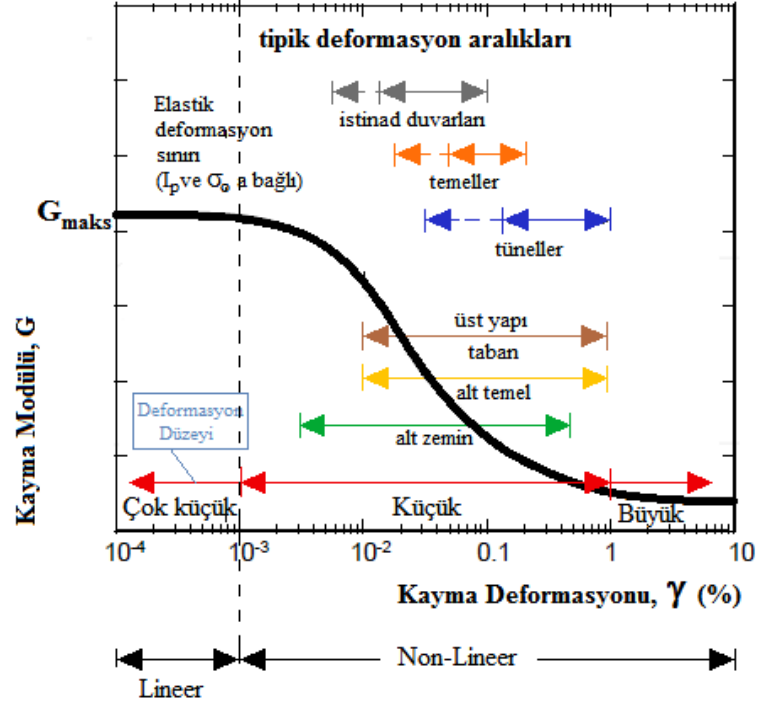
3.1 Zeminin Dinamik Özelliklerinin Ölçülmesi

Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi, geoteknik deprem mühendisliği problemlerinin çözümünde son derece önemli bir basamağı oluşturmaktadır. Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde farklı arazi ve laboratuvar deney yöntemleri mevcuttur ve her birinin uygulandığı problem türüne göre farklı üstünlük ve avantajları mevcuttur. Bu yöntemlerin bir kısmı düşük deformasyon düzeylerindeki özellikleri ölçmek için diğer bir kısmı da yüksek deformasyon düzeylerindeki özellikleri ölçebilmek için tasarlanmıştır. Zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılacak yöntemin seçiminde, üzerinde çalışılan problemin iyi tanımlanması ve analiz edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden dezavantaj gibi görünse de problem iyi tasarlanır ve uygulanırsa elde edilecek sonuçlar her zaman memnun edici olmaktadır (Şekil 3.1).

Dalga yayılmasını etkileyen zemin özellikleri ve diğer düşük deformasyon terimleri; sönümleme (D), rijitlik (G), yoğunluk (ρ) ve poisson oranını (ν) kapsar. Bu terimler arasında bir kıyaslama yapıldığında sönümleme ve rijitlik en önemli belirleyici özelliğe sahiptir. Yoğunluk ve poisson oranı ise değer olarak daha düşük bir aralığa denk geldikleri için önem sıralamasında daha geri planda kalmaktadır. Bu durum zeminlerin, doğrusal elemanlar olmadığı göz önüne alındığında sadece düşük deformasyon seviyelerinde değil, aynı zamanda orta ve yüksek deformasyon seviyelerinde de geçerlidir. Bunlara ek olarak yüksek deformasyon seviyelerinde devirsel yük sayısı ve hızının yanında hacim değişimi de önemli bir yer tutmaktadır (Kramer, 2003).

Zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde herhangi bir inceleme yapılırken, bazı özelliklerin belirsizliği göz ardı edilmemelidir. Bu belirsizliğin zeminin kendine has özelliklerinden kaynaklandığı, zeminin bulunduğu ortamın etkisi, sonradan meydana gelebilecek etkiler, sondaj ve numune alımı sırasında meydana gelebilecek örselenmeler, arazi ve laboratuvar ekipmanlarının yetersizliği, deney ve yorumlama

hatalarının olduğu unutulmamalıdır. Bu belirsizliklerin bir kısmı deney esnasında uygulama hassasiyeti ile en aza indirilmeye çalışılsada, bu bazı deneylerde ve parametrelerde mümkündür (Kramer, 2003).



		Dalga yayılımı, Titreşim	Zorlanma, Farklı oturma	Akma, Sıkışma, Sıvılaşma
Zemin davranışı		Elastik	Elasto-Plastik	Yenilme
Zemin özellikleri		Kayma Modülü (G), Poisson Oranı (ν), Sönüm (D)		İçsel sürtünme açısı, Kohezyon
Tekrarlı yük etkisi				
Yüklemeye sıklığı etkisi				
Arazi deneyleri	Sismik dalga metodu			
	Yerinde titreşim (SPT, CPT, DMT)			
	Tekrarlı yükleme			
Laboratuvar deneyleri	Dalga yayılması			
	Rezonant Kolon			
	Tekrarlı yükleme			

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

Düşük 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.

$$G_{maks} = \rho \cdot (v_s)^2 \quad (3.1)$$

3.2 Arazi Deneyleri

Arazi deneyleri doğru bir metot kullanılarak uygulanırsa, zeminin özelliklerinin yerinde ve gerçeğe en yakın haliyle belirlenmesine izin verir. Ancak burada önemli olan yeterli ekipman, uygun ortam koşulları ve bir de tecrübeli elemanın olması çok önemlidir. Zemin özelliklerinin yerinde belirlenmesinin birçok avantajı vardır;

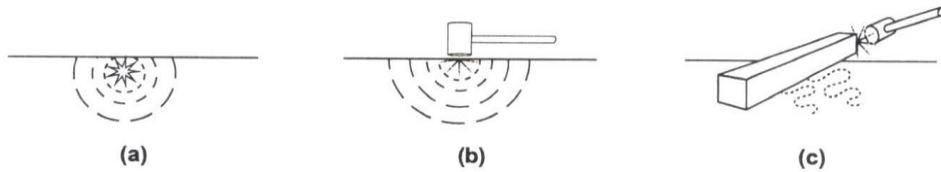
- Arazi deneylerinde numune alınmasına gerek yoktur ve dolayısıyla numune alımı sırasında yaşanan birçok olumsuzluğun, sonuçları etkilemesine izin verilmemiş olunur.
- Arazide yapılan deneylerin gerçeğe yakın değerler vermesinin en önemli etkilerinin birisi de büyük kütleler üzerinde deneyler yapılmasına olanak sağlanmaktadır.
- Çoğu arazi deneylerinin yapımı esnasında oluşan zemin deformasyonları, incelenen problemlerde ve temel tasarım problemlerindeki dalga yayılması için söz konusu olan deformasyonlar ile benzerdir. Ancak arazi deneyleri ile zeminin boşluk suyunun drenajı ölçülmemektedir. Bundan dolayı çoğu arazi deneyinde özel bir zemin özelliği ölçülemez, ama teorik analizler ve ampirik yöntemlerle dolaylı olarak tanımlanabilir.

Çoğu arazi deneyleri zemin yüzeyinde yapılabilirken, bir kısmı kuyu açılmasını veya ölçüm cihazının zemin içerisine itilmesini gerektirir. Yüzeyde yapılan deneyler genelde maliyet ve zaman açısından avantajlıdır. Sondaj ve numune alımının zor olduğu durumlarda oldukça faydalıdır. Kuyu deneylerinin en büyük avantajı, bilginin doğrudan elde edilebilmesidir. Ayrıca kuyu deneylerinin yorumlanması yüzey deneylerine kıyasla daha doğrudan bir işlemdir (Kramer, 2003).

3.2.1 Düşük deformasyon deneyleri

Düşük deformasyon deneyleri genelde zeminde küçük birim deformasyon düzeylerinde yapılır. Kayma birim deformasyonları (γ) standart olarak ortalama %0,001'in altındadır. Bunların çoğu malzemelerdeki dalga yayılma teorisine dayalıdır.

Zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan arazi deneylerinde Sismik jeofizik deneyleri önemli bir yere sahiptir. Sismik deneylerin temel mantığı; geçici ve/veya sabit durum gerilme dalgalarının oluşturulması ve bir veya daha fazla noktada yapılan ölçümlerin yorumlanması esasına dayanmaktadır. Sismik deneylerin birçoğunda, kaynakta bir dalga oluşturulur ve bunun uzaktaki varış noktalarına ulaşma süresi kaydedilir. Bu sismik deneyde kullanılan enerjinin kaynağı balyoz ile zemin yüzeyine kuvvet uygulamanın yanında gömülmüş patlayıcılar kullanımına kadar geniş bir uygulama esasına sahip kaynakta genelde P, S ve yüzey dalgaları oluşturur (Şekil 3.2). Patlayıcı kullanılan veya düşey yönde çarpma yapılan enerji kaynaklarında hâkim olan tür P dalgalarıdır. Yayılma hızı en yüksek olan dalga türü P dalgaları olduğu için bunların algılanması ve ölçülmesi oldukça kolaydır. Sismik jeofizik deneylerinin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için yeraltı suyunun ciddi bir şekilde göz önünde bulundurulması gerekir. Ancak S dalgaları P dalgalarının aksine yeraltı suyundan değil zeminin iskeleti yardımıyla yayılmaktadır (Kramer, 2003).

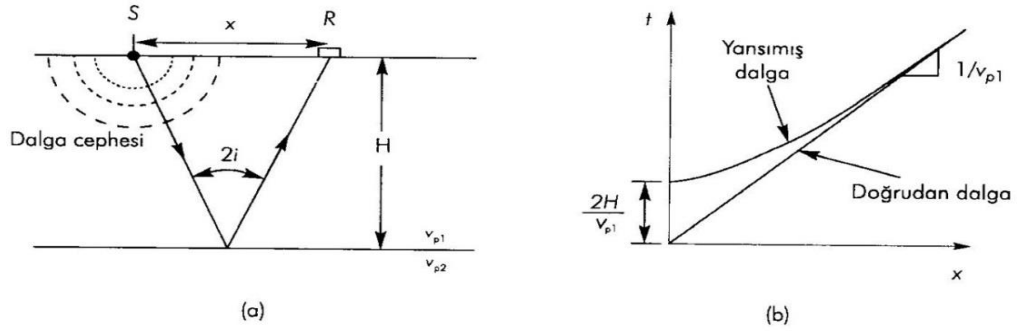


Şekil 3.2. Sismik jeofizik deneyleri için darbesel örselenme geliştirilmenin değişik yöntemleri: Sığ derinlikte patlama (a), düşey çarpma (b) ve yatay çarpma (c) (Kramer, 2003)

3.2.1.1 Sismik yansıma deneyi

Zemin tabakalarının, dalga iletim hızı ve kalınlığının yer yüzeyinin altında veya kıyı ötesi durumlarda ölçülmesine, sismik yansıma deneyleri olanak sağlamaktadır.

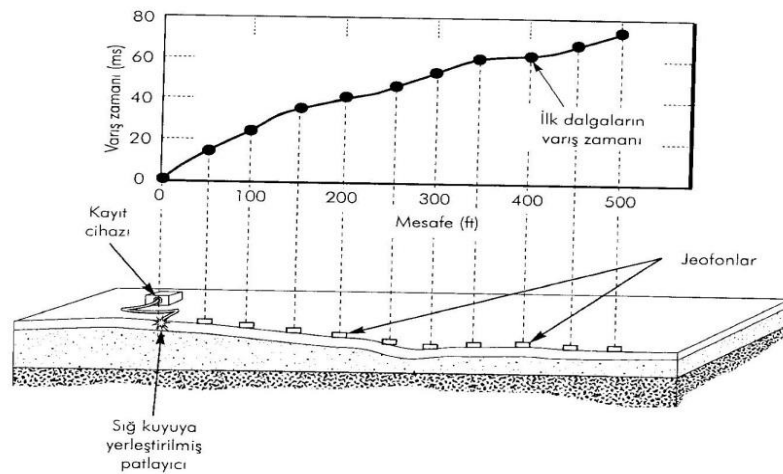
Deneyin yapılması ve yorumlanması oldukça kolaydır (Şekil 3.3). Büyük ölçekli araştırmalar veya derin çalışmalarda uygulanabilecek en kullanışlı deney yöntemidir. Sığ zemin çalışmalarında çok nadir kullanılmaktadır (Kramer, 2003).



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

3.2.1.2 Sismik kırılma deneyi

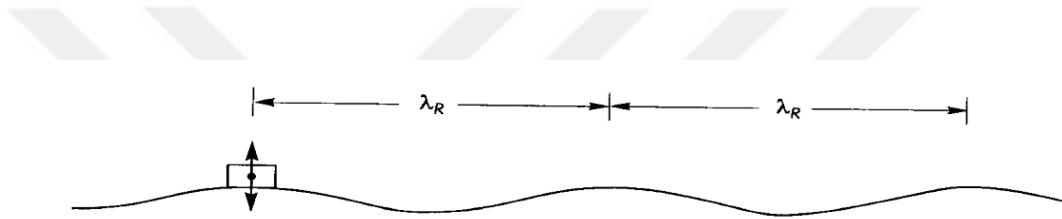
Sismik kırılma deneyinde, belirli bir ritim ile gelen dalganın geliş yönünün hiçbir önemi yoktur ve ilk geliş zamanları kullanılarak sismik yansıma deneyinin kısıtladığı zorunluluklar ortadan kalkmış olur. Sismik kırılma deneyinde; kaynakta çeşitli yöntemlerle oluşturulan P veya S dalgalarının kaynaktan farklı mesafelerdeki okumaları tespit edilerek geliş süreleri saptanır (Şekil 3.4).



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

3.2.1.3 Sabit durum titreşim (Rayleigh dalgası) deneyi

Rayleigh deneyinde dalgaların varış süresini ve gelişlerini tespit etmek diğer yöntemlerin aksine oldukça kolaydır. Düşey olarak titreşen dairesel bir sömele komşu zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmelere sebep olan dalgalar Rayleigh dalgalarıdır (Miller ve Pursey, 1955). Rayleigh dalgaları hem yatay hem de düşey yer değiştirmelere neden olduklarından, sabit frekanslı yükleme durumunda yüzey durumu çok fazla deforme olacaktır (Şekil 3.5). Sömenin merkezine bir alıcı yerleştirilip diğer alıcı da bu alıcıdan farklı mesafelerde konuşlandırılırsa, fazla titreşen noktaların yerleri belirlenebilir. Bu noktalar arasındaki yatay mesafe Rayleigh dalgasının dalga boyuna eşittir (Kramer, 2003).



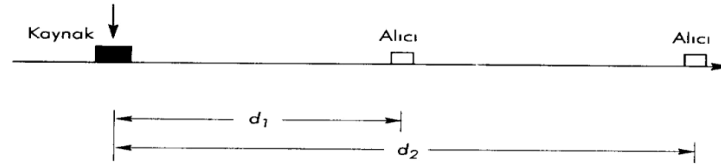
Şekil 3.5. Dinamik olarak titreşen bir pabucun yakınında zemin yüzeyinde Rayleigh dalgasından kaynaklanan deformasyon (Richard vd., 1970)

3.2.1.4 Yüzey dalgaları deneyinin spektral analizi (YDSA)

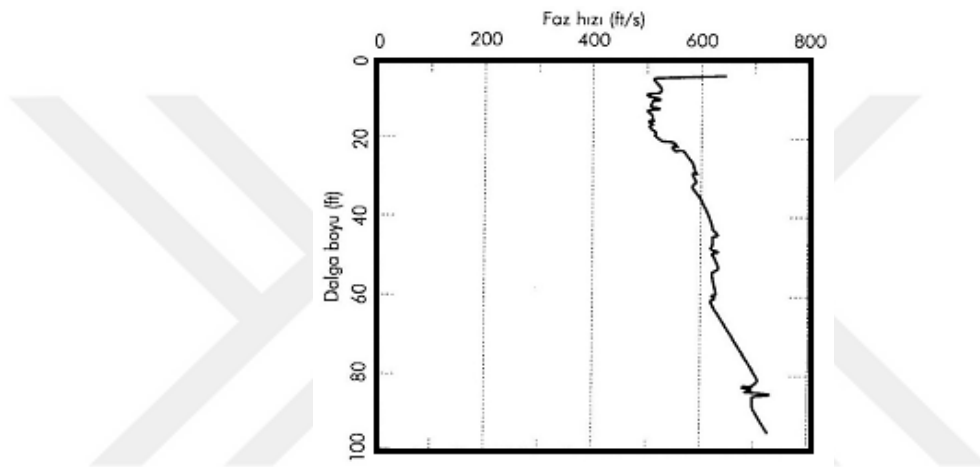
Rayleigh dalgası ve periyod arasındaki ilişkinin grafiğe dönüştürülmüş şekli, cisim dalga hızlarının derinlikle değişimi ile ilişkilidir. Sabit durum titreşim deneyi yüklemeyi değişik frekanslarda tekrarlamak suretiyle dispersiyon eğrisi elde etmede kullanılır. Fakat arazide bu işlemin yapılması hayli zaman almaktadır. Dispersiyon eğrisi, dijital veri toplama ve sinyal işleme ekipmanının da kullanımıyla, ani bir çarpmadan veya rastgele gürültü yükünden elde edilir. Dispersiyon eğrisinin ölçüm ve yorumlanmasının yüzey dalgalarının spektral analizi (YDSA) olarak elde edilme şekli, sığ sismik incelemede son zamanlarda yapılan en önemli yeniliklerden biridir (Kramer, 2003).

YDSA deneyi, zemin yüzeyine iki jeofonun rastgele gürültü kaynağı veya çarpmalı kaynak ile aynı doğrultuda yerleştirilmesiyle oluşturulur (Şekil 3.6). İki jeofonun algıladığı sinyaller kaydedilir ve Fourier Dönüşümü kullanılarak frekans tanım

alanında dönüştürülür ve sonuçlar deneysel dispersiyon eğrisini elde etmek üzere grafiğe aktarılabilir (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. Bir YDSA deneyinde kaynak ve alıcıların tipik düzeni alıcılar arasındaki mesafe $d_1 + d_2$ sabit kalacak şekilde değiştirilir. (Kramer, 2003)



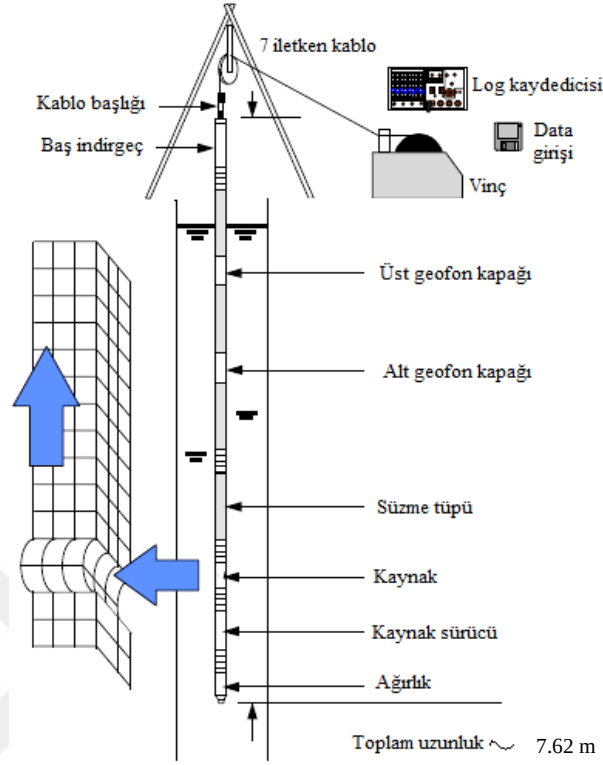
Şekil 3.7. YDSA testinden deneysel dispersiyon eğrisi (Gucunski ve Woods, 1991)

Bu deney hızlı olması, sondaj kuyusu açılımına gerek olmaması, düşük hız katmanlarının tespitinin kolay olması ve yüz metre ve üzeri derinliğe kadar inilebilmesi yönleriyle oldukça avantajlıdır. Ancak bu yöntem için özel ekipman ve deneyimli operatörlere gereksinim vardır. Belirli şartları sağlayan sahalarda kullanılabilir.

3.2.1.5 Askıda loglama deneyi

Bu deney yöntemi her ne kadar geoteknik deprem mühendisliğinde kullanılan yeni bir yöntem olsa da petrol aramalarında oldukça yaygın bir yöntemdir. Ancak elde edilen P ve S dalgalarının frekansı geoteknik deprem mühendisliğinde değerlendirilen frekanslardan oldukça yüksektir ve kuyularda yapılan bu deneylerde sinyaller

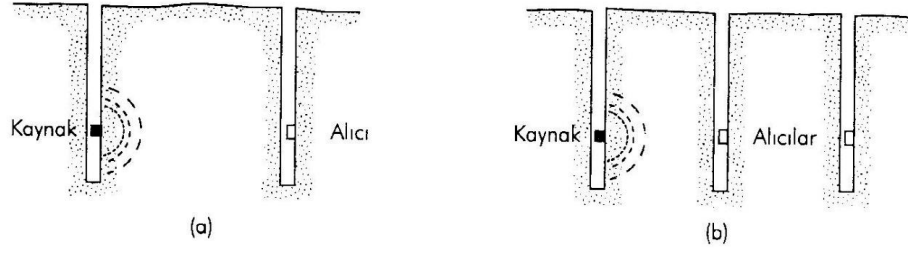
genellikle tüm derinliklerde sabit olduğu için, askıda loglama deneyi iki kilometre derinliğe kadar etkili bir deney yöntemidir (Şekil 3.8), (Nigbar ve Imai, 1994).



Şekil 3.8. Askıda Loglama Deneyi (İnternet 1)

3.2.1.6 Kuyudan kuyuya sismik deney

Kuyudan kuyuya sismik deneyde iki veya daha fazla sondaj kuyusu açılarak yatay yöndeki dalga yayılma hızı ölçülmeye çalışılır. Açılan sondaj kuyularından birincisi enerji kaynağını; ikincisi de alıcıyı içerir. Alıcıyı ve kaynağı aynı derinliğe yerleştirmek suretiyle, iki kuyu arasındaki malzemenin o derinlikteki dalga yayılma hızı (Şekil 3.9 a). Bu işlem sırasında olası hataları azaltmak için mümkün olan durumlarda ikiden fazla da kuyu açılabilir (Şekil 3.9 b). Dalga yayılma hızları böyle durumlarda birbirine komşu iki kuyu arasındaki geliş zamanı farkından hesaplanabilir.

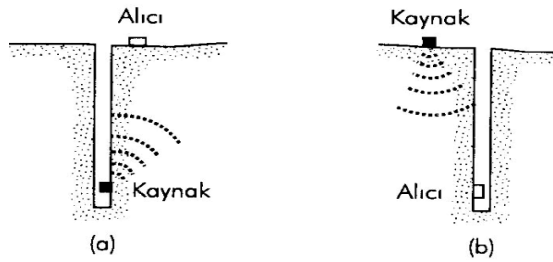


Şekil 3.9. Kuyudan kuyuya sismik deneyi: iki kuyu düzenini kullanarak doğrudan ölçüm (a) ve üç kuyu düzenini kullanarak aralık ölçümü (b) (Kramer, 2003)

Mekanik çarpma kaynakları kullanıldığında kuyudan kuyuya deneyleriyle 30-60 m'ye varan derinliklerde sağlıklı veriler elde etmek mümkündür. Patlayıcı kullanıldığında bu derinlik daha da artmaktadır. Fakat, özellikle 15-20 m'den daha derin kuyularda ölçülen hızların kaynak-alıcı aralığına olan duyarlılığı için çoğu zaman kuyu sapma incelemeleri gerekmektedir (Kramer, 2003).

3.2.1.7 Sismik kuyu aşağı (Kuyu yukarı) deneyi

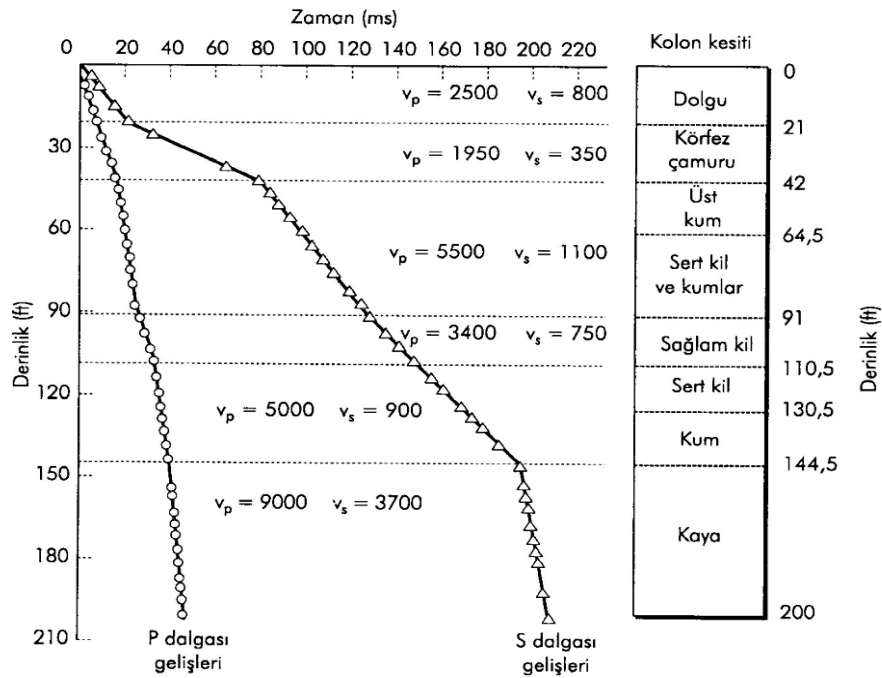
Sismik kuyu aşağı (kuyu yukarı) deneyi sadece bir kuyuda yapılabilmektedir. Kuyu aşağı deneyinde dinamik enerji kaynağı yüzeyde ve kuyunun hemen yanındadır. Değişik derinliklere kaydırılabilen bir alıcı veya çoklu alıcılardan oluşan kablo sistemi kuyu cidarına sabitlenir ve bir alıcı da enerji kaynağının hemen yanında bulunur (Şekil 3.10). Tüm alıcılar, zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülebilmesi için yüksek hızlı bir kaydediciye bağlıdır. Kuyu yukarı deneyinde, kuyu içerisinde hareketli bir enerji kaynağı bulunur ve yüzeyde de kuyu ağzına yakın bir yerde alıcı yerleştirilir. Bu deneyin amacı enerji kaynağından P ve/veya S dalgalarının alıcıya ulaşma süresini ölçmektir (Kramer, 2003).



Şekil 3.10. Sismik kuyu yukarı (a) ve sismik kuyu aşağı deneyi (b) (Kramer, 2003)

3.2.1.8 Sismik koni deneyi

Sismik koni deneyi ve kuyu-aşağı deneyi arasında, sondaj kuyusu açılma şartı hariç, büyük benzerlik vardır. Bir sismik konik penetrometre, sürtünme kolonunun hemen üzerine yerleştirilmiş bir alıcı ile teçhiz edilmiş geleneksel bir penetrometreden oluşur (Şekil 3.11). Dinamik enerji genellikle konik uca bağlı tijlere sıkıca yaslandırılmış bir kirişin uçlarına balyoz ile çarpmak suretiyle uygulanmaktadır. Balyozun kenarına illeştirilmiş bir alıcı ile vuruş zamanı kaydedilmektedir. Kuyu aşağı (kuyu yukarı) deneyi genelde diğer deneylerin tamamlayıcısı ya da fazladan bilgi edinilmek için yapılmaktadır (Kramer, 2003).



Şekil 3.11. San Francisco Körfez bölgesinde bir kuyu aşağı deneyine ait varış zamanı eğrisi (Schwarz ve Musser, 1972)

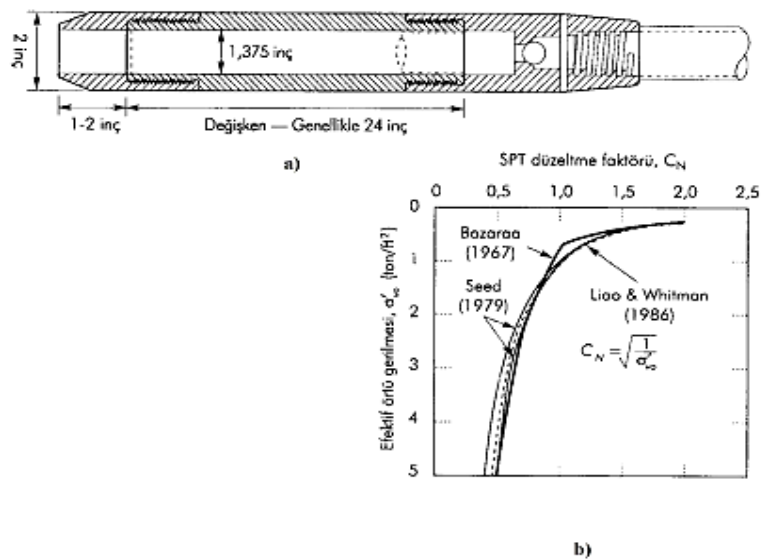
3.2.2 Büyük deformasyon deneyleri

Son yıllarda, yeni cihaz ve yöntemlerin geliştirilmesiyle ve uygulamaya koyulmasıyla, zeminlerde yerinde yapılan deneylerde büyük bir artış meydana gelmiştir. Bu deneyler genelde zeminlerin dayanımı gibi yüksek deformasyon karakteristiklerini ölçmek için kullanılsa da elde edilen sonuçlar zeminin düşük deformasyon özellikleri ile de kıyaslanabilmektedir. Bu deneylerde geoteknik deprem mühendisliği; standart

penetrasyon deneyi (SPT), konik penetrasyon deneyi (CPT), dilatometre deneyi ve presiometre deneyi ile ilgilenmektedir. Burada sadece SPT ve CPT ele alınmıştır.

3.2.2.1 Standart penetrasyon deneyi (SPT)

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) geoteknik mühendisliğinde birçok alanda kullanılan en eski ve en etkili yöntemlerden birisidir. Uygulamalarda da kullanım alanı oldukça yaygındır. Diğer arazi deneyleri ile karşılaştırıldığında kullanılan mekanik ekipman (tij, numune alıcı, tokmak vs.) daha dayanıklıdır. SPT, sondaj sırasında kuyu içerisinde kolayca uygulanabilen ve maliyeti düşük bir deney olduğu için daha avantajlıdır. Ayrıca SPT'nin yapıldığı sondaj kuyusundan numune alınabilmesi, bütün zemin gruplarında uygulanabilmesi ve yeraltı suyu seviyesi altında kullanabiliyor olması bu deneyi diğer deneylerden üstün kılmasına yardımcı olur (Nixon,1982). Bir SPT deneyinde ortadan ayrılabilir bir numune alıcı kuyu tabanındaki zemine çakma (dakikada 30-40 vuruş) suretiyle itilir (Şekil 3.12). Çakma sağlayan çekicin (şahmerdan) ağırlığı 63,5 kg olup düşürme yüksekliği 76 cm'dir. Numune alıcı zemine genellikle 45 cm itilir 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. SPT numune alıcı (a) ve SPT örtü kalınlığı düzeltme faktörü(b) (Liao ve Whitman, 1988)

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

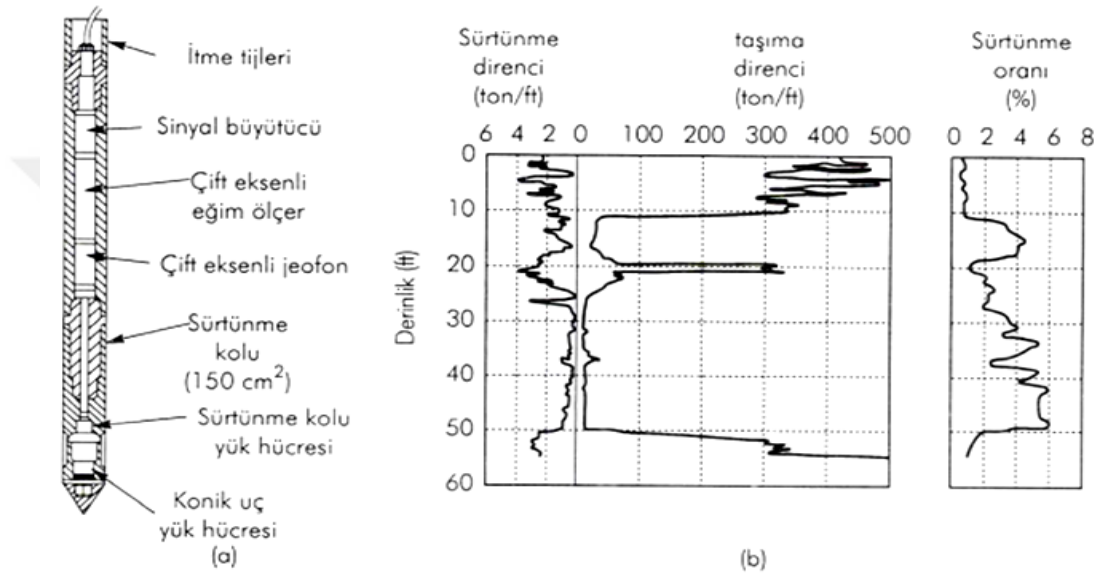
Çizelge 3.1. v_s ile SPT-N değeri arasındaki korelasyonlar (Toğrol ve Sivrikaya, 2009)

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)	Tüm	$51.5N^{0.516}$ n=65 R=0.81
Aşağı ve karşıt kuyu deneyleri yapmıştır.	Tüm Kil (CL) Kum(SM) Çakıl(GP, GM)	$61N^{0.267}(10\sigma_{vo}')^{0.283}$ 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

3.2.2.2 Koni penetrasyon deneyi (CPT)

İlk kez 1930’larda Hollanda’da kullanılmış olup, teknolojinin ilerlemesi ile günümüzde güvenilir ve ekonomik arazi deneyi niteliği kazanmıştır. Koni penetrasyon deneyi (CPT) sondaj kuyusu olmadan çelik bir sondanın sabit bir hızla zemine itilerek zeminin gösterdiği direncin ölçülmesi ile gerçekleştirilir (Toğrol ve Sivrikaya, 2009). 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 itilir. Uç ile sürtünme kolonunun her

biri, penetrasyon sırasında uç direnci q_c yi ve çeper sürtünmesi f_s 'yi ölçen yük hücrelerine bağlanmıştır (Şekil 3.13). CPT deneyi oldukça çabuk yapılabilir (Sondaj ve numune alma hızının genellikle 4 katı) ve maliyeti de nispeten düşüktür. SPT deneyi sırasında kolaylıkla gözden kaçabilen ince katman ve damarların varlığını tespit eden devamlı bir penetrasyon profili verir. Fakat çok sert veya çok sıkı zeminlerde proba ve tiplere zarar vermeden CPT ile ölçüm yapmak mümkün değildir (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/cm ²)	R=0.80
		$41q_c^{0.212} \sigma_v^{0.461}$	q_c (kg/cm ²)	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

3.3 Laboratuvar Deneyleri

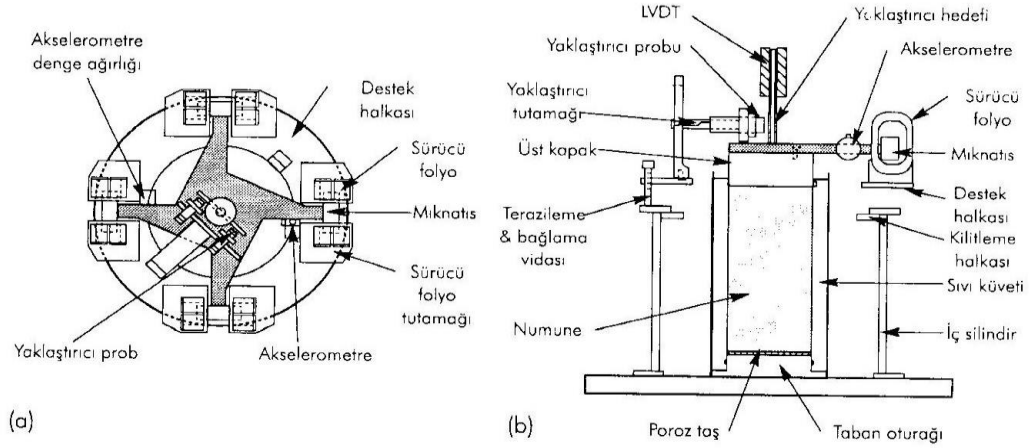
Laboratuvar deneyleri genellikle daha büyük zemin kütlelerini temsil ettiği varsayılan nispeten küçük numuneler üzerinde yapılmaktadır. Numuneler, elemanlar olarak deneye tabi tutulmaktadır. Numunelerin model olarak deneye tabi tutulduğu diğer laboratuvar deneylerinde sonuçlar model üzerine etkiyen,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

3.3.1 Düşük deformasyon deneyleri

3.3.1.1 Rezonant kolon deneyi

Zeminlerin düşük deformasyon özelliklerinin ölçülmesinde en yaygın kullanılan deney, rezonant kolon deneyidir. Rezonant kolon deneyinde içi delik ya da dolu olan silindirik numuneler elektromanyetik yükleme sistemi aracılığıyla harmonik burulma veya eksenel yüklemeye maruz bırakılırlar (Şekil 3.14). Genellikle frekans ve genliğin kontrol edilebildiği harmonik yükler uygulanmaktadır. Rezonant kolon numunesi hazırlanıp konsolide edildikten sonra tekrarlı yükleme başlatılır. Yükleme frekansı, ilk olarak küçük bir değerde tutulur ve sonra tepki (birim deformasyon) genliği maksimuma erişene kadar sürekli arttırılır. Tepkinin bölgesel olarak maksimuma ulaştığı en düşük frekans numunenin asıl frekansıdır. Asıl frekans zeminin düşük deformasyon rijitliğinin numune geometrisinin ve rezonant kolon düzeneğinin belirli özelliklerinin bir fonksiyonudur. Bazı fonksiyonlarda asıl frekansın kullanılması ile v_s hesaplanır, daha sonra da v_s 'den de kayma modülüne (G) geçilir.

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).



Şekil 3.14. Tipik Rezonant kolon deney düzeneği: (a) yükleme sisteminin tepeden görünümü, ve (b) yükleme sistemi ve zemin numunesinin profil görünümü (EPRI, 1993)

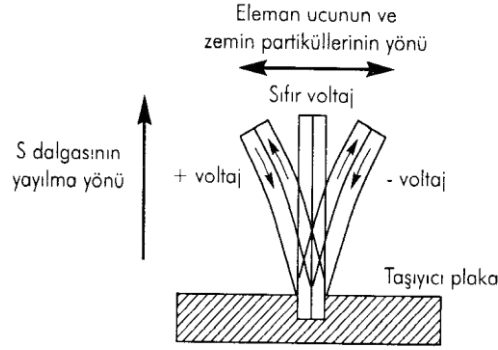
3.3.1.2 Ultrasonik pals deneyi

Dalga iletme hızları, laboratuvarında ultrasonik pals deneyi ile ölçülebilmektedir (Nacci ve Taylor, 1967). Numunenin her ucuna ultrasonik alıcılar ve vericiler yerleştirilerek, aralarındaki mesafe ölçülür. Alıcı ve vericiler yüzeylerinde voltaja maruz kaldığında boyutları değişen ve yamuldukları zaman voltaj üreten piezoelektrik malzemeden yapılmıştır. Vericiye uygulanan yüksek frekanslı bir elektrik, frekans vericinin süratle deforme olmasına sebep olur. Bununla beraber numune içinde alıcıya doğru ilerleyen bir gerilme dalgası üretir. Verici ve alıcı arasındaki mesafe, voltaj palsları arasındaki zaman farkına bölünerek dalga yayılma hızına ulaşılır. Ultrasonik pals deneyi, numune, tüpün içinden çıkarılmamış vaziyette iken yapılabildiği için özellikle deniz tabanı çökerleri gibi çok yumuşak zeminlerde kullanışlı bir deneydir (Woods, 1978).

3.3.1.3 Piezoelektrik bender elemanı deneyi

Piezoelektrik bender elemanı deneyi kayma dalga hızını ölçmeye yarar. Bender elemanları iki piezoelektrik malzemesinin, yüzeylerine voltaj uygulandığında, biri genişlerken diğeri de büzülecek şekilde elemanın bütününün eğilmesini sağlayacak şekilde bağlanmasıyla oluşturulur (Şekil 3.15). Aynı şekilde, bender elemanının yanal olarak örselenmesiyle bir voltaj üretir ve bu şekilde bender elemanları hem S dalgası vericileri hem de alıcıları olarak kullanılabilir. Bender elemanları bir zemin

numunesinin içine batırılır, verici elemana bir voltaj uygulanır ve bu da S dalgaları üretir. S dalgası numunenin diğer ucuna ulaştığında alıcı elemanın yamulmasıyla başka bir voltaj palsı oluşur. Bender elemanı deneyi, yapıldığı esnada numune örselenmediği için zeminin başka bir özelliğini belirlemede de kullanılabilir.



Şekil 3.15. Piyezoelektrik bender elemanı. Pozitif voltaj elemanın bir tarafa; negatif voltajda da diğer tarafa eğilmesine neden olur (Kramer, 2003).

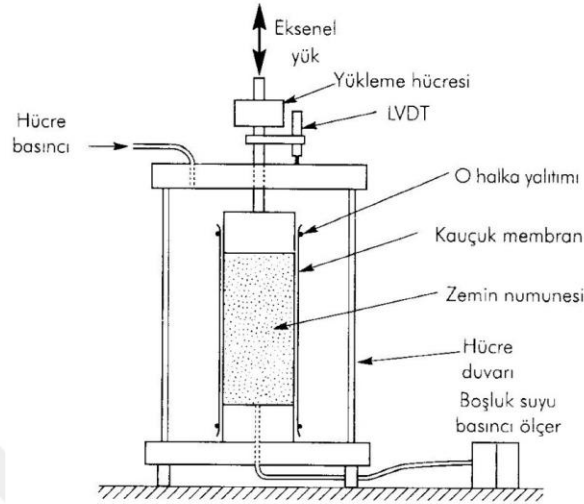
3.3.2 Büyük deformasyon deneyleri

Zemin davranışı efektif gerilmelerle kontrol edildiği için yüksek deformasyon seviyelerindeki deney yöntemlerinin tamamı numuneden boşluk suyu drenajını kontrol edebilmeli ve hacim değişimi veya boşluk suyu basıncını doğru bir şekilde ölçebilmelidir. Bunlar; tekrarlı üç eksen deneyi, tekrarlı doğrudan basit kesme deneyi ve tekrarlı burulmalı kesme deneyleridir.

3.3.2.1 Tekrarlı üç eksen deneyi

Üç eksenli basınç deneyi zemin özelliklerinin statik şartlar altında laboratuvarında ölçüldüğü yaygın deneyken tekrarlı üç eksenli deney de zeminin dinamik özelliklerinin yüksek deformasyon seviyelerinde laboratuvarında ölçüldüğü en yaygın deney şeklidir. Bu deneyde silindirik bir zemin numunesi ince kauçuk bir membran ile kuşatılmış olarak iki yükleme plakası arasına yerleştirilir (Şekil 3.16). Numuneye çoğu zaman hava basıncı şeklinde uygulanan bir yatay gerilme ve 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).



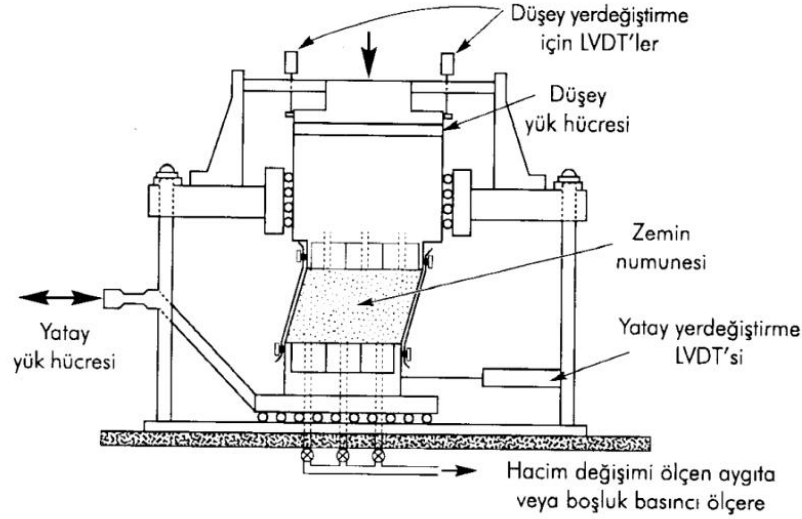
Şekil 3.16. Tipik üç eksenli düzeneği (Kramer, 2003)

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

3.3.2.2 Tekrarlı doğrudan basit kesme deneyi

Tekrarlı doğrudan basit kesme deneyinde deprem gerilme şartları tekrarlı üç eksenli deneyde olduğundan çok daha sağlıklı olarak modellenenmektedir. Sıvılaşma ile ilgili deneylerde en çok kullanılan yöntemdir. Bu deneyde silindirik ve kısa bir numune kullanılır. Tekrarlı yatay kayma gerilmelerini numunenin tabanına veya tepesine uygulamak suretiyle deney numunesi, düşey olarak yayılan S dalgalarının maruz kaldığı zemine en çok benzeyen şekilde deforme edilir (Şekil 3.17).

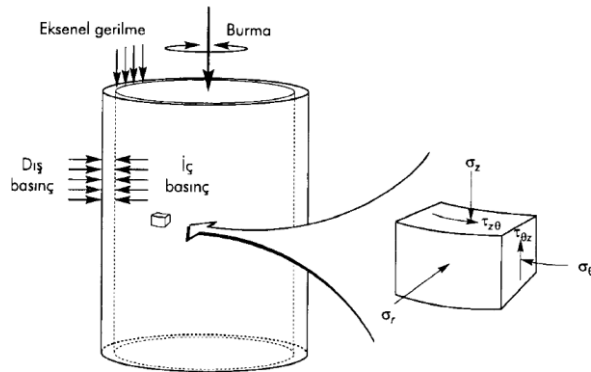
Aynı zamanda kayma gerilmeleri numunenin sadece taban ve üst yüzeylerine uygulanmaktadır. Geleneksel basit kesme düzeneklerinin K_0 şartlarına karşılık gelen başlangıç şartlarından başka başlangıç şartlarını uygulama yeteneği sınırlıdır (Bouglanger vd., 1993).



Şekil 3.17. NGI tekrarlı basit kesme düzeneği. Zemin numunesi tek donatılı kauçuk membran içindedir (Airey ve Wood, 1997)

3.3.2.3 Tekrarlı burulmalı kesme deneyi

Tekrarlı burulmalı kesme deneyi, geniş bir aralıktaki deformasyon düzeylerinde rijitlik ve sönümleme özelliklerinin ölçülmesinde en çok kullanılan deney türüdür (Şekil 3.18). 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 3.18. İçi boş silindir düzeneği (Kramer, 2003)

3.3.3 Model deneyleri

Model deneylerinde diğer 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 incelemeye kullanılabilir. Model deneyi önemli olayların teşhisinde ve kestirici teorilerin teyit edilmesinde çok yararlı olsa da, bulunan nokta itibarıyla henüz önemli yapıların veya tesislerin tasarımında doğrudan kullanılabilecek düzeyde geliştirilememiştir. Bu deneyler; sarsma tablası deneyi ve santrifüj deneyleridir.

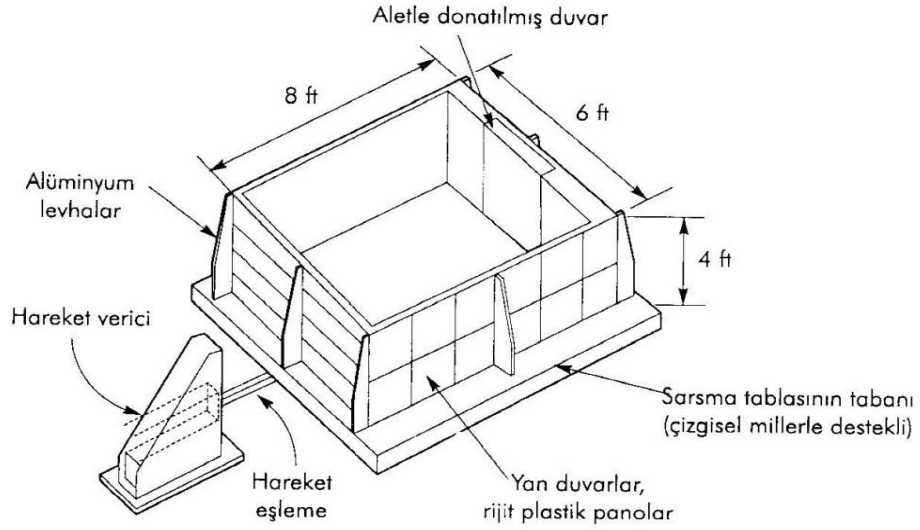
3.3.3.1 Sarsma tablası deneyleri

Geoteknik deprem mühendisliğinin ilk dönemlerinde model deneylerin tamamı sarsma tablaları üzerinde yapılmaktaydı. Sarsma tablası deneyi ile sınılaşma, temel tepkisi, deprem sonrası oturma ve yatay zemin basıncı problemlerinde önemli aşamalar kaydedilmiştir. Sarsma tablalarının çoğunun hareket derecesi serbestliği tek ve yatay yöndedir, bunun yanında çok dereceli serbestlikli sarsma tablaları da geliştirilmiştir. Sarsma tablaları genellikle servohidrolik hareket vericiler vasıtasıyla sallanmaktadır (Şekil 3.19). Bunların dinamik yükleme kapasiteleri genellikle hareketi sağlayan hidrolik pompaların kapasitesi tarafından kontrol edilmektedir. Orta ve yüksek frekanslardaki ağır modellerde büyük yer değiştirmeler üretebilmek için pompaların ve hareket kaynaklarının da büyük olması gerekmektedir. Bu deneylerin hazırlanma aşaması uzun ve zor olduğu için, elde edilen veriler gerçeği tam olarak yansıtamadığı için sarsma tablası sonuçlarının değerlendirilmesine yönelik düzeltme yöntemleri geliştirilmiştir.

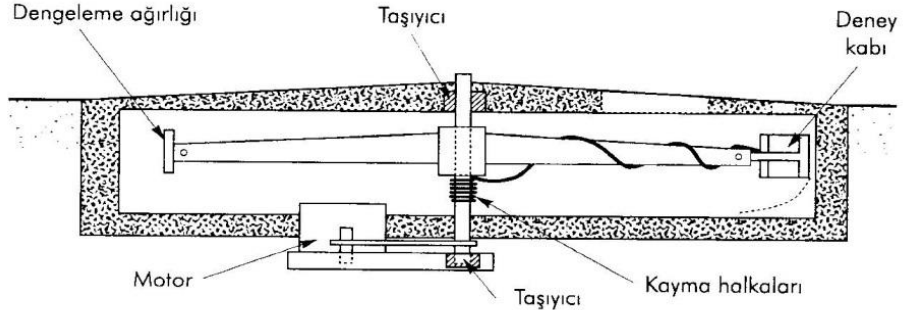
3.3.3.2 Santrifüj deneyleri

Bir santrifüj deneyinde santrifüjün ekseninden r mesafede $1/N$ ölçekli bir model $\Omega = (N/r)^{0.5}$ dönme hızında döndürülür (Şekil 3.20). 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 noktadakilere özdeş olmalıdır. Santrifüj deneyleri orta ölçekli sarsma tablalarından daha küçüktür (Kramer, 2003).



Şekil 3.19. Dinamik zemin basıncı deneyinde kullanılan zemin hazneli sarsma tablası (Sherif vd., 1982)



Şekil 3.20. Bir geoteknik santrifüjünün enine kesiti (O'Reilly, 1991)

BÖLÜM IV

ZEMİN YAPI ETKİLEŞİMİ

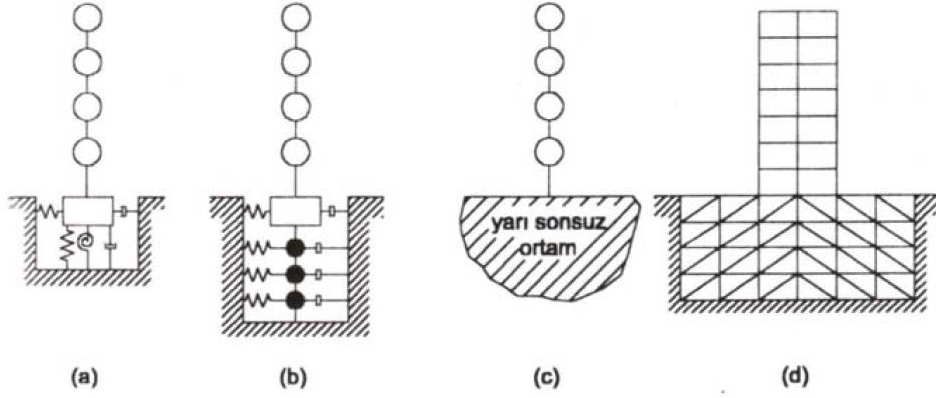
4.1 Zemin-Yapı Etkileşimi Problemleri

Gevşek zemin üzerinde inşa edilen yapıların deprem etkisindeki davranışları, yapı-zemin etkileşimi probleminin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle yapı-zemin etkileşiminin önemli ölçüde dikkate alınması gerekir. Değişik yapı sistemleri tasarlanırken, deprem etkisinin hesabında zemin etkisi tamamen rijit kabul edilir. Bu kabulde temelin zemine ankastre bağlı olduğu ve depremin etkisi de yapıyı etkileyen yatay rijit öteleme olarak varsayılır (Koçak ve Mengi, 2000; Karabörk, 2009).

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

Yeryüzünde meydana gelen depremler yapıya, temel aracılığıyla iletilirler ve depremde yapı ile zemin birlikte hareket ettiklerinden dolayı birbirlerinin davranışını etkilemektedirler. Dahası yapılan araştırmalarda hasar görmüş yapıların ilk frekanslarının, yapının üzerinde bulunduğu zemin tabakasının frekansına neredeyse eşit olduğu tespit edilmiştir.

Herhangi bir bölgedeki yapının deprem etkisi sonucunda davranışı değerlendirilirken, zemin yapı sisteminin dinamik özelliklerinin anlaşılması gerekmektedir. Zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde değişik uygulamalar kullanılabilir (Şekil 4.1).

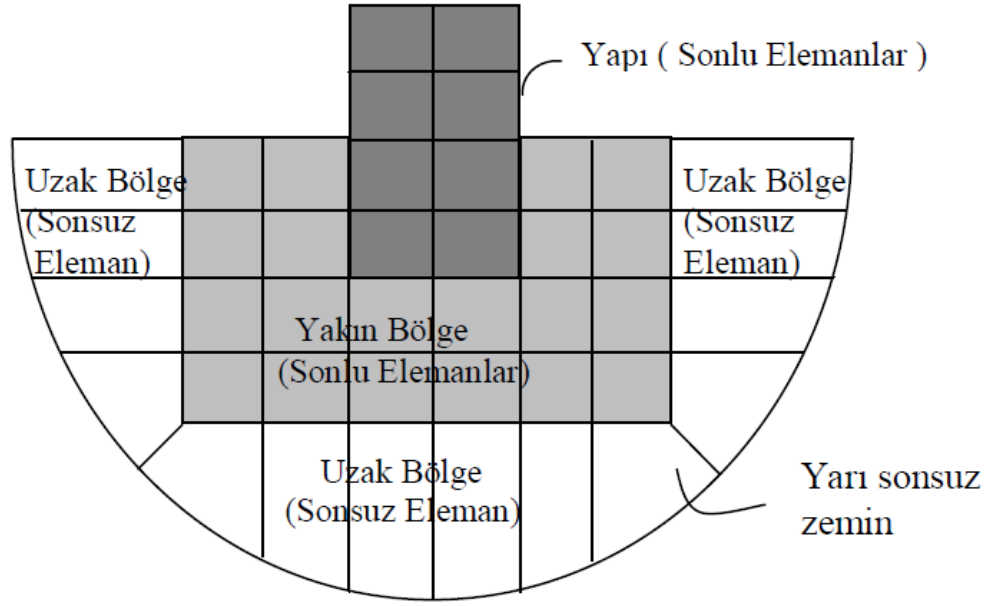


Şekil 4.1 Zemin-yapı etkileşiminin incelenmesi için değişik modeller (Karabörk, 2009)

Burada;

- (a) Yapının temelinde kabul edilen eşdeğer elastik yay ve sönümlerle modelleme,
- (b) Zeminin düşey doğrultuda elastik yay ve sönümlerin gelmesinden dolayı oluşan kayma kirişi modelleme,
- (c) Yapının elastik veya visko elastik yarı sonsuz ortamda, yarı sonsuz olarak modellenmesi,
- (d) Zeminin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesidir (Karabörk, 2009).

Zemin – yapı etkileşimi, çeşitli şekillerdeki sistemlerin tamamının veya bir kısmının iç içe ve\veya üst üste gelmesi ile oluşan birleşik sistemlerdir. Birleşik sistemlerin analizi her sistemin ayrı analizi veya sistemlerin birbirlerine olan etkileri göz önüne alınarak 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 4.2), (Ala, 2007).



Şekil 4.2 Dinamik Sınırsız Ortam-Yapı Etkileşimi (Kaçın, 2002)

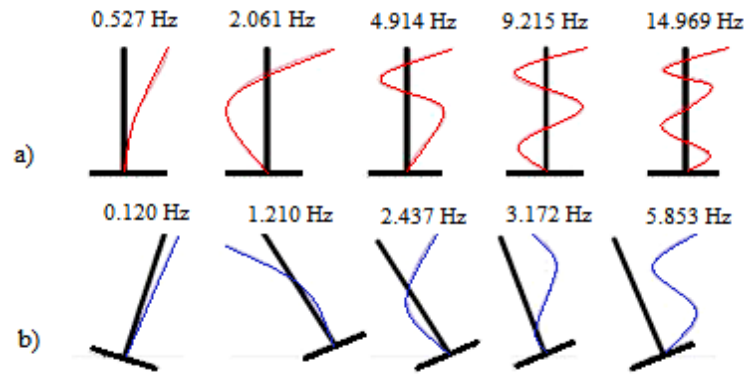
Uzak bölge: Uzak bölge, yapının etkin derinliği ile yer yüzeyi ve sınırlı bölge arasında kalan sınırsız yada yarı sınırlı bölge olarak kabul edilir. Birleşik sistem problemlerinin analizinde sınırsız ortamları gerçek boyutları ile modellemek mümkün olmadığından belirli bir bölge göz önüne alınarak problem tanımlanır. Sınırsız ortam, yapının dinamik rijitlik matrisine eklenen empedans (α) katsayıları ile formülize edilir. Burada ρ zeminin yoğunluğunu v_s ise kayma dalgası hızını göstermektedir.

$$\alpha = \frac{\rho_1 v_{s_1}}{\rho_2 v_{s_2}} \quad (4.1)$$

Yakın bölge: Yapının sınırsız ortam ile etkileşime girdiği, malzeme davranışı bakımından büyük gerilme ve şekil değiştirmelerin meydana geldiği; zemin davranışının lineer olmayan 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 ele alınır. Sınırsız veya yarı sınırlı ortamlarda dinamik etkileşim analizi yapı - zemin etkileşim problemi ile belirlenebilir (Ala, 2007).

Etkileşim Ara Yüzeyi: Etkileşim ara yüzeyi, yakın bölge ile uzak bölgenin etkileşime girdiği yüzey olarak kabul edilmektedir. Zemin-Yapı Etkileşim (ZYE) problemlerinin çözümünde, uzak bölgenin dinamik özellikleri etkileşim ara yüzeyinde tanımlanır ve birçok problem etkileşim ara yüzeyinde Sonlu Elemanlar Modeli ile çözülebilmektedir. Yüzeyin gerçekçi davranışı plastisite teorisi kullanılarak, doğru elemanlarla modellenenir (Ala, 2007).

Yapı ile bitişik olan yakın bölge ve yapının kendisi, doğrusal olmayan davranış gösterirlerken, uzak bölgenin doğrusal davrandığı kabul edilir. Yapı ile bitişik yakın bölgenin büyüklüğü, zemin davranışının doğrusal olmayan davranıştan, doğrusal davranışa geçiş yaptığı etkileşim ara bölgesine kadar olan alan kabul edilebilir. Zemin ve yapının karşılıklı etkileşimi, üst yapı ve yerel zeminin dinamik karakteristiklerini etkiler. Tanım olarak; zemin-yapı etkileşimi, yapıda kütle ve rijitlik dağılımını etkileyerek sistemin bütününde frekans ve mod şekillerinin değişimi olarak ifade edilir. 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 Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Burada, zemin-yapı etkileşiminin sistem davranışı üzerindeki etkisi görülmektedir (Ala, 2007).

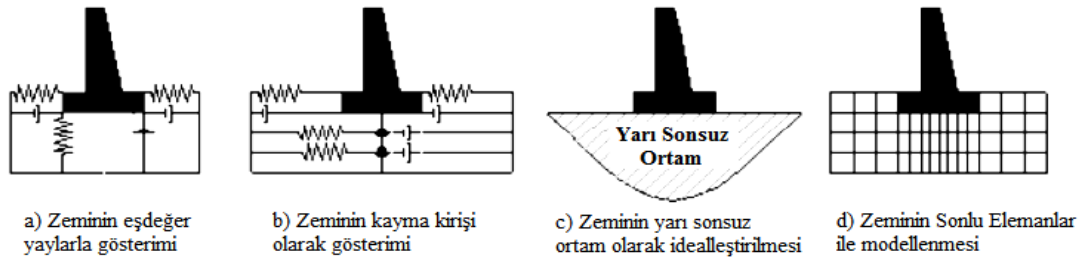


Şekil 4.3 Katlı bir sistemde zeminin (a) rijit (b) zemin kayma dalgası hızı 50 m/s olması durumunda ilk beş mod şeklinin ve frekansının değişimi (Ala, 2007)

4.2 Zemin-Yapı Etkileşimi Problemlerinde Çözüm Yöntemleri

Zemin-yapı etkileşim problemi, uzak bölgede 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. Dahası 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 modellenenbilmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Zemin modelleme şekilleri (Ala, 2007)

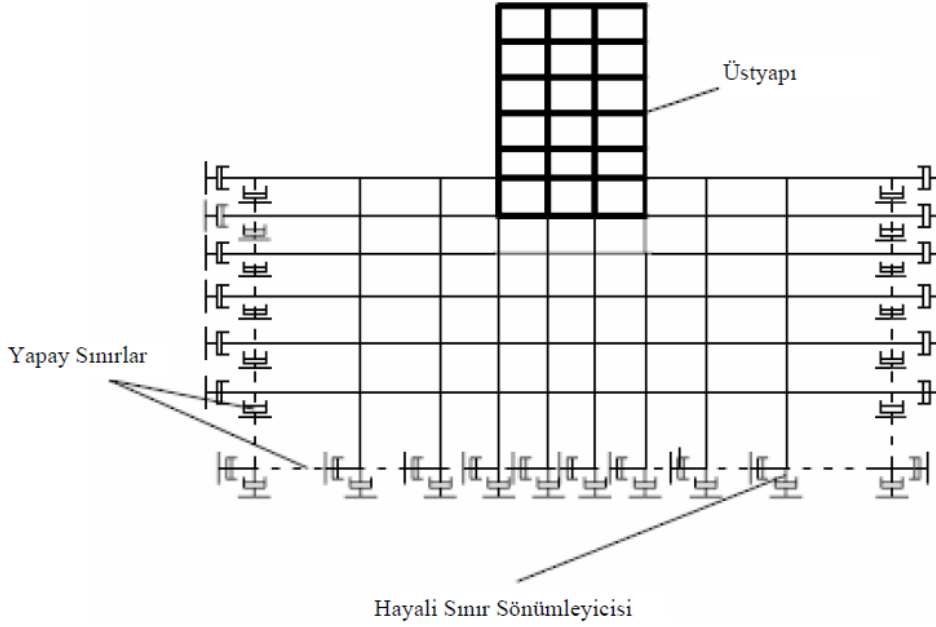
Yapı-zemin etkileşimi genel olarak iki yöntem ile analiz edilebilir;

1. Direkt (doğrudan) yöntem
2. Alt sistem yöntemi

4.2.1 Direkt (doğrudan) yöntem

Üst yapı ile zeminin tek bir ortak sistem olarak sonlu eleman modeli ile idealleştirildiği ve taban kayasında tanımlanan depremin etkisi altında analiz edildiği yöntem “Direk (doğrudan) yöntem” adı verilir. Bu yöntemde zemin ve üst yapıdaki tüm geometrik ve mekanik özellikler ile nonlinear davranış uygun bir biçimde göz önüne alınabilir. Direkt yöntemde, kuvvetli yer hareketi altında gerek üst yapıda, gerekse zeminde meydana gelebilecek nonlinear şekil değiştirmelerin “üst yapı-zemin ortak sistemi” nin zaman tanım alanında analizi ile doğrudan elde edilebilmesi teorik olarak mevcuttur. Ancak günümüzde üst yapı için uygulamada yaygın olarak kullanılan sistem; üstyapıdaki nonlinear şekil değiştirmeleri yaklaşık olarak göz önüne almak suretiyle, yönetmeliğe göre azaltılmış deprem yükleri altında yapılan lineer analiz yöntemidir (Aydinoğlu, 2012).

Belirli yönlerde sonsuza uzanan zemin, kesim yüzeyleri ile kesilerek kesim yüzeylerine alt bölgenin zemin özelliklerini yansıtacak özel sınır şartları konur (Şekil 4.5) (Ala, 2007).

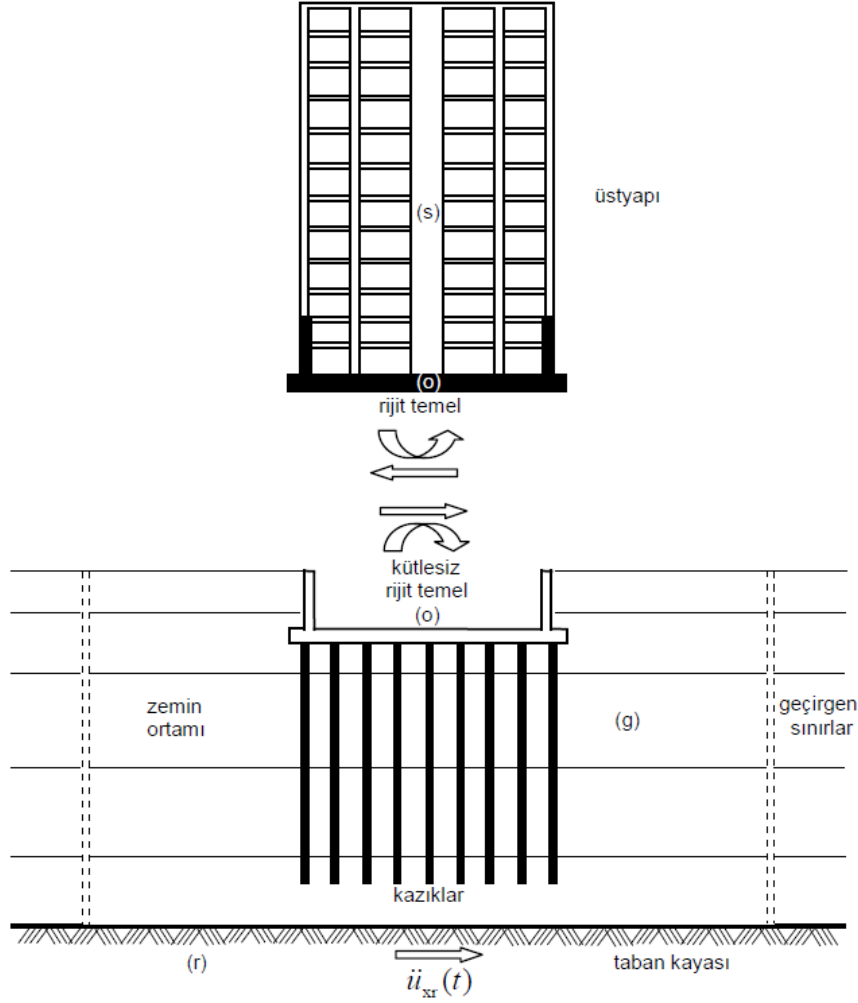


Şekil 4.5 Direkt Yöntem’de sınır şartları (Karabörk, 2009)

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 geçirimsizliğini sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekir (Ala, 2007).

4.2.2 Alt sistem yöntemi

Alt sistem yönteminde, kazıklarla birlikte zemin ortamı ve üst yapı ayrı ayrı birer alt sistem olarak modellenir ve pratikte de kullanılır (Şekil 4.6). Alt sistem yöntemi uygulanacağı zemin sisteminde, eğer mevcutsa zemin iyileştirmesi (taş kolon, jet grout, vb.) de göz önüne alınarak, tabakalı zeminin nonlineer dinamik özellikleri, temel geometrisi ve sınır koşulları dikkate alınır. Burada zeminin kütlesi göz önüne alınmaz (Aydinoğlu, 2011).



Şekil 4.6 Alt sistem yöntemi modeli (Aydınöğlu, 2011).

4.3 Viskoz Sınır Şartı

Viskoz sınır şartları; zemin belirli bir uzaklıktan kesilmesi ve kaynaktan saçılan dalgaların kesim noktalarındaki yapay sınırlara çarpması sonucu bir kısmının tekrar zemin ortamına yansması gibi bir duruma neden olmasını engellemek için kullanılmaktadır. Viskoz sınır şartları kullanılırken ele alınan zemin küçük parçalara bölünür ve kesim noktaları yapıdan uzakta seçilir. Bu yöntem kullanılırsa gerçeğe oldukça yakın sonuçlar elde edilmiş olur. Viskoz sınır şartının kullanılabilmesi için, düzlem dalgasının lineer elastik bir ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir (Ala, 2007).

Dinamik analizlerde modellenen viskoz sınır şartı “*efektif sönüm*” ve “*efektif rijitlik*” değerleri tanımlanmıştır. Efektif rijitlik, ilgili noktanın bir birimlik yer değiştirmesi

için gereken kuvvet olarak belirlenir. Efektif sönüm (c) de aşağıdaki denklemden yararlanılarak hesaplanır;

$$c = \rho v_s A \quad (4.2)$$

Burada, ρ zeminin yoğunluğu, v_s zeminin kayma dalga hızı ve A etkili alandır.

Zeminin kayma dalgası hızı;

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.4)$$

Burada, G zeminin kayma modülü ve E zeminin elastisite modülüdür.

4.4 Yerel Zemin Koşulları

Yerel zemin koşulları, gerek üst yapı gerekse de temel sistemlerinde en önemli faktörlerden birisidir. Özellikle deprem hareketi altında, yapılarda hasara neden olmaktadır. Deprem etkisi altında yerel zeminler, sıvılaşma, göçme, oturma gibi sebeplerden dolayı yapısal hasarlara neden oldukları gibi yerel zeminlerin dinamik özellikleri de zeminlerin deprem hareketi altındaki davranışını etkileyerek yapı hasarları üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Zeminin bu etkisi, yapıya gelen deprem ivmesini de büyüterek hasarın çok daha artmasına neden olur. Bu olay “*zeminin büyütme etkisi*” 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	$180 > v_s$ $15 \text{ m} > H_t > 3 \text{ m}$	Yüksek
D2	Kalınlığı (H_t) fazla ve yumuşak veya orta sıkı kil içeren tabakalar	$180 > v_s$ $35 \text{ m} > H_t > 15 \text{ m}$	Yüksek
E1	Organik madde oranı yüksek killer	$H_t > 3 \text{ m}$	Çok yüksek
E2	Yüksek plastisiteli killer	$H_t > 7 \text{ m}$ ve $I_p < \%75$	Çok yüksek
E3	Çok kalın yumuşak veya orta sıkı kil içeren tabakalar	$H_t > 35 \text{ m}$	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 büyük bir titizlikle yansıtmalıdır. Çünkü zeminin enerji yutma kapasitesi, zemin ortamının yarı sonsuz büyüklükte oluşu ve zemine ait fiziksel parametreler; zeminin özellikle kayma modülüne, şekil değiştirmesine ve gerilme düzeyine bağlıdır (Ala, 2007).

4.4.1 Zemin özelliklerinin üst yapıya etkisi

Deprem sonrası yapı ve zemin kendi karakteristik özelliklerine bağlı olarak salınım hareketi yapmaya başlar ve zemin ile yapı aynı periyotta salınmaya başlarsa yapılarda çok ciddi hasarlar meydana gelir. Yapı ile zeminin aynı periyotta salınım olayına “rezonans” denir ve rezonans etkisi genelde yapılarda istenilmeyen bir davranıştır. Bu etkiyi azaltmak için yumuşak zeminlere az katlı ve periyodu düşük, sağlam (sert ve sıkı) zeminlere ise çok katlı ve periyodu yüksek yapılar yapılması önerilmektedir.

Ama yumuşak zeminlerin üzerine düşük periyotlu yapıların yapılmasında da, zemin yapı etkileşimi ihmal edilmeyecek derecede öneme sahiptir (Ala, 2007).

Deprem dalgalarının periyotları, merkez üssünden uzaklaştıkça büyüyerek yapılar da daha büyük hasarlara yol açabilmektedir. Yapılan incelemelerde, yumuşak zemine dönüşmüş olan eski bir gl 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 saptanmıştır (Ala, 2007).



BÖLÜM V

YAPILARIN KONTROLÜ VE MODERN YAPI TASARIMI

Dünya nüfusunun günden güne artması, buna karşılık yaşanabilir alanların ve arazilerin maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle artan konut ihtiyaçları ve diğer ihtiyaçları gidermek amacıyla çok katlı ve geniş kütleli yapıların artması bazı sorunları da beraberinde getirmiştir.

Depreme dayanıklı yapılarda temel amaç; güvenlik, hizmet ve konfor şartlarını sağlamaktır. Yer hareketlerinin meydana getirdiği enerjinin yapı elemanları tarafından sönmülmesi konusunda çeşitli kontrol mekanizmaları geliştirilmiştir. Kontrol mekanizmaları 3 ana başlık altında toplanabilir;

1. Aktif kontrol sistemleri
2. Pasif kontrol sistemleri
3. Karma kontrol sistemleri

Pasif kontrol sistemleri; yapının tabanına yerleştirilen kauçuk esaslı ızalasyon malzemesi, deprem esnasında tabanda büyük yerdeğiştirmeler oluşurarak meydana gelen enerjiyi sönmüler ve yapının üst kısmının zarar görmesini engeller. Aktif kontrol sistemleri ise; deprem titreşimlerinin algılanması, bir kontrol aygıtı ile bu bilgilerin değerlendirilmesi ve bina üzerine yerleştirilmiş aygıtlarla, binanın titreşime karşı yapının taşıyıcı sistemi üzerindeki zarar verici etkisinin azalması prensibine dayanır. Ancak, bu sistem oldukça maliyetli olduğu için yerine alternatifler düşünülmüş ve pasif kontrol sistemlerinin ucuz ve kalıcı çözümleri ile aktif kontrol sistemlerinin kontrol mekanizmalarının avantajları kullanılarak “*Karma Sistemler*” oluşturulmuştur.

Çizelge 5.1’ de, yapı kontrol sistemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.

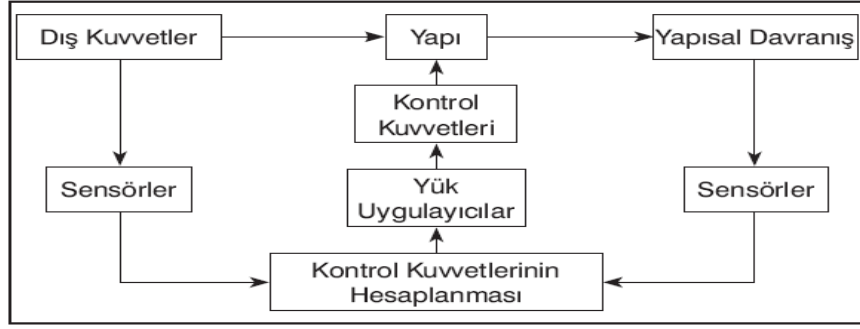
Çizelge 5.1 Yapı kontrol sistemlerinin sınıflandırılması (Engin, 2007)

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

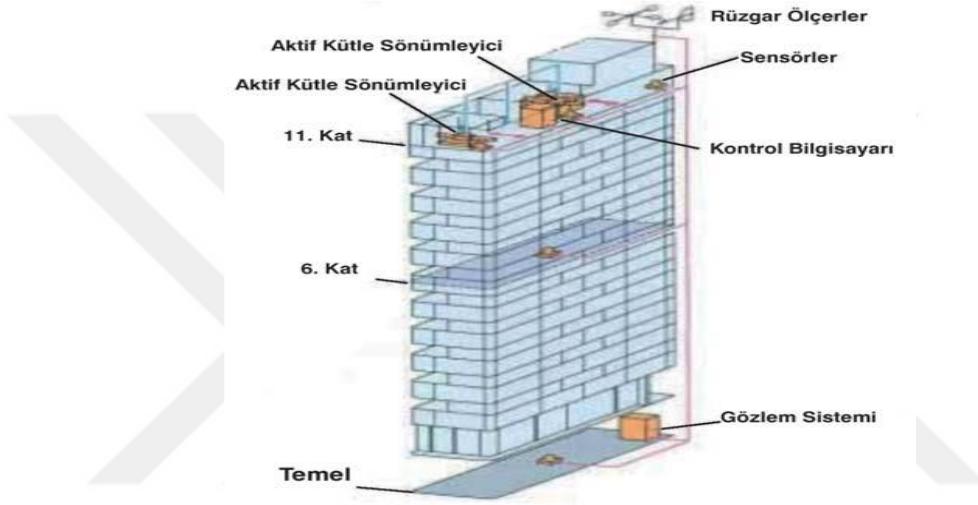
5.1 Aktif Yapı Kontrolü

Yapısal hareketi önleme konusunda ilk çalışmalar 1960 yıllarında Eugene Freyssinet binaların stabilizasyonu için kontrol araçları olarak öngermeli tendonları kullanmıştır. 1965 yılında Zev Zetlin yapı çerçevelerine ve taban hidrolik krikolarına bağlı olan kablolar ile yüksek binaları tasarlamıştır. Ancak o zamanlar bu sistem hem mali hem de teknik eleman yetersizliğinden uygulamaya geçirilememiştir. 1972 yılında Yao yapısal kontrol teorisine dayanan bir kontrol sistemi hazırlamıştır. Yapılan bu çalışmalar günümüzde kullanılan aktif bina modellerinin temelini oluşturmuştur (Şekil 5.1).

Aktif kontrol sistemleri bilgisayar sistemleri ile desteklenen bir sistem olduğu için neredeyse tamamen kontrol altında tutulabilen bir sistemdir. Yapı tasarımında dış etkilerin tam olarak belirlenememesinden dolayı alınabilecek en iyi kontrol yöntemidir. Aktif kontrol sistemleri, yapıya bazı zamanlarda olağan dışı etkiler geldiğinde (deprem veya rüzgarlar gibi), yapıya kontrol kuvvetleri etki ettirerek yapının ayakta durmasını sağlar. Bunu yaparken de bir geri besleme sistemi kullanarak yapının dış etkilere karşı tepkisini azaltır. Günümüzdeki uygulamalarından biriside Tokyo’da bulunan Kyobashi Seiwa binasıdır (Şekil 5.2).



Şekil 5.1. Aktif Kontrolün Şematik Diyagramı (Aldemir ve Aydın, 2005)



Şekil 5.2. Aktif Kütle Sönümleyicilerin Yerleştirildiği Kyobashi Seiwa Binası (Tokyo, Japonya) (Aldemir ve Aydın, 2005)

5.2 Pasif Yapı Kontrolü

Yapı kontrol sistemlerinin bir diğer yöntemi de pasif kontrol sistemleridir. Dinamik etkilere maruz kalmış yapılardaki titreşim enerjisi esas olarak iç sürtünme ve plastik deformasyonlar ile ortadan kaldırılmaktadır. Pasif enerji sönümleyicileri yeni oluşturulacak yapılarda, hasarlı yapılarda ve çok yıllık yapıların onarımında ve tasarımında kullanılmaktadır (Aldemir ve Aydın, 2005). Pasif kontrol araçları dışardan alınan herhangi bir enerjiye ihtiyaç duyulmadan faaliyetlerini sürdürebilir ve kontrol edilmesi gereken yapı ile beraber çalışırlar. Kontrol kuvvetleri de bu birlikte hareket sonucu meydana gelmektedir. Diğer kontrol sistemleriyle kıyaslandığında, pasif kontrol sistemleri güvenilir, uygulamada ve tasarımda kolay ilkelere sahip bir

kontrol sistemidir. Bu avantajlarda yapı tasarımında pasif kontrol sistemlerinin kullanımını oldukça yaygınlaştırmaktadır (Mirkelam, 2006).

Pasif kontrol sistemleri dinamik titreşim sönümleyiciler (sismik yalıtım) ve enerji sönümleyiciler olarak iki ana başlık altında toplanabilmektedir.

Dinamik titreşim sönümleyicileri, ayarlı kütle sönümleyiciler (AKS) ve ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD) oluşturmaktadır. AKS'ler kütle, yay ve sönümleyicilerden oluşmaktadır. TLD'ler ise büyük hacimdeki tanklarla, gerekli miktarda akışkan içerir. Dinamik titreşim sönümleyicileri genellikle binaların en tepesine yerleştirilir ve doğal frekansı ana kütlenin frekansına ayarlanarak binadaki titreşim enerjisinin bir kısmını etkili bir şekilde azaltır (Okut, 2006).

Enerji sönümleyicileri ise, sürtünme sönümleyicileri, metalik sönümleyiciler ve viskoz sönümleyicilerden oluşturmaktadır.

5.3 Karma (Hybrid) Kontrol

Karma (Hybrid) kontrol sistemleri, aktif sönümleyicilerin teknik ekipmanları ile pasif sönümleyicilerin çalışma mekanizmasının herhangi bir yapı sisteminde birleştirilmesiyle oluşan bir sistemdir. Bu sistemin çalışmasındaki mantık, binada oluşan harekete karşı kontrollü bir dirençle karşı konulması ve kuvvetin etkisini tamamen azaltılmasıdır. Uygulanan bu mekanizma ile oluşan yıkıcı kuvvetler ya tamamen kontrol edilebilirler ya da çok az bir güç ile kontrol altına alınabilir. Karma kontrol sistemlerin oluşturulmasının asıl sebebi aktif kontrol sistemlerin enerji kaynağı ihtiyacını en aza indirmek ve olası maliyetleri azaltmaktır. Sismik hareket sırasında ana güç kaynakları zarar görse bile dâhili pilleri gerekli enerjiyi sağlamak için devreye girer. Düşük enerji ihtiyaçları ve yüksek performansları sayesinde diğer kontrol sistemlerine oranla daha çok kullanılırlar. Çoğunluğu elektrik ve\veya manyetik alana hassasiyeti olan sıvılar içerir (Engin, 2007; Düzel, 2010).

5.4 Sismik Yalıtım

Mevcut uygulamalarda karşılaşılan en önemli problemlerden biriside, katlar arası yerdeğistirmeler ile kat ivmelerinin aynı anda nasıl azaltılacağıdır. Bunu

Sismik izolatör kolon tabanında

Sismik izolatör kat altında

Sismik izolatör

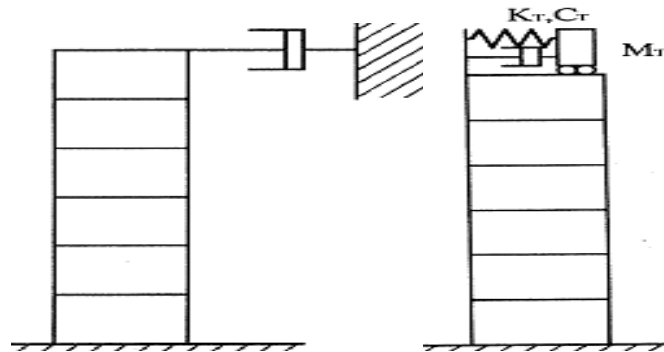
49

- 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).

BÖLÜM VI

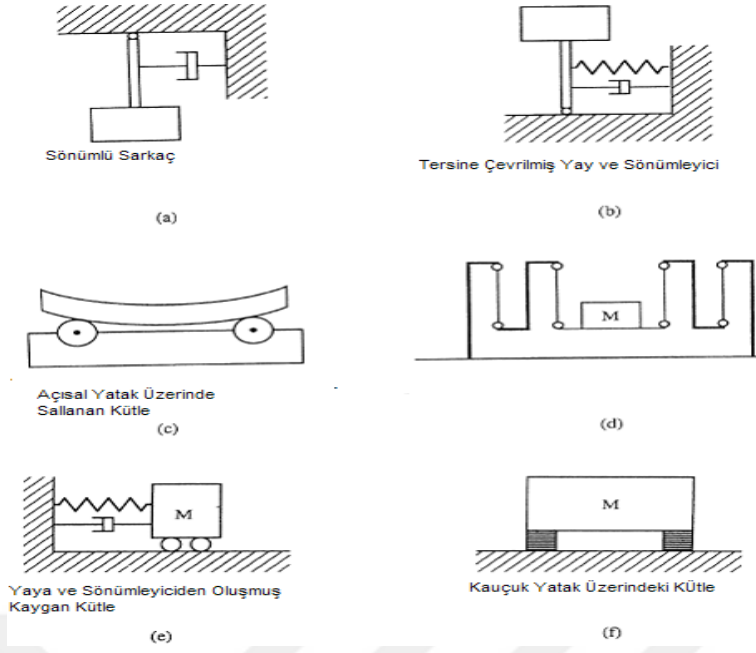
AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ (AKS)

Deprem sonrasında yapının ayakta kalabilmesi için ve servis şartlarını da sağlıklı bir şekilde yerine getirebilmesi için yapıya ilave sönüm sağlayan pasif sönümleyici sistemlerinin kullanılması her zaman daha avantaj sağlamaktadır (Okut, 2006). Bir yapının sönüm kapasitesini artırmak için viskoz veya sürtünme sönümleyicileri yerleştirilir (Şekil 6.1). Ama bunu uygulamada yapmak neredeyse imkânsızdır. Çünkü yapılarımız çok katlıdır ve sönümleyicilerin mesnetleneceği bir nokta bulunmamaktadır. Bu problemi çözmek için ayarlı kütle sönümleyiciler (AKS) geliştirilmiştir (Soong ve Constantinou, 1928). Ayarlı Kütle Sönümleyici (AKS); bir kütle, bir yay ve bir sönümden oluşur ve yapıya etkileyen dinamik etkileri azaltmak için kullanılan bir sistemdir. Temel amacı, yapıların çevresel faktörlerden (rüzgâr, deprem vs.) kaynaklanan titreşimlerin, zararlı etkilerini yok etmek ya da mümkün olduğu kadar azaltmaktır. Yapının kütlesi ile yapı üzerine eklenen AKS'nin kütlesi arasında bir faz farkı oluşturularak atalet kuvvetinin sebep olduğu enerjiyi sönümlemektir. AKS parametreleri uygun şekilde seçilerek, yapının istenen titreşim moduna ayarlandığı takdirde, o moddaki titreşim enerjisinin bir kısmının AKS'ye aktarılması sağlanarak esas yapının titreşim enerjisi azaltılır (Okut, 2006).

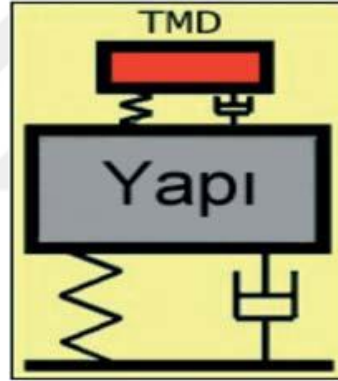


Şekil 6.1. Yapıya ilave sönüm sağlayan pasif sönümleyici sistemlerinin teorik olarak binanın tepesine bağlanarak kullanılması ve binanın tepesine AKS yerleştirilerek yapıyı kontrol etme düşüncesi (Soong ve Constantinou, 1994)

AKS'ler farklı şekilde yapıya mesnetlenebilir (Şekil 6.2). AKS'lerin en yaygın kullanılan modeli; kütle, yay ve sönümleyiciden oluşan tek serbestlik dereceli modelidir (Şekil 6.3).



Şekil 6.2. Çeşitli AKS tipleri (Soong ve Constantinou, 1994)



Şekil 6.3. Tek serbestlik dereceli AKS modeli (Aldemir ve Aydın, 2005)

6.1 Ayarlı Kütle Sönümleyiciler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Son yıllarda ayarlı kütle sönümleyicilerle ilgili ciddi araştırmalar yapılmaktadır, ancak ayarlı kütle sönümleyici tasarımında zemin etkisinin değerlendirildiği çalışmalar sınırlıdır.

Ayarlı kütle sönümleyici kavramı ilk olarak Hermann Frahm tarafından gemi makinelerinin gemi omurgasında meydana getirdiği titreşim tehlikesini ortadan kaldırmaya yönelik olarak 1909 yılında ortaya atılmıştır. Frahm bu sisteme ayarlı titreşim sönümlendirici adını vermiştir ve 1911 yılında patentini almıştır. Bu titreşim

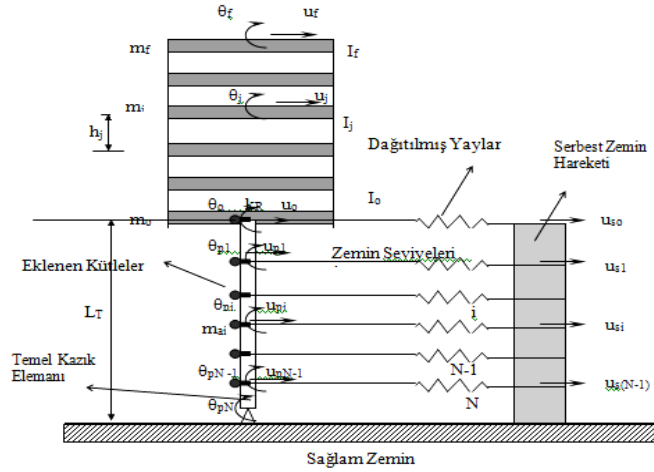
kontrol aleti hiçbir doğal sönüme sahip değildi. Alet sadece kütle, ayarlı kütle doğal frekansı ile dış etki frekansı birbirine çok yakın olduğunda etkili olmaktadır (Rana ve Soong, 1997).

Ayarlı kütle sönümleyiciler ile ilgili ilk teorik çalışma Ormondroyd ve Den Hartog tarafından 1928 yılında ortaya atılmış ve daha sonra yayınlanmıştır. Ayrıca Den Hartog 1940 yılında 'Mekanik Titreşimler' adlı kitabında optimum sönüm parametrelerini geliştirmiş, sistemin ana kütlede sönüm olmadığını fakat AKS'nin sönüm içerdiğini varsaymıştır (Ormondroyd ve Den Hartog, 1928). Daha sonra Bishop ve Welbourn (1952) ana kütlede de sönüm içerdiğini varsayarak çeşitli analizler yapmışlar ve çalışmalarını geliştirmişler. Falcon (1967) ana sisteme belli miktar sönümleyici ekleyerek sistemi optimize etmeyi planlamıştır. Ioi ve Ikeda (1978) sönüm parametreleri için fonksiyon olarak çeşitli düzeltme faktörleri eklemiştir. Warburton ve Ayorinde (1980) ana kütle oranı ve ana kütlede sönüm oranlarının optimum değerlerini tablolatırmışlardır. Thompson (1981) optimum AKS parametrelerini frekanslara göre ortaya koymuştur. Warburton (1981) sönümsüz tek serbestlik dereceli sistemlerde optimum AKS parametrelerini geliştirmiştir. Vickery vd. (1983) ana kütlede %5 sönüm oranı ile çalışmalar yapmış, bu çalışmalarını grafik haline getirmiştir. Daha sonra bu çalışmalarına ek olarak AKS'ye eklenmesi gereken optimum sönüm oranını hesaplamışlardır. Tsai ve Lin (1993) harmonik hareket yapan sistemin optimum parametrelerini geliştirerek sayısal sonuçların çizimlerini yapmışlardır ve çizimlere uygun ampirik parametreler geliştirmişlerdir. Villaverde ve Koyama (1993), 1985 yılında meydana gelen Mexico Depremi'ni STG ivme kaydı S60 E bileşenini kullanarak, AKS'nin 10 katlı bina üzerindeki etkilerini incelemiştir. Belirli bir bant genişliğinde ve uzun süreli deprem kayıtlarında binanın tepesine yerleştirilen 0.042 kütle oranına sahip AKS'nin, binanın tepe yerdeğiştirmesini %40 oranında azalttığını belirlemişlerdir. Yüksek şiddetli depremlerin meydana getirmiş olduğu etkiler dikkate alındığında, Soto-Brito ve Ruiz (1999), AKS'nin yüksek yoğunluktaki depremlerdeki davranışı incelemişlerdir. 22 katlı lineer olmayan bir binaya AKS yerleştirilerek orta yoğunluktaki ivme kayıtlarını kullandılar. Soto-Brito ve Ruiz (1999) yaptığı bu çalışmada AKS'nin yapılar üzerindeki pik tepkilerinin azaltılmasında etkili olmuştur. Takewaki (1998-1999), verilen rijitliklerle yapılar için optimal sönümleyicilerin yerleştirilmesini amaçlamıştır. Fleksibil sistemlerin bir sınıfının titreşim kontrolünde ayırık pasif sönümleyicilerin optimum dizaynı için bir

gradyan algoritması göstermiştir (De Silva, 1981). Visko-elastik olarak sönümlü yapılarda sönümün tekrar dizaynı için bir sonlu elemanlar perturbasyon metodu geliştirmişlerdir (Cao ve Mlejnek, 1995). Eş zamanlı optimal rijitlik ve sönümleyici katsayılarını bulmak için deformasyonları ve ivmeleri aynı zamanda kontrol eden, gradyan temelli bir algoritma ele almıştır (Takewaki, 1999). Çalışılan problem aslında ters bir öz vektör problemi idi. Zemin büyütme davranışını içeren, en üst kata yerleştirilen bir ayarlı kütle ile yapıdaki optimal vizkoz sönümleyiciler için bir metod göstermiştir (Takewaki, 2000). Bir yapının, zemine kesme-eğilme etkisi altındaki kazıklarla yerleştirilmesi durumunda, bir sismik rijitlik yöntemi geliştirilmiştir (Takewaki, 1999; Aydın, 2001).

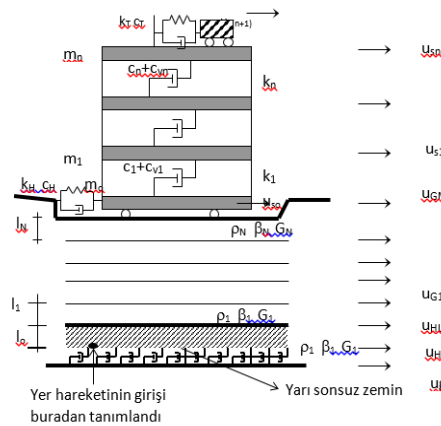
Toplam eklenen sönümleyicilerin belirli bir kısıtlama altında, bir yapısal sistemin sönümsüz doğal frekansı, hesaplanan transfer fonksiyonlarının büyüklüklerinin toplamını minimize ederek, optimal sönümleyici yerleşimini bulmak için sistematik ve etkili bir yöntem göstermiştir (İzuru Takewaki, 1997).

Kesmeli, eğilmeli, kazıklı bir temele sahip bir yapı için etkili bir sismik rijitlik tasarımı geliştirilmiştir (Şekil 6.4). Üst yapının tasarımında farklı zemin seviyelerinin etkisi göz önüne alınarak, tasarım depremlerinin bir kısmı sağlam zeminde tanımlanmıştır. Bunun sonucunda, kat yerdeğiştirmelerini düzenlemek için önemli parametreler olarak en düşük mod'un deformasyon değerleri ve toplam sistemin doğal periyodunu göz önüne alarak, sismik bir rijitlik tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin geliştirilmesinde kapalı formda karışık ters bir öz vektör problemi kullanılmıştır ve yönetici denklemlerin fiziksel açıklaması formal olarak non-lineer denklemlerin eş lineer denklemlere transformasyonu ile açıklanmıştır (Aydın, 2001).



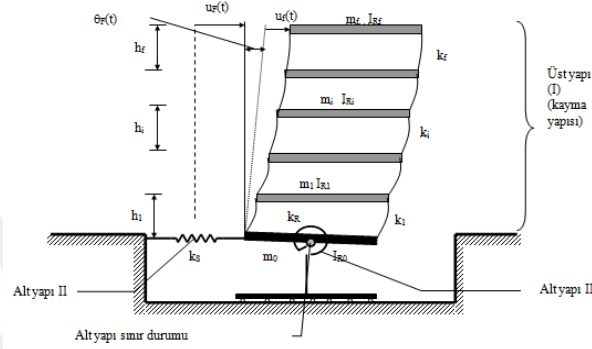
Şekil 6.4. Kazıklı temele sahip esnek alt ve üst yapının birlikte modeli (Takewaki, 1999)

En üst kata ayarlı bir kütle sönümleyici yerleştirilerek, zeminde davranışı büyüten faktörleri de kapsayan, yapıdaki optimal viskoz sönümleyici yerleşimini ortaya koyan yeni bir sistematik yöntem geliştirildi (Şekil 6.5). Zemin yüzeyinin histerik sönümleyicisi ve visko-elastik yarı sonsuz zemin içerisinde sönümleyiciler düşünüldü. Yapı–zemin etkileşim modeline “ *steepest direction search* ” yöntemi uygulandı. Sonuç olarak, en üst kata yerleştirilen ayarlı kütle sönümleyici ve her kata yerleştirilen viskoz sönümleyicilerin birlikte kullanılması durumunda yapının davranışı ve doğal periyot oranlarını düşürmek için etkili olduğu tespit edildi ve optimum sönümleyici yerleşimini belirlemek için zemin yüzeyinin modellenmesi önemli bir parametre olmuştur (Aydın, 2001).



Şekil 6.5. Üst katta yerleştirilen kütleli sönümleyici yay sistemi ile zemin yüzeyinin birlikte modeli (Takewaki, 2000)

Elastik olarak mesnetli bir kayma yapı modeli alt yapı kısımları ile bir örnek olarak ele alındı (Şekil 6.6). Üst yapı ile alt yapıyı oluşturan parçalar bir bütün olarak değerlendirildi. Üniform zemine mesnetlenmiş bir kayma kiriş modelinin öz vektörleri, başlangıç modeli için tamamlayıcı modlar olarak adapte edilen zeminin doğrusal ve açısal yerdeğiştirmelerine karşı gelen rijit modlarıyla birleştirildi. Sonuç olarak, bu yöntemin ters kullanımıyla dizayn probleminde rijitlik parametrelerini bulmak için etkili bir yöntem geliştirildi (Takewaki, 2000; Aydın, 2001).



Şekil 6.6. Zemin ile yapının birlikte modellenmesi (Takewaki , 2000)

Chen ve Chen (2004), Wu (2006) hareketli yüklerin, basit mesnetli kiriş üzerindeki titreşimlerin azaltılmasında AKS'nin etkisini Laplace dönüşümü kullanarak incelemiştir. Ziyaiyer (2008), Chen ve Chen (2004), Wu (2006) AKS'nin kütle, sönüm ve frekans oranlarının rezonans titreşimlerinin azaltılmasındaki etkisini incelemiştir. Samani ve pellicano (2012), hareketli yük altında kiriş titreşimlerinin azaltılmasında lineer ve nonlineer AKS'nin etkisini araştırmışlardır. Almazan (2012), AKS'nin simetrik ve yumuşak katlı binalara etkisini analiz etmiştir. Daniel ve Lavan (2014), üç boyutlu düzensiz yapıların çoklu mod kontrolünü sağlamak amacıyla sismik bir tasarım geliştirmişlerdir.

6.2 AKS'nin Dünyadaki Örnek Uygulamaları

6.2.1 John Hancock Tower (1975)

Amerika'nın Boston şehrinde yer alan John Hancock Tower binası, 1975 yılında inşa edilen, 244 m yüksekliğinde 60 katlı bir binadır. İnşası esnasında rüzgâr etkilerine

karşı korumak amacıyla ayarlı kütle sönümleyici uygulanmıştır. Ayarlı kütle sönümleyiciler yapının 58. katında iki ayrı köşeye yerleştirilmişlerdir. AKS, ayrıca binanın taşıyıcı sisteminden dolayı oluşan burulma etkisini de engellemek amacıyla kullanılmıştır. Kullanılan her bir sönümleyicinin ağırlığı 2700 kN olup, boyutları 5.2x5.2x1 m olan içi kurşun dolu çelik kutulardan oluşmaktadır. Kurşun doldurulmuş ağırlıklar yatay olarak yaylar ile yapıdaki iç kolonlara ankraj yardımıyla mesnetlenerek hidrolik sönümleyiciler ile kontrol altına alınmıştır. Yapıya etkiyen ivmelerin ardışık iki çevrimde 0.003 g'lık değeri aşması durumunda sistem otomatik devreye girer ve sönümleyiciler çalışmaya başlar. Bu sistem Le Messurien ve MTS System şirketleri tarafından yapılmıştır ve yaklaşık maliyeti 3 milyon dolar civarında olmuştur. Yapıya, ayarlı kütle sönümleyici takıldıktan sonraki rüzgâr etkisi altındaki titreşimlerde %40 ~ %50'lere varan azalmalar gözlemlenmiştir (Connor, 2003).



Fotoğraf 6.1. John Hancock Tower (URL 1, 2016)

6.2.2 Citicorp Center (1978)

ABD'nin Manhattan şehrinde bulunan Citicorp binası, ayarlı kütle sönümleyicinin en önemli uygulamalarından birisidir. Bu bina 279 m yüksekliğinde, 6.5 saniye periyoda sahip ve her iki eksen boyunca % 1 yapısal sönümü olan bir bina (Fotoğraf 2.2). Citicorp binasındaki ayarlı kütle sönümleyici uygulaması Le Messurien ve MTS

System şirketleri tarafından yapılmıştır. Ayarlı kütle sönümleyici, binanın 63. katına yerleştirilmiş ve ağırlığı, birinci modun modal kütlelerinin % 2'sine karşılık gelen 366 tondur. 6.25 saniye % 20 periyodunda çalışan, % 8 ile % 14 arasında bir sönüme ve 1,4 m maksimum yer değiştirme değerine sahip kütle sönümleyici, yapısal sönüme % 4 katkıda bulunmuştur ve titreşimi % 50 azaltmıştır. 1.5 milyon dolar maliyeti olan AKS, aynı görevin 2800 ton çelikle yapılması durumunda ortaya çıkacak 3.5 ~ 4.0 milyon dolarlık bir harcamanın önüne geçmiştir (Connor, 2003).



Fotoğraf 6.2. Citicorp Center (URL 2, 2016)

6.2.3 Canadian National Tower (1976)

Ayarlı kütleli sönümleyicinin örneklerinden birisi de Canadian National TV Tower'da uygulanmıştır. Toplam yüksekliği 533 m olan binanın 102 m yüksekliğinde çelik anteni bulunmaktadır (Fotoğraf 6.3). Bu yapıda uygulanan ayarlı kütle sönümleyici ile çelik antenin rüzgar etkisinden koruması amaçlanmıştır. Bu sönümleyiciler, halka şeklinde 35 cm genişliğinde, 30 cm derinliğinde ve 2.4 m ile 3 m çaplarında çelik yüzüklerden oluşmaktadır ve yapının 488 m ile 503 m yüksekliklerine yerleştirilmiştir. Her birinin ağırlığı ortalama 9 ton'dur ve 3 çelik kiriş tarafından antene bağlanmışlardır. Buna ek olarak sisteme dört ayrı hidrolik akışkan sönümleyici eklenerek, yapıya gelen enerji sönümlenmiştir (Connor, 2003).



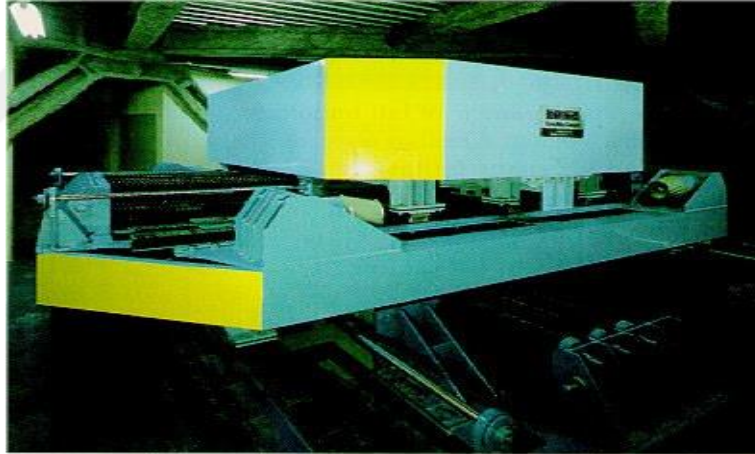
Fotoğraf 6.3. Canadian National TV Tower (URL 3, 1995)

6.2.4 Chiba Port Tower (1988)

AKS'nin Japonya'da uygulandığı ilk yapı Chiba Tower' dır. Chiba Port Tower 125 m yüksekliğinde 1950 ton ağırlığında çelik çerçeveli bir yapıdır (Fotoğraf 6.4). Yapının X yönünde birinci ve ikinci mod periyotları sırasıyla 2.25 saniye ve 0.51 saniyedir. Y yönündeki birinci ve ikinci mod periyotları, 2.7 saniye ve 0.57 saniyedir. Bu yapıda ayarlı kütle sönümleyici kullanılarak, X ve Y yönlerinde ilk modalarda sönümünü arttırmak amaçlanmıştır. Chiba Port Tower' da uygulanan AKS sistemindeki sönümleyiciler Mitsubishi Çelik Fabrikası tarafından üretilmiştir (Fotoğraf 6.5). Sönümleyici kütlelerinin, yapının X yönünde birinci moddaki modal kütlelerine oranı 1/120, Y yönünde birinci moddaki modal kütlelerine oranı 1/80'dir. Yapının birinci moddaki yeni periyotları, X yönünde 2.24 saniye ve Y yönünde 2.72 Saniye'dir. Sönümleyici sönüm oranı %15' dir ve yapıya göre maksimum göreceli yer değiştirmesi, her iki doğrultuda da yaklaşık olarak 1 m'dir. En üst katta, yer değiştirmede %30 ~ %40'a varan azalmalar tespit edilmiş ve eğilme momentinde %30 azalma olduğu belirlenmiştir.

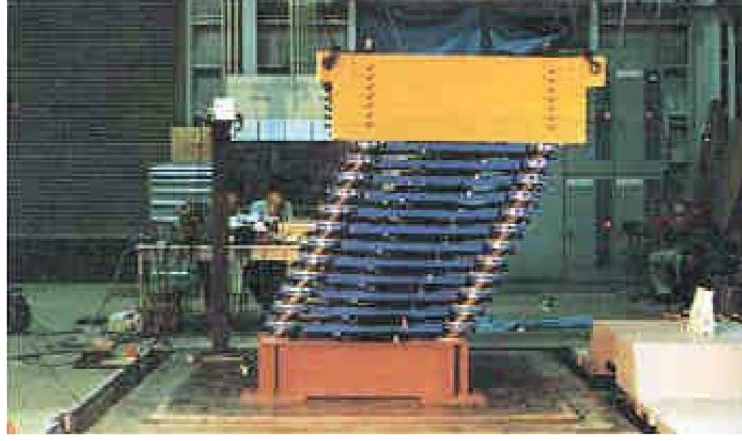


Fotoğraf 6.4. Chiba Port Tower (URL 4, 2014)



Fotoğraf 6.5. Chiba Port Tower'daki AKS Sistem (URL 5, 2006)

AKS sistemlerin ilk uygulamalarında, sönümleyici ve taşıyıcı elemanlar için karmaşık mekanizmalar kullanılmıştır. Bu sistemlerin maliyetlerinin yüksekliği, kütlelerinin ve hacimlerinin büyüklüğünün yanında uygulamadaki zorlukları nedeniyle yeni versiyonları bu olumsuzluklar giderilecek şekilde üretilmiştir. Aşağıda sarsma tablasında dinamik etki altındaki bir AKS sistemin yaylarındaki şekil değiştirme durumu görülmektedir (Fotoğraf 6.6) (Connor, 2003).



Fotoğraf 6.6. AKS Sistemin Yaylarındaki Şekil Değiştirme (Connor, 2003)

6.2.5 Crystal Tower (1990)

Japonya'nın Osaka kentinde bulunan Crystal Tower; 157 m yüksekliğinde ve planda 28 m'ye 67 m boyutlarında, 44000 ton ağırlığındadır (Fotoğraf 6.7). Kuzey-güney yönünde periyodu 4 saniye, doğu batı yönünde periyodu 3 saniyedir. Crystal Tower'ın tasarım aşamasında, rüzgâr etkisiyle oluşacak titreşimleri azaltmak için bir sarkaç kütle sönümleyici dâhil edilmiştir. Her birinin ağırlığı 90 ton olan 9 tane havalandırma ve buz depolayıcı tanklardan altı tanesi çatı katına asılarak sarkaç kütle olarak kullanılmıştır (Fotoğraf 6.8).



Fotoğraf 6.7. Crystal Tower (URL 6, 2007)



Fotoğraf 6.8. Buz depolama tankı, Crystal Tower (Connor, 2003)

Doğu-Batı doğrultusunda kullanılan iki tankın sarkacının uzunluğu 3 m; Kuzey-Güney doğrultusunda kullanılan dört tankın sarkacının uzunluğu 4m'dir. Sarkaç sistemin enerjisini sönmölemek için viskoz sönmöleyiciler sarkaç sistemlere eklenmiştir (Connor, 2003).

6.2.6 London Millenium Bridge (2000)

10 Haziran 2000 yılında kullanıma açılmış olan London Millenium Bridge, açıldığı ilk gün yaklaşık 100 bin insan kullanmıştır ve açıldığı günden iki gün sonra döşemesinde meydana gelen aşırı titreşim nedeniyle yaya trafiğine kapatılmıştır (Fotoğraf 6.9). Yayaaların yürüyüşünden etkilenererek köprü döşemesinde rezonans meydana gelmiş ve yatay ivme yaklaşık olarak 0.25 g olarak ölçölmüştür. Çözüm için mühendisler çeşitli öneriler sunmuştur. Bunlardan bazıları; köprü yaya trafiğini sınırlandırmak, aktif kontrol sistemleri kullanmak, pasif kontrol sistemlerini ve köprü rijitliğini arttırmaktır. Bu durum için kalıcı harmonik hareket etkisi altında etkin sonuçlar veren ayarlı kütle sönmöleyicilerin kullanılması tercih edilmiştir (Okut, 2006).

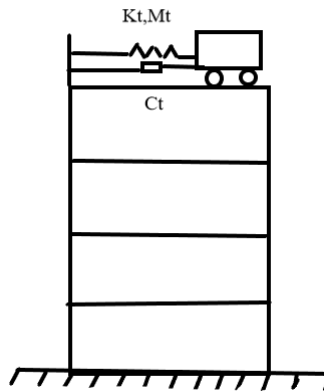


Fotoğraf 6.9. Ayarlı Kütle Sönümleyici Uygulaması, Millenium Bridge (URL 7, 2006)

6.3 Yapıya Etkiyen Deprem ve Rüzgâr Yüklerinde AKS Kullanımı

6.3.1 Rüzgâr etkisinde AKS kullanımı

1970’den beri AKS sistemlerinin üzerinde etkili bir şekilde çalışılmış ve rüzgâr titreşimlerinin etkilerini önlemek için birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların birçoğunda, AKS’lerin performansı artırılarak, tasarım parametreleri ve parametrelerin optimizasyonu üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Uygulamaların çoğunda yapının en üst katına tek bir AKS yerleştirilerek temel frekansa ayarlanmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Çok katlı bir yapının en yüksek noktasına AKS yerleştirilmesi (Soong ve Constantinou, 1994)

Rüzgâr yükleri doğada bulunan değişken yüklerden biridir. Rüzgâr gücü spektrumu, duruma göre farklılık gösterse de Kanada'nın uluslararası yapı yönetmeliği (1971) profesyonellerine göre rüzgâr akımı için baskın frekanslar yapının doğal frekanslarından daha düşüktür.

Birçok yüksek yapıda rüzgâr etkisinden kaynaklanan titreşim enerjisini azaltabilmek ve yapı konforunu sağlamak için AKS'li sistemler kullanılmakta ve iyi bir performans sergiledikleri gözlenmektedir (Wu, 2000).

6.3.2 Deprem etkisinde AKS davranışı

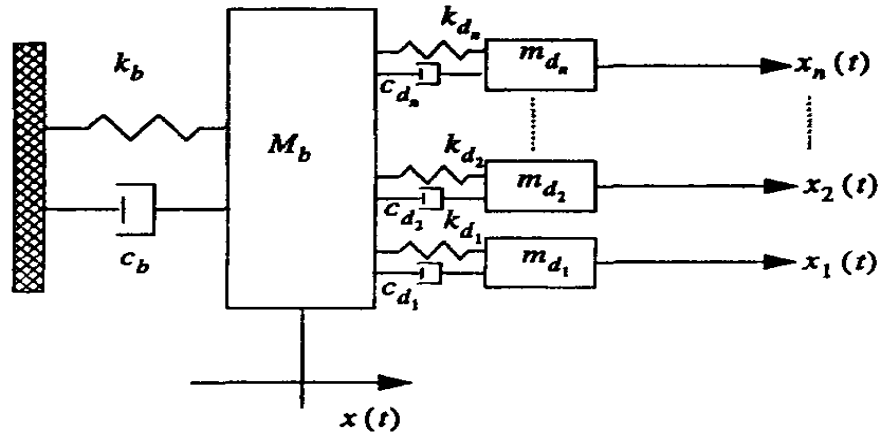
AKS'nin deprem uygulamalarındaki kullanımı ile ilgili araştırmalar tek bir AKS'nin genellikle deprem etkisinde çok etkili olmadığını göstermiştir (Wu, 2000). Bu durumda iki sonuç çıkarılabilir. Bunlardan ilki, deprem hareketi karmaşık ve anlık hareketler içerir bu nedenle deprem hareketi kararsız ve dengesiz bir davranıştır. Dahası maksimum değerine oldukça çabuk ulaşabilir. Tek bir AKS yerleştirilmiş binada kısa sürede meydana gelen deprem etkisine karşı hemen harekete geçmez. Sonuç olarak yapının enerji yutma kapasitesi ihtiyacı olduğu sırada sağlanamaz. İkincisi ise, deprem hareketleri geniş frekans bantları içermekte olup binanın durumunda ve yüksek yapıların modlarında önemli ölçüde titreşimlere sebep olur. Yapının ana frekansına ayarlı tek AKS'li sistemlerde yüksek modların engellenmesi çok zor olmaktadır ve tek AKS'li sistemlerin yüksek mod tepkilerini yükselttiği görülmüştür (Wu, 2000).

Depreme karşı bina tasarımında yapı konforunun yanında yapının güvenliği ve fonksiyonelliği ön plandadır. Bu nedenle AKS'li sistemler rüzgâra maruz kalan binalar için kullanmaya daha uygundur. Deprem rüzgâra göre daha değişken bir davranış göstermektedir ve bu değişkenlik ilk birkaç saniyede yer hareketinin ivmesinin en yüksek seviyelere gelmesiyle oluşur. Bununla birlikte sismik etkilerin frekansları, rüzgâr frekanslarına göre daha baskındır ve yapı çevresinde daha yoğundur. Deprem birçok yapı modunu etkilerken, rüzgâr ise genellikle binanın ilk modunu etkilemektedir. Son zamanlardaki araştırmalar AKS'lerin sismik performansı ile ilgili çelişkili sonuçlar ortaya koymuştur. Bazıları AKS'lerin kuvvetli depremlerin

etkilerini azalttığını onaylarken, diğerleri şüphelerini sürdürmektedirler. Bu anlaşmazlık büyük oranda AKS parametrelerinin seçiminde farklı deprem araştırmaları tarafından kullanılan sismik girdilerin frekans karakterlerindeki farklılıklardır (Wu, 2000).

6.3.3 Çoklu AKS'ler (ÇAKS)

Çoklu AKS sistemlerinin oluşumu, AKS' nin bir adet kullanılmasının, sadece tek bir mod frekansı kullanımı anlamına geldiği için, oluşan eksikliği fark eden araştırmacıların birçok moda ayarlanabilen sistem geliştirme ihtiyacından doğmuştur. Bu sistem çoklu AKS (ÇAKS) sistemi olarak isimlendirilmiştir (Şekil 6.8). Tek serbestlik dereceli bir sisteme (SDOF) birçok frekansa ayarlanabilen AKS'ler eklenerek rastgele geniş frekans bandında analiz yapılmasıyla ÇAKS sistemlerin AKS'ye göre daha etkili oldukları saptanmıştır (Kareem ve Klie, 1995). ÇAKS yerleşim olarak da avantajlı olmalarına rağmen yerdeğiştirme kontrolünde geleneksel AKS tasarımına göre bir avantaj sağlayamamıştır (Wu, 2000).

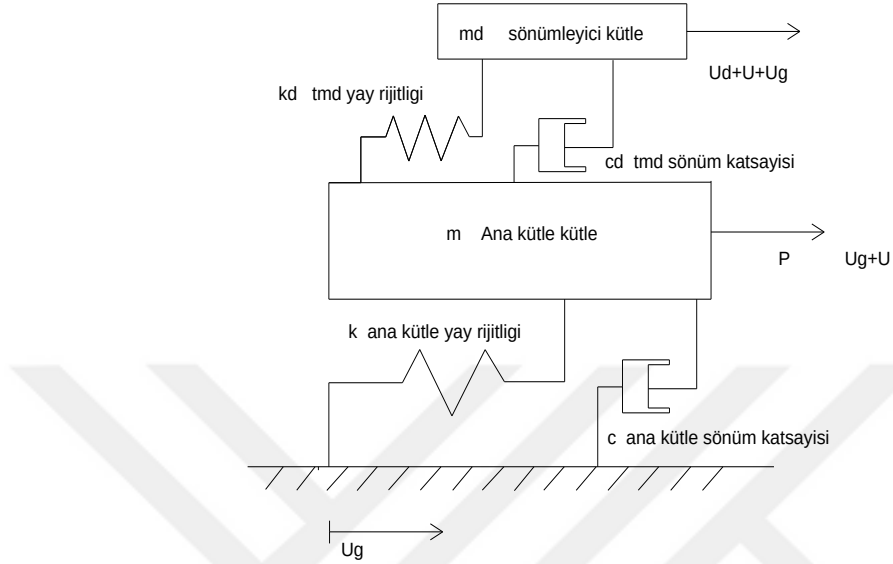


Şekil 6.8. Binanın en tepesine yerleştirilmiş SDOF bir sistemde ÇAKS yerleşimi (Kareem ve Klie, 1995)

Başka bir araştırmada 3 serbestlik dereceli bir sistemin her katına yerleştirilen AKS'lerle oluşturulan ÇAKS sisteme uygulanan harmonik ve deprem yükleri sonucunda modal kirlilik yaşanmış, katlara eklenen AKS'ler diğer katların yerdeğiştirmelerini az da olsa artırmıştır. Sonuç olarak her kata yerleştirilen ÇAKS'lardan gerekli performans alınamamıştır (Rana ve Soong, 1997).

6.4 Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin Teorik Esasları

Tek serbestlik dereceli bir sistem üzerindeki AKS elemanları görülmektedir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. AKS ve elemanları

6.4.1 AKS'lerin tek serbestlik dereceli (SDOF) sistemlerde incelenmesi

Bu kısımda d alt indisi AKS'yi ifade etmekte olup esas yapı (bina), tek serbestlik dereceli sistemle idealize edilmiştir. Bu idealizasyonda bazı tanımlar aşağıdaki gibidir:

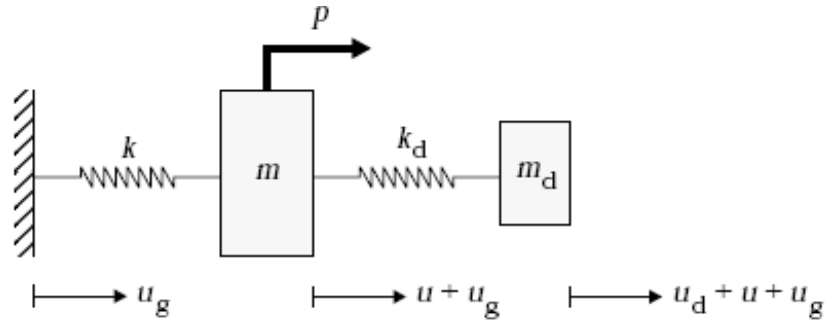
$$\omega^2 = k / m \quad (6.1)$$

$$\omega_d^2 = k_d / m_d \quad (6.2)$$

$$\mu = m_d / m \quad (6.3)$$

Burada ω yapının doğal frekansı, ω_d AKS'nin frekansı, μ kütle oranının, k ana kütle, m ana kütle, m_d ise AKS'nin kütlelerini ifade etmektedir.

6.4.1.1 Sönümsüz ana kütle ve sönümsüz AKS



Şekil 6.10. AKS bağlanmış tek serbestlik dereceli sistem (Connor, 2003)

Şekil 6.10 Tek bir serbestlik dereceli sisteme bağlanmış olan ayarlı kütle sönümleyicisini (AKS) göstermektedir. Hareket denklemleri yazılırsa:

$$m\ddot{u} + ku + k_d[u_d - u] = P \quad (6.4)$$

$$m_d\ddot{u}_d + k_d[u_d - u] = P \quad (6.5)$$

Bu sistemde yer hareketlerinin etkisi de düşünüldüğünde:

$$m_d[\ddot{u}_d + \ddot{u}] + k_d u_d = -m_d a_g \quad (6.6)$$

$$m\ddot{u} + ku + k_d u_d = -m_d a_g + P \quad (6.7)$$

denklemleri elde edilir. Burada u ana kütle yerdeğiştirmesini, $\ddot{u}$ ana kütle ivmesini, a_g yer ivmesini, P dış kuvveti, k_d AKS'nin yay sabitini, u_d AKS'nin yerdeğiştirmesini göstermektedir.

$$a_g = \bar{a}_g \sin(\Omega t) \quad (6.8)$$

$$P = \bar{p} \sin(\Omega t) \quad (6.9)$$

$$u = \bar{u} \sin(\Omega t) \quad (6.10)$$

$$u_d = \bar{u}_d \sin(\Omega t) \quad (6.11)$$

$$[-m_d \Omega^2 + k_d] \bar{u}_d - m_d \Omega^2 \bar{u} = -m_d \bar{a}_g \quad (6.12)$$

$$-k_d \bar{u}_d + [-m \Omega^2 + k] \bar{u} = m \bar{a}_g + \bar{p} \quad (6.13)$$

denklemlerinde $\bar{u}$ ve $\bar{u}_d$ 'nin çözümlenmesinden:

$$u = \frac{\bar{p}}{k} \left(\frac{1 - g_d^2}{D_1} \right) - \frac{m \bar{a}_g}{k} \left(\frac{1 + \mu - g_d}{D_1} \right) \quad (6.14)$$

bu denklemlerdeki D_1 değeri ise

$$D_1 = [1 - g^2][1 - g_d^2] - \mu g^2 \quad (6.15)$$

Ayrıca:

$$g = \Omega / \omega \quad (6.16)$$

$$g_d = \Omega / \omega_d \quad (6.17)$$

olarak tanımlanır, buna göre:

$$1 - g_d + m = 0 \quad (6.18)$$

$$\bar{u} = \frac{\bar{p}}{k} \quad (6.19)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\bar{p}}{k_d} (g^2) + \frac{m\bar{a}}{k_d} \quad (6.20)$$

Bu tercih ana kütleyi yer hareketinden ayırmaktır. Dahas dış kuvvetten kaynaklı tepkiyi azaltmaktır. Bu azalma $\frac{\bar{p}}{k}$ kadardır. μ kütle oranı genelde 0.01 ~ 0.1 arasında değişmektedir. Optimum sönüm frekansı, dış etki frekansına yakın bir değere sahiptir.

Bu durumun (6.18) denkleminde göre ilişkisi:

$$\omega_{dopt} = \frac{\omega}{\sqrt{1 + \mu}} \quad (6.21)$$

olarak hesaplanır. Ayrıca AKS'nin yay sabitinin optimum değeri:

$$k_{dopt} = [\omega_{dopt}]^2 m_d = \frac{\Omega^2 m \mu}{\sqrt{1 + \mu}} \quad (6.22)$$

denklem (6.20) de k_d yerine konulursa:

$$\bar{u}_d = \frac{1 + \mu}{\mu} \left(\left| \frac{\bar{p}}{k} \right| + \left| \frac{a_g}{\Omega^2} \right| \right) \quad (6.23)$$

Burada Ω dış etkinin frekansını göstermektedir. Elde edilen (6.14) denklemi sayesinde sönüm kütlesinin görelî hareketini ve μ değerini hesaplanabilir. Verilen μ ve Ω değerleri için yay sabiti (6.22) denklemi ile bulunabilir. Bu yay sabiti, büyük olan zorlanmış frekanslar için uygulanır. Kütle sönümleyicinin özellikleri denklem (6.13)' de belirtilmiştir. Denklem (6.14) ise tepkileri tanımlamak amacıyla. Bu

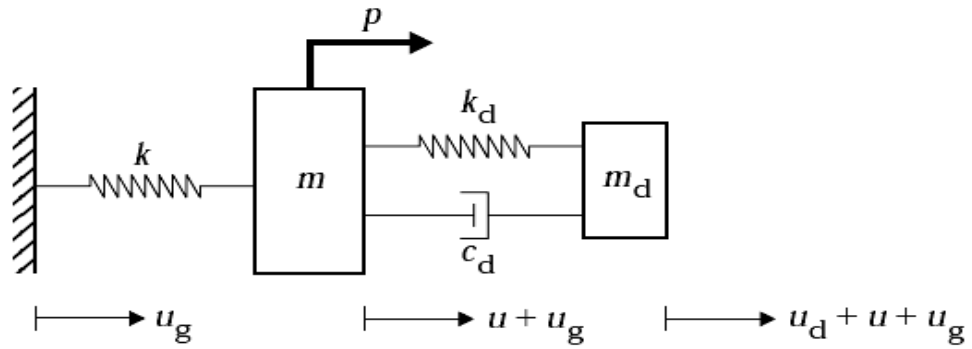
denklemlerde bir zorlanmış frekans mevcuttur. Sonuç olarak ana kütle, yer hareketi altında bu koşullara göre hareket edecektir (Connor, 2003).

6.4.1.2 Sönümsüz ana kütle ve sönümlü AKS

Şekil 6.11’de de görüldüğü gibi AKS ile ana kütle arasına bir sönümleyici eklensin. Bu durumda her iki kütle için hareket denklemi :

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g \quad (6.24)$$

$$m \ddot{u} + ku - c_d \dot{u}_d - k_d u_d = -ma_g + p \quad (6.25)$$



Şekil 6.11. Sönümsüz yapı sönümlü AKS’li sistem modeli (Connor, 2003)

şeklinde olacaktır. Denklem (6.24) ve (6.25)’e sönüm terimi eklemek periyodik etki ile tepki arasında faz farkına neden olur. Çözümün kökleri kompleks sayıdır. Buna göre:

$$a_g = \bar{a}_g e^{i\Omega t} \quad (6.26)$$

$$P = \bar{p} e^{i\Omega t} \quad (6.27)$$

Burada u ve u_d tepki genlikleri, kompleks değerler olarak düşünülür. a_g ’nin gerçel ve sanal kısımları, kosinüs ve sinüs girişleri ile ilişkilidir.

Uygun çözüm ne reel (kosinüs), ne de imajiner (sinüs) bölüm içindir. Bilindiği üzere bu reel ve imajiner kısımlar u ve u_d 'nin bölümleridir. Denklem (6.26) ve (6.27)'in her ikisinde de $e^{i\Omega t}$ kaldırılırsa:

$$[-m_d \Omega^2 + ic_d \Omega + k_d] \bar{u}_d - m_d \Omega^2 \bar{u} = -m_d a_g \quad (6.28)$$

$$-[ic_d \Omega + k_d] \bar{u}_d + [-m \Omega^2 + k] \bar{u} = -m \bar{a}_g + \bar{p} \quad (6.29)$$

şekline gelir. Bu denklemlerin çözümünden:

$$\begin{aligned} \bar{u} &= [-m_d \Omega^2 + ic_d \Omega + k_d] \bar{u}_d - m_d \Omega^2 \bar{u} \\ &- m_d a_g [f^2 - g^2 + i2\xi_d gf] - \frac{\bar{a}_g}{kD_2} [(1+\mu)f^2 - g^2 + i2\xi f(1+\mu)] \end{aligned} \quad (6.30)$$

$$\bar{u}_d = \frac{g^2 \bar{p}}{KD_2} - \frac{\bar{a}_g m}{kD_2} \quad (6.31)$$

$$D_2 = [1 - g^2][f^2 - g^2] - [\mu g^2 f^2] + i2\xi_d gf[1 - g^2(1+\mu)] \quad (6.32)$$

olarak tanımlanır.

$$f = \frac{\omega_d}{\omega} \quad (6.33)$$

şeklinde ifade edilebilir. Kompleks çözüm kutupsal çözüme çevrilirse:

$$\bar{u} = \frac{\bar{p}}{K} H_1 e^{i\delta_{s1}} - \frac{m \bar{a}_g}{k} H_2 e^{i\delta_3} \quad (6.34)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\bar{p}}{K} H_3 e^{-i\delta_3} - \frac{m\bar{a}_g}{k} H_4 e^{i\delta_3} \quad (6.35)$$

H_1, H_2, H_3, H_4 statik büyütme faktörleri olup, şu şekilde tanımlanır:

$$H_1 = \sqrt{\frac{[f^2 - g^2]^2 + [2\xi_d g f^2]^2}{|D_2|}} \quad (6.36)$$

$$H_2 = \sqrt{\frac{[(1+\mu)f^2 - g^2]^2 + [2\xi_d g f(1+\mu)]^2}{|D_2|}} \quad (6.37)$$

$$H_3 = \frac{g^2}{|D_2|} \quad (6.38)$$

$$H_4 = \frac{1}{|D_2|} \quad (6.39)$$

$$i = \sqrt{-1} \quad (6.40)$$

Ayrıca bu denklemler :

$$\delta_1 = \alpha_1 - \delta_3 \quad (6.41)$$

$$\delta_2 = \alpha_2 - \delta_3 \quad (6.42)$$

$$\tan \delta_3 = \frac{2\xi_d g f [1 - g^2 (1 + \mu)]}{[1 - g^2][f^2 - g^2] - \mu g^2 f^2} \quad (6.43)$$

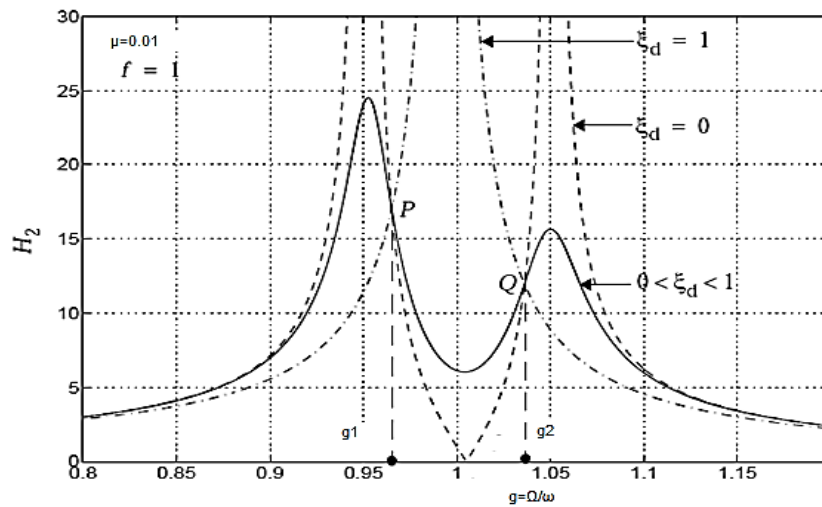
$$\tan \alpha_1 = \frac{2\xi_d g f}{[f^2 - g^2]} \quad (6.44)$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{2\xi_d g f (1 + \mu)]}{(1 + \mu) f^2 - g^2} \quad (6.45)$$

şeklinde tanımlanır.

Bu denklemlerden, etkili sonuçların elde edilebilmesi için, birçok uygulama sırasında kütle oranı 0.05'in altında bir değer alınır. Ayrıca bu aralık için dış yükün büyütme faktörü olan H_1 ve yer hareketinin büyütme faktörü olan H_2 değerleri çoğunlukla eşit olmaktadır. Bu durum faz farkları içinde geçerlidir. Yer hareketi ile uyuşan uygun çözüm için, sönüm kütlelerinin özelliklerinin optimum değeri incelenmelidir.

Şekil 6.12, H_2 'nin değişim miktarını göstermektedir. Bu grafik μ , f ve ξ_d 'nin belli değerleri için çizilmiştir. $\xi_d = 0$ olduğunda, $g = 1$ 'in her iki tarafında sonsuz genlikte iki adet pik değeri vardır. ξ_d değeri artırıldığında bu pik değerleri birbirine yaklaşır ve birtek pik değerde birleşir ($g \cong 1$). Genliğin davranışı m_d , k_d veya bunlara eşdeğer olan μ ve f değerlerine göre değişir. Dahası, bütün eğrilerin P ve Q gibi sabit iki noktadan geçmesidir. Bu eğriler farklı ξ_d değerleri ile ilişkilidir. Fakat P ve Q noktaları ξ_d değerinden bağımsızdır. Bu sebeple bu noktalar sadece μ ve f değerlerine bağlı olmak zorundadır. Bu sonuçların sürdürülmesi ile H_2 değeri:



Şekil 6.12. H_2 'nin g 'ye göre optimum olmayan değişimi (Connor, 2003)

$$H_2 = \sqrt{\frac{a_1^2 + \xi_d^2 a_2^2}{a_3^2 + \xi_d^2 a_4^2}} = \frac{a_2}{a_4} \sqrt{\frac{a_1^2 / a_2^2 + \xi_d^2}{a_3^2 / a_4^2 + \xi_d^2}} \quad (6.46)$$

Burada a terimi μ, g ve f değerlerine bağlıdır. H_2 'nin ξ_d teriminden bağımsız değeri için:

$$\left| \frac{a_1}{a_2} \right| = \left| \frac{a_3}{a_4} \right| \quad (6.47)$$

olur. Bu değer H_2 ile ilişkilendirildiğinde,

$$H_{2P,Q} = \left| \frac{a_2}{a_4} \right| \quad (6.48)$$

A değerlerini denklem (6.47)'de yerine koyduğumuzda g^2 için şu denklem elde edilir:

$$g^4 - [(1 + \mu) f^2 + \frac{1 + 0.5\mu}{1 + \mu}] g^2 + f^2 = 0 \quad (6.49)$$

İki pozitif kökü olan g_1 ve g_2 değerleri P ve Q noktaları ile ilişkili olan frekans oranlarıdır. Benzer bir şekilde 6.48 denklemi:

$$H_{2P,Q} = \frac{1 + \mu}{\left| 1 - p_{1,2}^2 (1 + \mu) \right|} \quad (6.50)$$

Birinci adım olarak g_1 ve g_2 'nin eşit olması için bir H_2 değeri gerekir. Artan ξ_d oranı ile pik genlik değeri P ve Q' nun aynı olan değerine kadar azaltılabilir. Bu durum AKS' nin optimal performansını temsil eder. ξ_d 'nin daha da artırılması pik değerini birleştirir ve genlik değeri optimal değerinin ötesine yükseltir.

P ve Q noktalarının eşit olması için gereken genlik değeri şu şekilde olur:

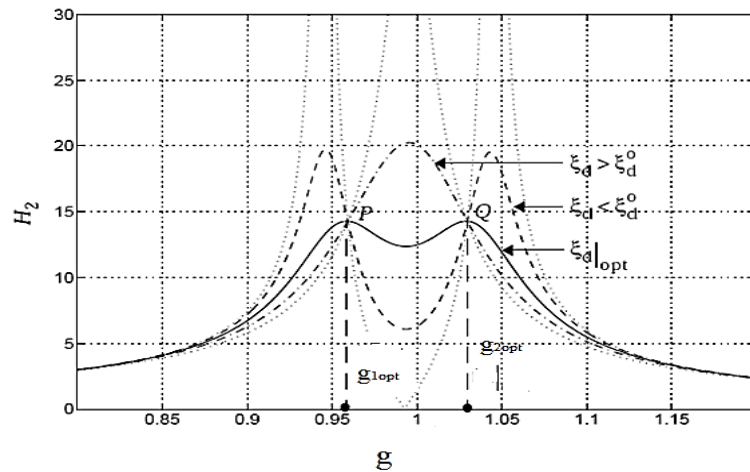
$$\left|1 - g_1^2(1 + \mu)\right| = \left|1 - g_2^2(1 + \mu)\right| \quad (6.51)$$

(6.49) denklemi kullanılarak g_1 ve g_2 değerlerini yerine koyarsak optimum ayar frekansı ile kütle oranı arasında bir değer elde edilir, bu değer:

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1 - 0.5\mu}}{(1 + \mu)} \quad (6.52)$$

$$\omega_{dopt} = f_{opt}\omega \quad (6.53)$$

Kökler ve optimal büyütme faktörleri ile ilişkili olan değerler ise: Şekil 6.13 H_2 'nin farklı değerleri için P ve Q noktalarını göstermektedir. Optimal davranış şu denklemlerle ifade edilir:



Şekil 6.13. f_{opt} Değeri için H_2 değerinin $g = \frac{\Omega}{\omega}$, ye göre değişimi (Connor, 2003)

$$g_{1,2opt} = \sqrt{\frac{1 \pm \sqrt{0.5\mu}}{1 + \mu}} \quad (6.54)$$

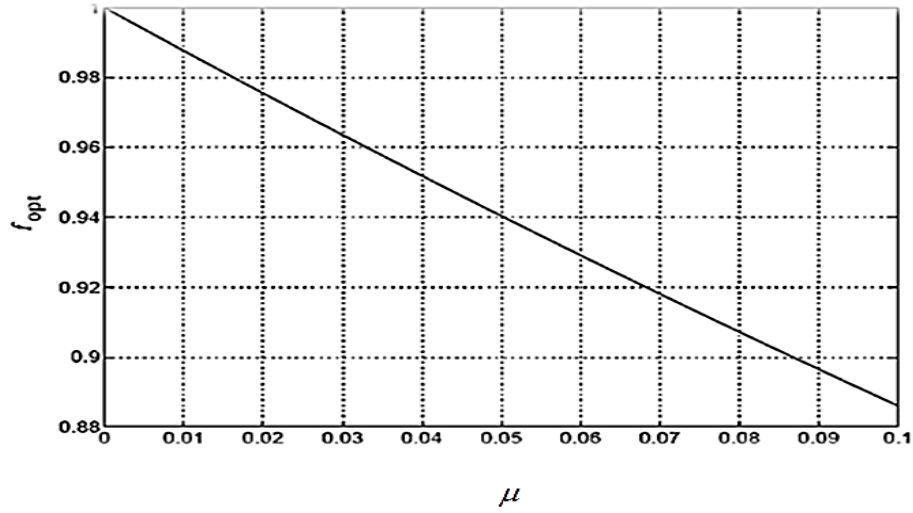
$$H_{2opt} = \frac{1 + \mu}{\sqrt{0.5\mu}} \quad (6.55)$$

Optimal ayar frekansındaki optimal sönüm için belirtilen durum:

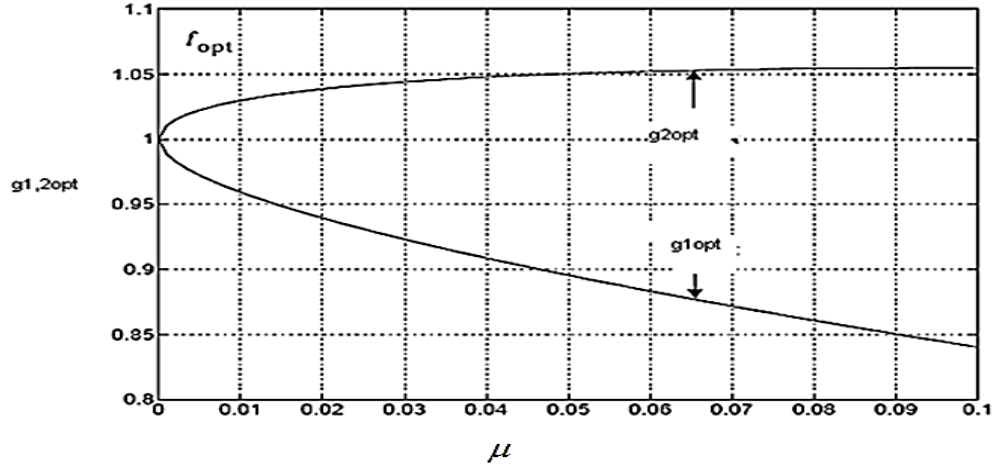
$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{\mu(3 - \sqrt{0.5\mu})}{8(1 + \mu)(1 - 0.5\mu)}} \quad (6.56)$$

şeklindedir.

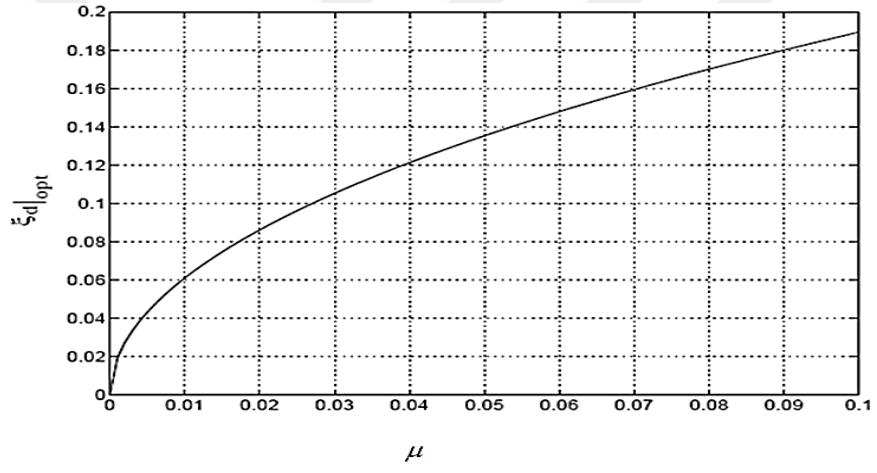
Şekil 6.14, 6.15 ve 6.16’de μ kütle oranının değeri ile optimal parametrelerin değişimini görülmektedir.



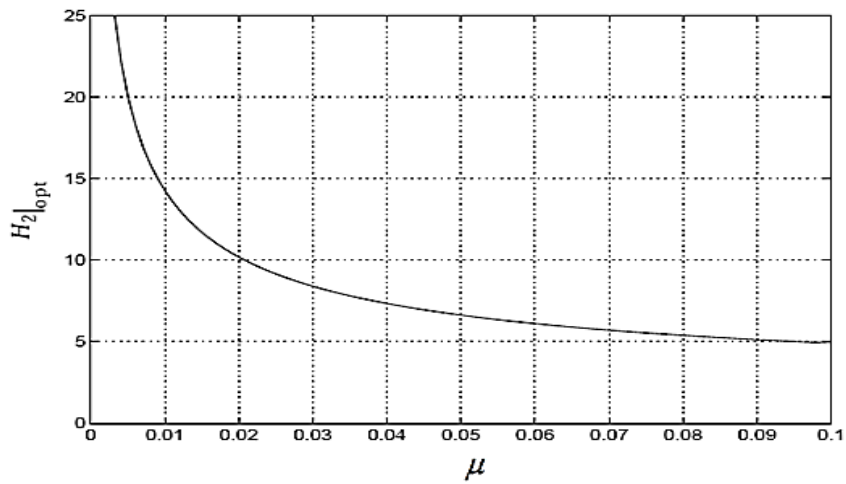
Şekil 6.14. f_{opt} ’değerinin kütle oranına göre değişimi (Connor, 2003)



Şekil 6.15. $g_{1,2,opt}$ değerinin kütle oranına göre değişimi (Connor, 2003)



Şekil 6.16. AKS için optimum sönüm oranının kütle oranına göre değişimi (Connor, 2003)



Şekil 6.17. Maksimum dinamik büyütme faktörünün optimum parametreler için kütle oranına göre değişimi (Connor, 2003)

Şekil 6.17’de dinamik büyütme faktörünün kütle oranına göre değişimi verilmiştir. AKS’nin sisteme olan etkisi belli bir frekans derecesindeki hareketi sınırlandırabilmektedir. Bu frekans derecesi ana kütlenin doğal frekansının merkezine toplanmış ve yaklaşık 0.15ω ’ya kadar uzar. Bu derecenin dışındaki davranışlarda sönümleyicinin etkisi önemli derecede azalacaktır.

AKS’siz ve sönüm içeren sistemin maksimum büyütme faktörü şu şekildedir:

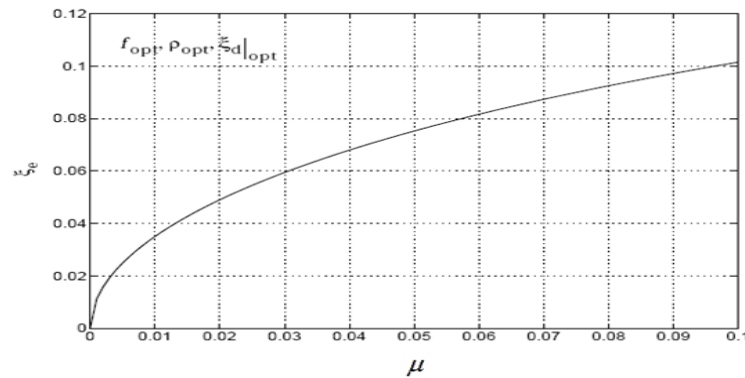
$$H = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad (6.57)$$

ξ küçük bir değer olduğu için:

$$H \cong \frac{1}{2\xi} \quad (6.58)$$

$$\xi_e = \frac{1}{2H_{2opt}} \quad (6.59)$$

şeklinde alabiliriz. Benzer formda belirtilen H_2 değeri, ana kütle için eşdeğer sönüm oranı olan ξ_e ’nin bir çeşit ölçüsüdür. Örneğin kütle oranı $\mu=0.02$ ise bu değer yaklaşık % 5 oranında ana kütlenin sönümüne eşdeğerdir. Şekil 6.18 ξ_e değerinin, kütle oranı μ ’ye göre değişme miktarını göstermektedir.



Şekil 6.18. ξ_e değerinin, kütle oranı μ ’ye göre değişme miktarını (Connor, 2003)

Sonuç olarak:

- 1) Tasarım yüküne göre, ana kütlede ve AKS' de izin verilebilecek yer değiştirme miktarı belirlenir. Bu veriler bize H_{2opt} ve H_{4opt} için tasarım değerlerini sağlar.
- 2) Gerekli kütle oranları tanımlanır. Bu kütle oranları hareket zorlarını kontrol eden değerlerdir. μ değerlerinin en büyük değeri seçilir.
- 3) Şekil 6.15' ye göre f_{opt} değeri tanımlanır.
- 4) ω_d değeri hesaplanır.

$$\omega_d = f_{opt} \omega \quad (6.60)$$

- 5) k_d hesaplanır.

$$k_d = m_d \omega_d^2 = \mu k f_{opt}^2 \quad (6.61)$$

- 6) ξ_{dopt} değeri Şekil 6.17'e göre tanımlanır.
- 7) c_d değeri hesaplanır.

$$c_d = 2\xi_{dopt} \omega_d m_d = \mu f_{opt} [2\xi_{dopt} \omega m] \quad (6.62)$$

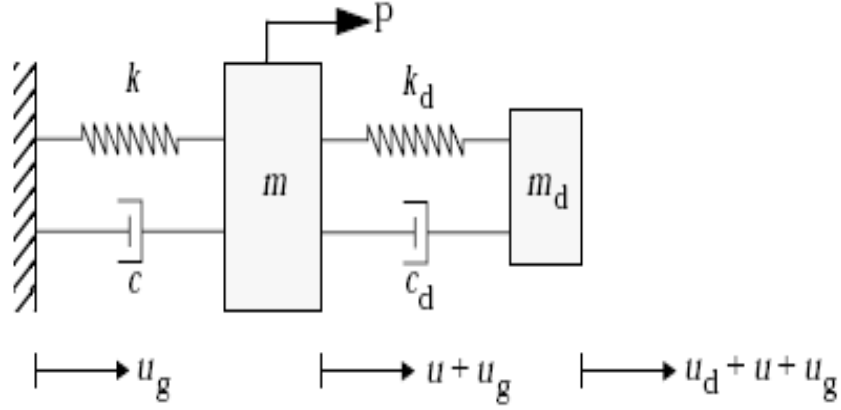
Yukarıda belirtilen 6.24 ve 6.62 arasındaki denklemler Connor (2003)'dan alınmıştır.

6.4.1.3 Sönüm içeren ana kütle ve sönüm içeren AKS

Bütün yapılar çok az da olsa sönüm içermektedirler. Bu durum AKS tanımlanmasında önemli bir durumdur. Şekil 6.19'teki ana sistemin kütlesi olan m , ana kütlelerin yay rijitliği k , sönüm katsayısı c 'den oluşmaktadır. AKS ise kütlesi, yay sabiti ve viskoz sönümleyici katsayısından oluşmuştur. Ana kuvvetin dış kuvvete ve yer hareketine maruz kaldığı düşünülürse:

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g \quad (6.63)$$

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u + m_d \ddot{u} = -m a_g + p \quad (6.64)$$



Şekil 6.19. Sönüm içeren ana kütle ve sönüm içeren AKS modeli (Connor, 2003)

Bu yöntem benzer şekilde sönümsüz durumdaki gibi sürdürülürse ve periyodik etkiye bağlı çözüm yazılırsa:

$$\bar{u} = \frac{\bar{P}}{K} H_5 e^{i\delta_5} - \frac{m\bar{a}_g}{k} H_6 e^{i\delta_6} \quad (6.65)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\bar{P}}{K} H_7 e^{-i\delta_7} - \frac{m\bar{a}_g}{k} H_8 e^{i\delta_3} \quad (6.66)$$

H ve δ değerleri ise şu şekildedir:

$$H_5 = \sqrt{\frac{[f^2 - g^2] + [2\xi_d g f^2]^2}{|D_3|}} \quad (6.67)$$

$$H_6 = \sqrt{\frac{[(1 + \mu) f^2 - g^2]^2 + [2\xi_d g f (1 + \mu)]^2}{|D_3|}} \quad (6.68)$$

$$H_7 = \frac{g^2}{|D_3|} \quad (6.69)$$

$$H_8 = \frac{\sqrt{1+[2\xi g]}}{|D_3|} \quad (6.70)$$

$$|D_3| = \{[-f^2 g^2 \mu + (1-g^2)(f^2 - g^2) - 4\xi\xi_d f g^2]^2 + \xi g(f^2 - g^2) + \xi_d f g(1-g^2(1+\mu))^2]\} \quad (6.71)$$

Ayrıca bu denklemler içinde tanımlanan:

$$\delta_5 = \alpha_1 - \delta_7 \quad (6.72)$$

$$\delta_6 = \alpha_2 - \delta_7 \quad (6.73)$$

$$\delta_8 = \alpha_3 - \delta_7 \quad (6.74)$$

$$\tan \delta_7 = 2 \frac{\xi g(f^2 - g^2) + \xi_d f g(1 - g^2(1 + \mu))}{-f^2 g^2 \mu + (1 - g^2)(f^2 - g^2) - 4\xi\xi_d f g^2} \quad (6.75)$$

$$\tan \alpha_3 = 2\xi g \quad (6.76)$$

şeklindedir.

H_2 ana kütleinin yerdeğiştirmesinin bir göstergesi (transfer fonksiyonu) olmak üzere daha önce belirtilen Şekil 6.9’da tek serbestlik dereceli bir sistemde ξ_d ’nin çeşitli değerleri için H_2 yerdeğiştirme değerinin, g zorlanmış frekansına göre değişim grafikleri gösterilmiştir. Bu grafik yapının sönüm içermediği kabul edilerek AKS’nin sönüm oranının artmasının yapı davranışını nasıl etkilediğini gösterir. AKS’nin sönüm

oranı olan $\xi_d=0$ değeri dikkate alındığında yapının doğal frekansı ile titreştirildiğinde, H_2 yerdeğiştirme değeri sonsuz olmaktadır. $0<\xi_d<1$ olduğunda, maksimum H_2 eğrisi sonsuza gitmeyip şekildeki gibi bir eğri elde edilir. $\xi_d=\infty$ değerine ulaştığında ana kütle ve AKS bir bütün gibi birlikte hareket ederek sistemin rezonans frekansında H_2 yerdeğiştirmesi yine sonsuz bir değere ulaşır. Fakat ξ_d değeri ne olursa olsun bu eğriler her zaman P ve Q gibi iki sabit noktadan geçer. Bu eğri için f , ω , $g_{1,2}$, H_2 , ξ_d değerlerinin uygun değerleri için optimum bir değeri mevcuttur. Bu değerler tanımlanmıştır (Rana ve Soong, 1997).

Şekil 6.13, H_2 'nin farklı değerleri için P ve Q noktalarını göstermektedir. Optimal davranış için maksimum olan genlik değerlerinin azaltılması gerekir. Birinci adım olarak g_1 ve g_2 'nin eşit olması için bir H_2 değeri gerekecektir. Bu dağıtımda Şekil 6.8 ile ilişkilendirildiğinde,

$$g^2 = \frac{1}{(1 + \mu)} \quad (6.77)$$

olur. Artan ξ_d oranı ile pik genlik değeri P ve Q' nun aynı olan değerine kadar azaltılabilir. Bu durum AKS'nin optimal performansını temsil eder. ξ_d 'nin daha da artırılması pik değerini birleştirir ve genlik değeri optimal değerinin ötesine yükseltir. P ve Q noktalarının eşit olması için gereken genlik değeri denklem (6.51)'in çözümünden g_1 ve g_2 değerleri elde edilir. g_1 ve g_2 değerleri hesaplandığında optimum ayar frekansı ile kütle oranı arasında bir değer elde edilir. ξ_{opt} , H_{2opt} , ω_{dopt} , $g_{1,2opt}$ değerleri denklemler (6.56), (6.55), (6.53) ve (6.54)'de belirtildiği gibi belirlenir. (6.63) ve (6.77) arasındaki denklemler Connor, (2003)'den alınmıştır.

ξ_{dopt} olduğu değerde ($\mu = 0.01$ değeri için) H_{2opt} değeri ve $g_{1,2opt}$ değeri mevcuttur. Denklem (6.39)'da belirtilen H_4 değeri AKS'nin yerdeğiştirmesinin bir ölçüsüdür.

AKS tasarımında $H_{2opt} < 7$ ve $\frac{H_4}{H_{2opt}} < 6$ değerlerinin aşılmama kriteri vardır. $0.03 <$

$\mu < 0.40$ arasında, yapının sönüm oranı ise $0 < \xi < 0.15$ arasında olmak kaydıyla aşağıdaki ampirik bağıntıdan (Ioi ve Ikeda, 1978) :

1. Mod için :

$$\tilde{f}_{opt} = f_{opt} - (0.241 + 1.7\mu_1 - 2.6\mu_1^2)\xi - (1.0 - 1.9\mu_1 + \mu_1^2)\xi^2 \quad (6.78)$$

$$\tilde{\xi}_{dopt} = \xi_{opt} + (0.13 + 0.12\mu_1 + 0.4\mu_1^2)\xi - (0.01 + 0.9\mu_1 + 3\mu_1^2)\xi^2 \quad (6.79)$$

$$\tilde{\omega}_{dopt} = \tilde{f}_{opt} \omega_1 \quad (6.80)$$

$$\tilde{k}_{dopt} = m_d \tilde{\omega}_{dopt}^2 = \mu_1 K_1 \tilde{f}_{opt}^2 \quad (6.81)$$

$$\tilde{c}_{dopt} = 2\xi_{opt} \omega_{opt} m_d = \mu_1 \tilde{f}_{opt} [2\tilde{\xi} \omega m] \quad (6.82)$$

şeklinde optimum değerler hesaplanır. (6.78)-(6.82) arasındaki denklemler, Soong ve Constantinou (1994)'den alınmıştır.

6.4.1.4 Çok serbestlik dereceli sistemlerin AKS tasarımı

Gerçek bir AKS'nin tasarımı yapılırken, ana yapıdan kaynaklanan birçok tasarım kısıtlaması ile karşılaşırız. Hafif, esnek ve doğal sönümü çok yüksek olmayan bir yapı için AKS tasarımı yaparken ana yapının kütle matrisi ve rijitlik matrisi belirlendikten sonra doğal frekansı belirlenir. Bu doğal frekans tek serbestlik dereceli sistemlerde

$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ dir. Çok serbestlik dereceli sistemlerde ise serbestlik derecesi kadar doğal

frekansı olacaktır. Bizim için önemli olan 1. moda karşılık gelen doğal frekanstır. Bu

doğal frekans $|k - \omega^2 * m| = 0$ determinantından bulunan ω_1 değeridir. Sonra $(\mathbf{k} - \omega_1^2 \mathbf{m}) \phi_1 = 0$ eşitliğinden yapının 1. moduna karşılık gelen mod vektörü bulunarak ve bütün terimler ϕ_{11} terimine bölünerek normalize edilir. Sonra modal kütlesi hesaplanır.

Örneğin üç serbestlik dereceli bir sistem için 1. mod vektörü $\phi_1 = \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \end{bmatrix}$ olur. Bu

değerler ϕ_{11} terimine bölünerek normalize edilmiştir. Mod vektörü olan $\phi_{1n} = \begin{bmatrix} 1 \\ \phi_{21n} \\ \phi_{31n} \end{bmatrix}$

bulunur. 1. Moda ait modal kütle,

$$M_1 = \phi_{1n}^T * \mathbf{m} * \phi_{1n} \quad (6.83)$$

şeklinde hesaplanır.

Rayleigh sönüm matrisi hesabıyla sistemin c sönüm matrisi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{1}{2} * \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \omega_1 \\ \frac{1}{\omega_2} & \omega_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \quad (6.84)$$

$$\mathbf{c} = a_0 * \mathbf{m} + a_1 * \mathbf{k} \quad (6.85)$$

Örneğin bir kayma çerçevesi için, üç serbestlik dereceli bir sistem olursa kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri aşağıdaki gibi olacaktır.

Kütle matrisi :

$$\mathbf{m} = [m_{ij}] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (6.86)$$

Yapısal sönüm matrisi:

$$\mathbf{c}=[c_{ij}]=\begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (6.87)$$

Rijitlik matrisi:

$$\mathbf{k}=[k_{ij}]=\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (6.88)$$

şeklinde olur.

Sistemin serbest titreşim frekansı matrisinin determinantı,

$$|\mathbf{k}-\omega^2*\mathbf{m}|=\begin{vmatrix} (k_1+k_2)-\omega^2*m_1 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & (k_2+k_3)-m_2*\omega & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3-m_3*\omega^2 \end{vmatrix}=0 \quad (6.89)$$

şeklinde olacaktır.

AKS kütlesi belirlenerek 1.moda ait modal kütle oranı μ_1 değeri belirlenir. Bu değer:

$$\mu_1=\frac{m_d}{M_1} \quad (6.90)$$

olarak hesaplanır. Sonra $0.03 < \mu < 0.40$ arasında, yapının sönüm oranı ise $0 < \xi < 0.15$ arasında olmak kaydıyla denklem (6.78)'de belirtilen $\tilde{f}_{opt}$ değeri hesaplanır.

Daha sonra, denklem (6.79), (6.80), (6.81) de belirtilen $\tilde{\xi}_{dopt}, \tilde{\omega}_{dopt}, \tilde{k}_{dopt}, \tilde{c}_{dopt}$

değerleri hesaplanır. Bulunan bu değerler sonucunda $H2_{opt} < 7$ ve $\frac{H4}{H2_{opt}} < 6$

değerlerinin aşılmadığına dikkat edilmelidir. Sisteme AKS eklenerek optimum dizayn parametrelerinden bulunan $\tilde{\omega}_{d\ opt}$, $\tilde{k}_{d\ opt}$, $\tilde{c}_{d\ opt}$ değerleri binanın kütle, rijitlik ve sönüm matrisine eklenerek analiz tekrar yapılır.

Örneğin üç katlı bir yapının en üst katına optimum parametrelere göre bir AKS yerleştirildiğinde sistemin kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri şu şekilde olacaktır:

$$\mathbf{m}=[m_{ij}]=\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (6.91)$$

$$\mathbf{k}=[k_{ij}]=\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_d & -k_d \\ 0 & 0 & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (6.92)$$

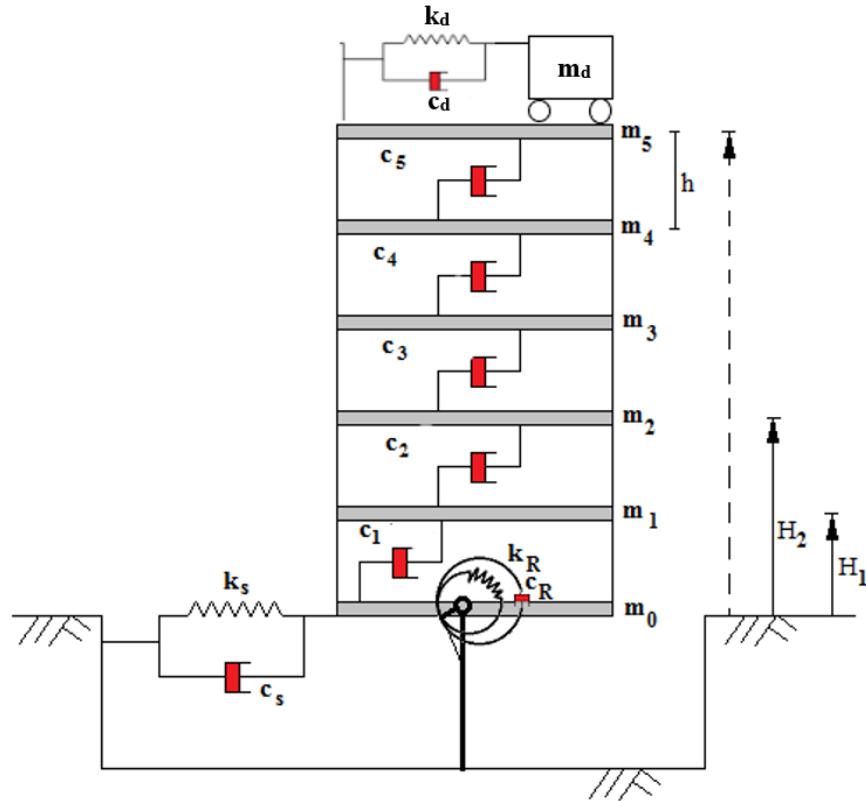
$$\mathbf{c}=[c_{ij}]=\begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3+c_d & -c_d \\ 0 & 0 & -c_d & c_d \end{bmatrix} \quad (6.93)$$

BÖLÜM VII

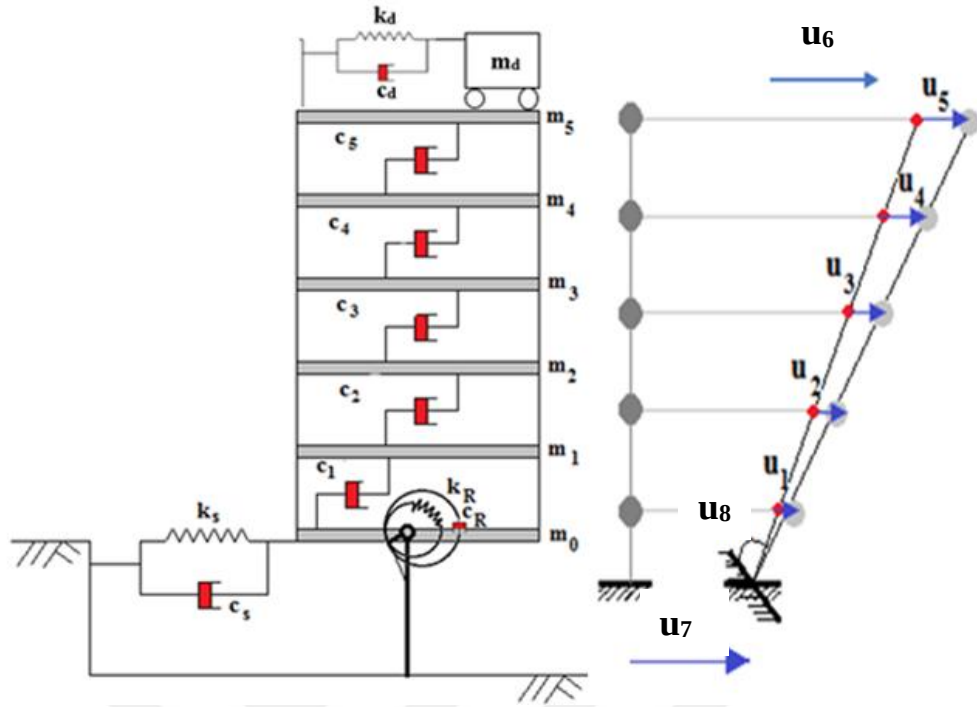
AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ DAĞILIMINA ZEMİN ETKİSİ

7.1 Problemin Formülasyonu

Şekil 7.1’ deki gibi 5 katlı yapı zemin modeli kabul edilmiştir. Sismik etkiye maruz sistem, genelleştirilmiş koordinat sisteminde zamana bağlı olarak $U(t)$ kadar yerdeğiştirme yaptığı düşünülmüştür. M sistemin kütle matrisi, M_d ayarlı kütle sönümleyiciye ait kütle matrisi, M_B yapının kütle matrisi, M_{BS} doğrusal yaya ait kütle matrisi, M_{BR} açısall yaya ait kütle matrisi, K sistemin rijitlik matrisi, K_B yapının rijitlik matrisi, K_S zeminin doğrusal rijitlik matrisi, K_R zeminin açısall rijitlik matrisi, K_d ayarlı kütle sönümleyicinin matrisi, C_B yapının sönüm matrisi, C_S zeminin doğrusal sönüm matrisi, C_d ayarlı kütle sönümleyicinin doğrusal sönüm matrisi, C_R zeminin açısall sönüm matrisi olarak tanımlanmıştır. M ve K matrislerine ait elemanlar bilinmektedir.



Şekil 7.1. Zemin-yapı profili



Şekil 7.2. Yapı modelinin deformasyon şekli

Şekil 7.2’de yapıda oluşacak yerdeğiştirmeler gösterilmiştir. 1., 2., 3., 4., ve 5. katlarda oluşan yerdeğiştirmeler u_1 , u_2 , u_3 , u_4 , u_5 olup u_6 ayarlı kütle sönümleyiciden meydana gelen yatay yerdeğiştirmeyi, u_7 yapının zeminden kaynaklanan yatay yerdeğiştirmesini, u_8 ise temel dönmesinden kaynaklanan açısai yerdeğiştirmeyi ifade etmektedir.

- Sistem kütle matrisi**

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

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

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

$$[M_{BR}] = \begin{bmatrix} m_1 H_1 \\ m_2 H_2 \\ m_3 H_3 \\ m_4 H_4 \\ m_5 H_5 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

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

$$E_1 = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 \quad (7.5)$$

$$E_2 = m_1 H_1 + m_2 H_2 + m_3 H_3 + m_4 H_4 + m_5 H_5 \quad (7.6)$$

$$E_3 = m_1 H_1^2 + m_2 H_2^2 + m_3 H_3^2 + m_4 H_4^2 + m_5 H_5^2 + I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3} + I_{R_4} + I_{R_5} \quad (7.7)$$

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

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 & m_1 * H_1 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & m_2 * H_2 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 & m_3 & m_3 * H_3 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 & 0 & m_4 & m_4 * H_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & 0 & m_5 & m_5 * H_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_d & m_d & m_d * (H_5 + 0,5) \\ m_1 & m_2 & m_3 & m_4 & m_5 & m_d & m_d + \sum_{l=0}^5 m_l & (m_d * H_5 + 0,5) + \sum_{l=0}^5 m_l H_l \\ m_1 * H_1 & m_2 * H_2 & m_3 * H_3 & m_4 * H_4 & m_5 * H_5 & m_d * (H_5 + 0,5) & m_d * (H_5 + 0,5) + \sum_{l=0}^5 m_l H_l & m_d * (H_5 + 0,5) + \sum_{l=0}^5 m_l H_l + \sum_{l=0}^5 I R_l \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

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.

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

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

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

$$[K_R] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_R \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

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

$$k_r = \frac{2,52}{1 - \nu} Gr^3 \quad (7.14)$$

Buradan sistem rijitlik matrisi,

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_4 + k_3 & -k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 + k_{opt} & -k_{opt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{opt} & k_{opt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_r \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

şeklinde elde edilmiş olur.

- **Sistem sönüm matrisi**

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{opt} & -c_{opt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{opt} & c_{opt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

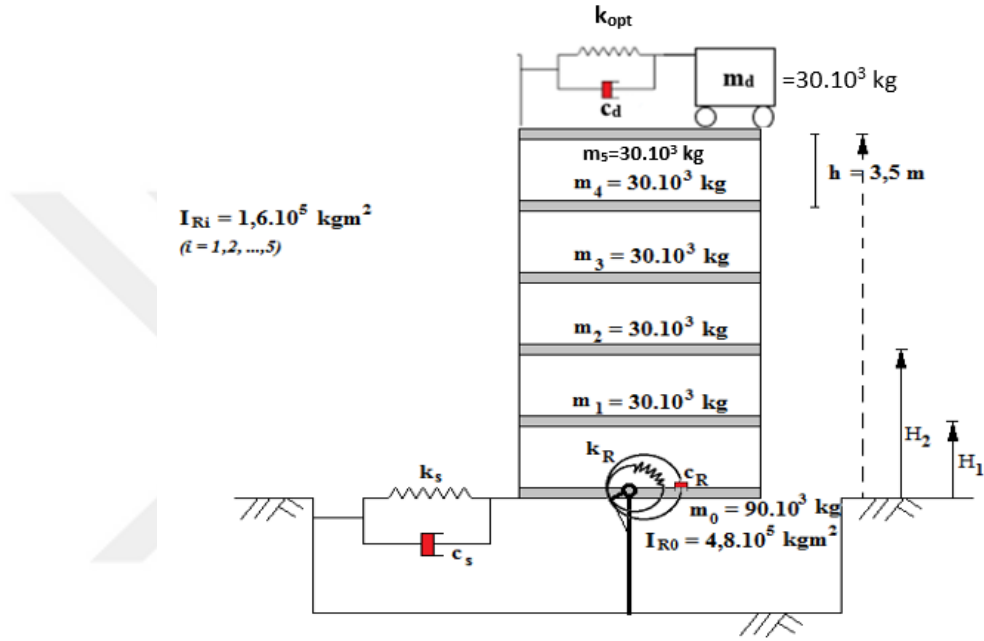
Hareketin zaman bağlı diferansiyel denklemi;

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\{\ddot{u}_g\} \quad (7.17)$$

şeklindedir.

7.2 Sayısal Örnek

Bu tez çalışmasında, bir yapının farklı zemin şartlarında sismik etki altında zemin türünün (kumların sıkılığının), yapıya yerleştirilecek ayarlı kütle sönümleyicinin optimum edilerek etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda; rijit durum ile gevşek, orta sıkı ve sıkı kum zemin profillerinden oluşan dört farklı durum için 5 katlı betonarme bir yapı ele alınmıştır (Şekil 7.3).



Şekil 7.3. Yapı-zemin etkileşimli 5 katlı ayarlı kütle sönümleyici modeli

Analizlerde kullanılacak zeminlere ait parametreler; 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/m ³)
			Statik	Dinamik	
Gevşek Kum	150	0,25	8	33	1450
Orta Sıkı Kum	300	0,30	15	151	1650
Sıkı kum	550	0,35	24	570	1850

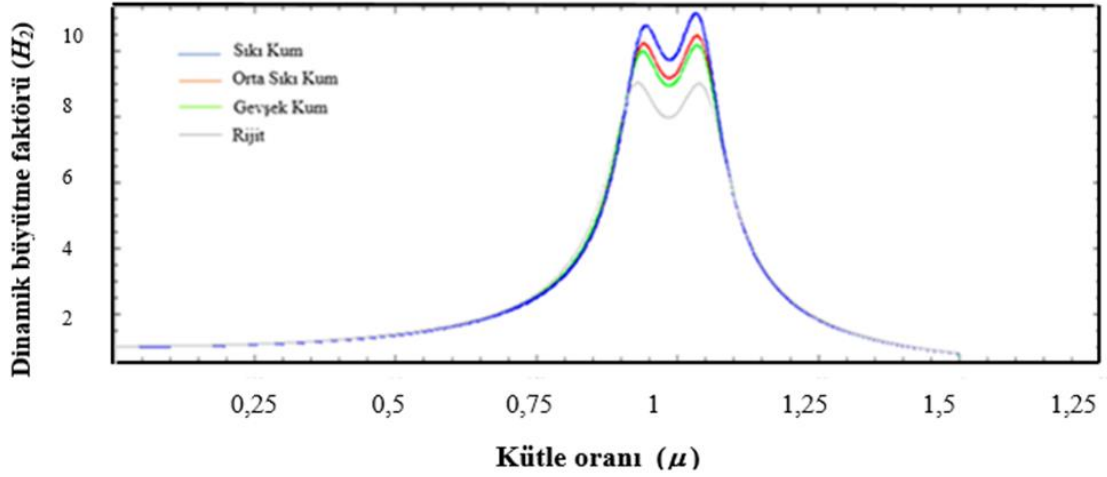
Yapı, Şekil 7.1 de gösterildiği gibi, zeminde yatay yönde ve dönmeye maruz bir yapı olarak modellenmiştir. Yapı, kayıcı mesnetten kaynaklanan yerdeğiştirmeye, ayarlı kütle sönümleyiciden kaynaklanan yerdeğiştirmeye, yapının kendi içinde yaptığı yerdeğiştirmeye ve dönmeden kaynaklanan yerdeğiştirmeye maruz bırakılmıştır (Şekil 7.2).

Seçilen 5 katlı yapıda, katların kütleleri (m) ve kat kütle atalet momentleri (I_R) sırasıyla; $m_i = 30 \times 10^3$ kg ve $I_{Ri} = 1,6 \times 10^5$ kgm² ($i=1, 2, \dots, 5$) ile temele ait $m_0 = 90 \times 10^3$ kg ve $I_{R0} = 4,8 \times 10^5$ kgm² ve kat yükseklikleri (h_i) 3 m olarak ele alınmıştır (Takewaki, 2001). Yapı-zemin etkileşiminin yatay hareketi (k_s, c_s), ayarlı kütle sönümleyici (k_{opt}, c_d) ve açısal hareketi (k_R, c_R) ile ilgili rijitlik ve sönüm katsayıları, Parmelee (1970) tarafından önerilen (7.13), (7.14) ve (7.18) denklemleri yardımıyla bulunmuştur. Yapısal sönüm $\zeta_o = \%2$, kat rijitlikleri üniform ve $2,5 \cdot 10^7$ N/m seçilmiştir. r , yapının oturma alanının eşdeğer teğet çemberin yarıçapı olup 4 m seçilmiştir.

7.2.1 Analizler ve Yorumlar

7.2.1.1 Optimizasyon

Mathematica 5.0 simgesel yazılım programı kullanılarak yapılan analizler sonucunda optimum parametreyi, zeminin sıklık durumu da göz önüne alınarak, seçilen ayarlı kütle sönümleyicinin kütle değeri etkilemektedir. Gevşek kum durumunda kütle; temelin kütlesi ile toplam kat kütlelerinin % 12'si seçilerek, orta sıkı kum durumunda kütle; temelin kütlesi ile toplam kat kütlelerinin % 9'u seçilerek ve sıkı kum için kütle; temelin kütlesi ile toplam kütlelerin % 8'i seçilerek belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon analizlerinde bulunan dinamik büyütme faktörünün kütle oranı ile değişiminin, rijit ve farklı sıklığa sahip kumlu zemin durumları için karşılaştırılması Şekil 7.4'de verilmiştir. Her bir zemin türü için optimum zemin parametreleri belirlenmiş olup zeminin optimum parametreleri kendi aralarında kıyaslandığında, sıkı kumun optimum değerinin gevşek kum ve orta sıkı kuma göre daha yüksek bir değere sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.4).

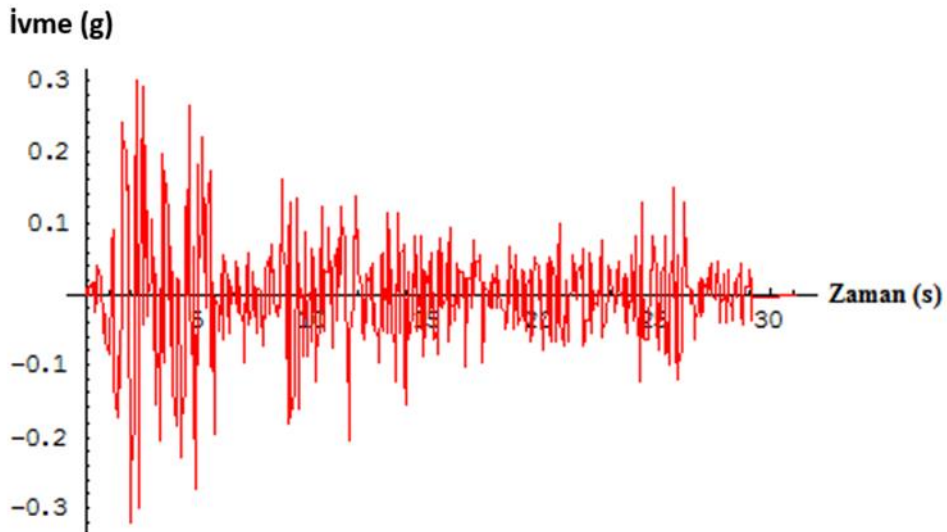


Şekil 7.4. Dinamik büyütme faktörünün zemin sınıfına göre optimum dağılımı

Yapının rijit durumu ile gevşek, orta sıkı ve sıkı kumlu zeminler için AKS'nin optimum parametrelerine ait değerleri, detaylı şekilde Ek-A'da verilmiştir.

7.2.1.2 Zaman tanım (time history) alanında deprem analizi

Sönümleyicili ve sönümleyicisiz sistemin, farklı zemin sıklığında, deprem altında meydana gelen değişimini incelemek amacıyla Newmark β - Metodu kullanarak El Centro deprem dataları ile analizi yapılmıştır (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. El Centro deprem datası

Bu tez kapsamında; sönümlü ve sönümsüz durumda her bir kat için yerdeğiştirme ve rölatif yerdeğiştirmenin zamanla değişimi ile sadece 5. Kat'a ait (tepe) ivmenin

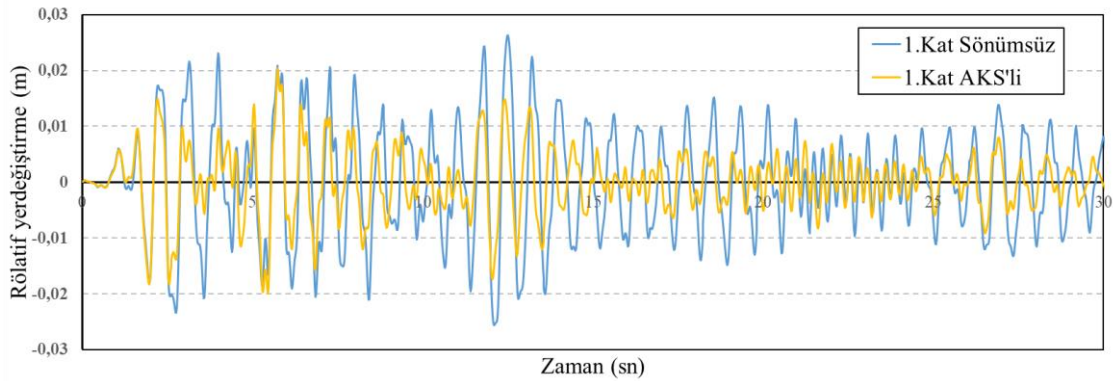
zamanla değişimi analiz edilmiştir. Rijit durum ile gevşek kumlu, orta sıkı kumlu ve sıkı kumlu zeminler için 1. Kat'a ait rölatif yerdeğiştirmenin zamana bağlı değişimleri şekil 7.6-7.9'da ve yerdeğiştirmenin zamana bağlı değişimleri ise şekil 7.10-7.13'de gösterilmiştir. Ayrıca, 5. Kat'a ait tepe ivme değerinin zamanla değişimi, şekil 7.14-7.17'de verilmiştir.

Yapılan deprem analizleri sonucunda rijit durum için sönümsüz ve AKS'li durumda 1. Katta rölatif yerdeğiştirmelerin azaldığı gözlemlenmiştir (şekil 7.6).

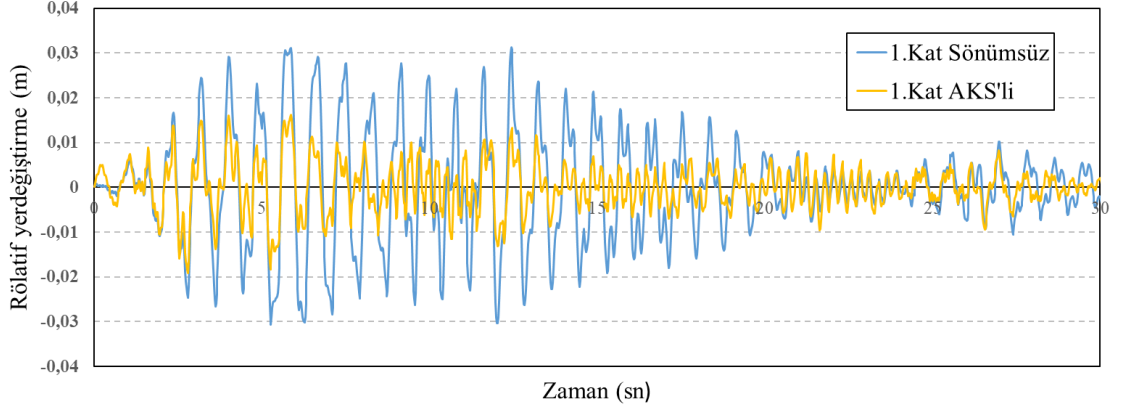
şekil 7.7'de gevşek kumlu zeminlerde sönümleyici kullanılması ve kullanılmaması durumu için 1. Katta meydana gelen rölatif kat yerdeğiştirmesi görülmektedir. Burada yapının en st katına yerleştirilen AKS'nin rölatif kat yerdeğiştirmesinde 0,01 m azalma meydana getirdiğini göstermektedir.

şekil 7.8'de orta sıkı kumlu zeminlerde sönümleyici kullanılması ve kullanılmaması durumu için 1. Katta meydana gelen rölatif kat yerdeğiştirmesi görülmektedir. Burada yapının en st katına yerleştirilen AKS'nin rölatif kat yerdeğiştirmesinde yaklaşık 0,01 m azalma meydana getirdiğini göstermektedir.

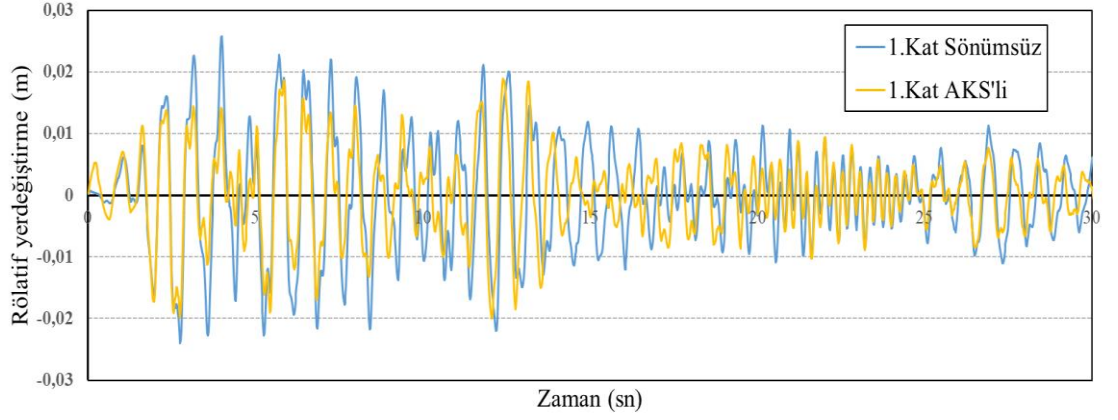
şekil 7.9' da sıkı kumlu zeminlerde sönümleyici kullanılması ve kullanılmaması durumu için 1. Katta meydana gelen rölatif kat yerdeğiştirmesi görülmektedir. Burada yapının en st katına yerleştirilen AKS'nin rölatif kat yerdeğiştirmesinde yaklaşık 0,001 m azalma meydana getirdiğini göstermektedir.



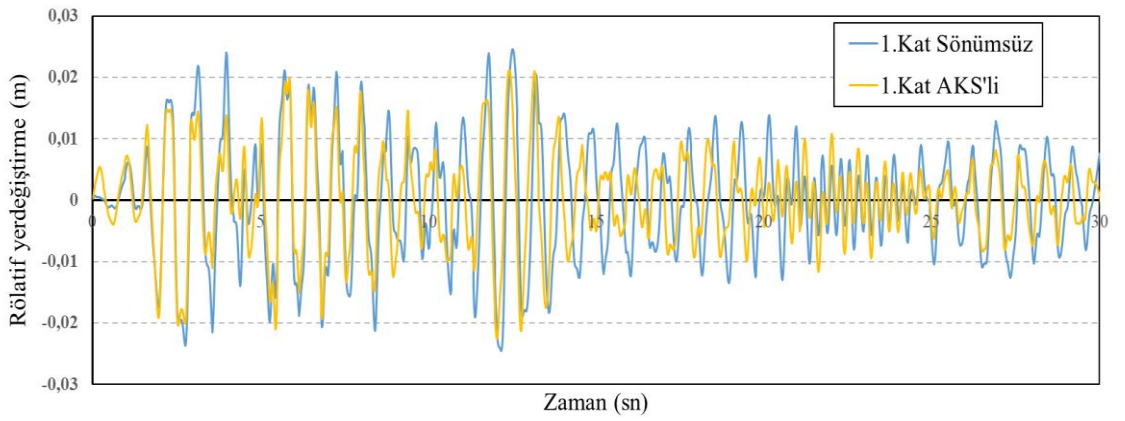
şekil 7.6. Rijit durumda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li rölatif yerdeğiştirme dağılımı



Şekil 7.7. Gevşek kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li rölatif yerdeğiştirme dağılımı



Şekil 7.8. Orta sıkı kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li rölatif yerdeğiştirme dağılımı



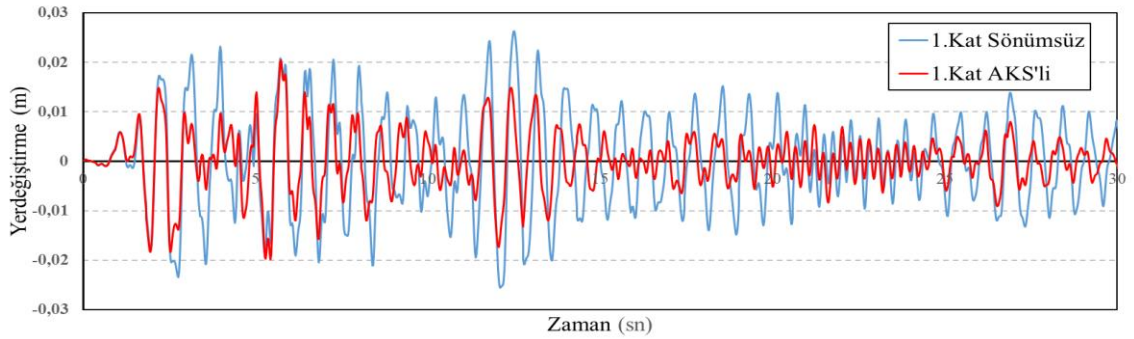
Şekil 7.9. Sıkı kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li rölatif yerdeğiştirme dağılımı

Yapılan deprem analizleri sonucunda rijit durum için sönümsüz ve AKS'li durumda 1. Katta meydana gelen yerdeğiştirmelerin azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 7.10).

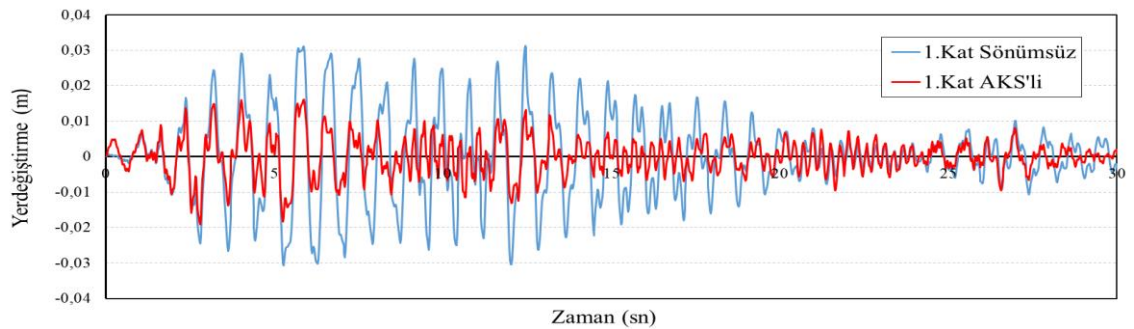
Şekil 7.11' de gevşek kumlu zeminlerde sönümleyici kullanılması ve kullanılmaması durumu için 1. Katta meydana gelen yerdeğiştirme görülmektedir. Burada yapının en üst katına yerleştirilen AKS'nin yerdeğiştirmesinde 0,01 m azalma meydana getirdiğini göstermektedir.

Şekil 7.12'de orta sıkı kumlu zeminlerde sönümleyici kullanılması ve kullanılmaması durumu için 1. Katta meydana gelen yerdeğiştirme görülmektedir. Burada yapının en üst katına yerleştirilen AKS'nin yerdeğiştirmesinde yaklaşık 0,01 m azalma meydana getirdiğini göstermektedir.

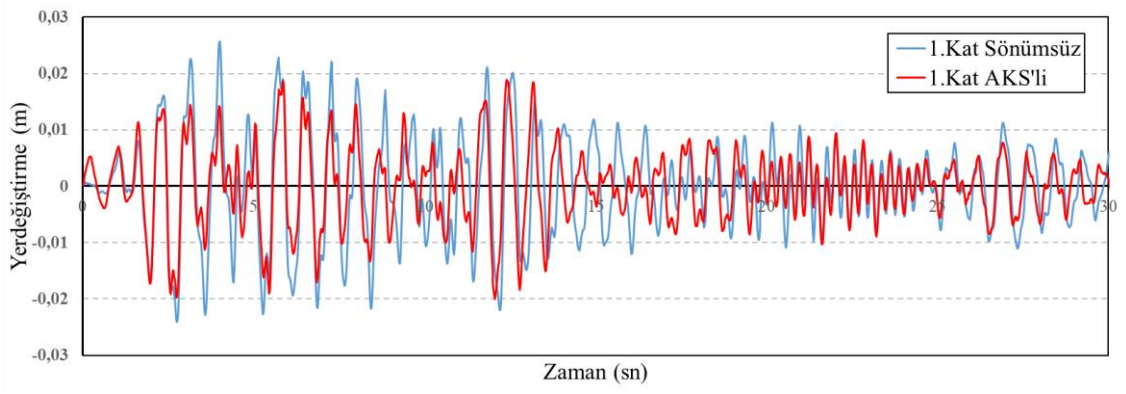
Şekil 7.13'de sıkı kumlu zeminlerde sönümleyici kullanılması ve kullanılmaması durumu için 1. Katta meydana gelen yerdeğiştirme görülmektedir. Burada yapının en üst katına yerleştirilen AKS'nin yerdeğiştirmesinde yaklaşık 0,01 m azalma meydana getirdiğini göstermektedir.



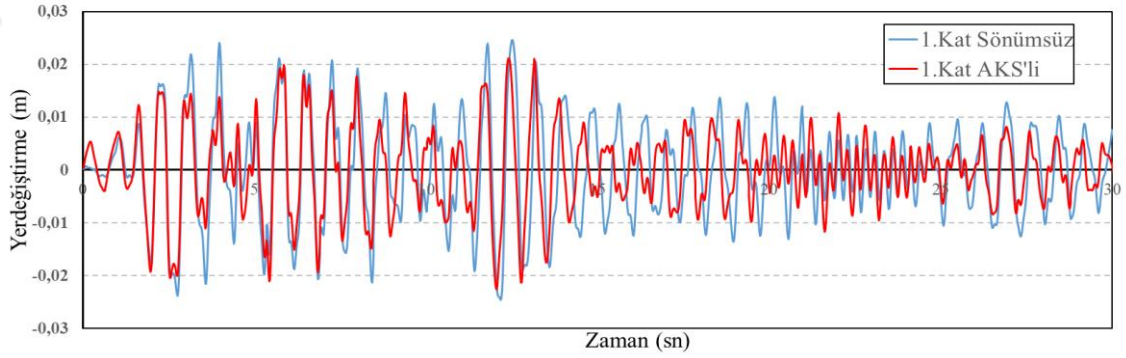
Şekil 7.10. Rijit durumda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li yerdeğiştirme dağılımı



Şekil 7.11. Gevşek kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li yerdeğiştirme dağılımı

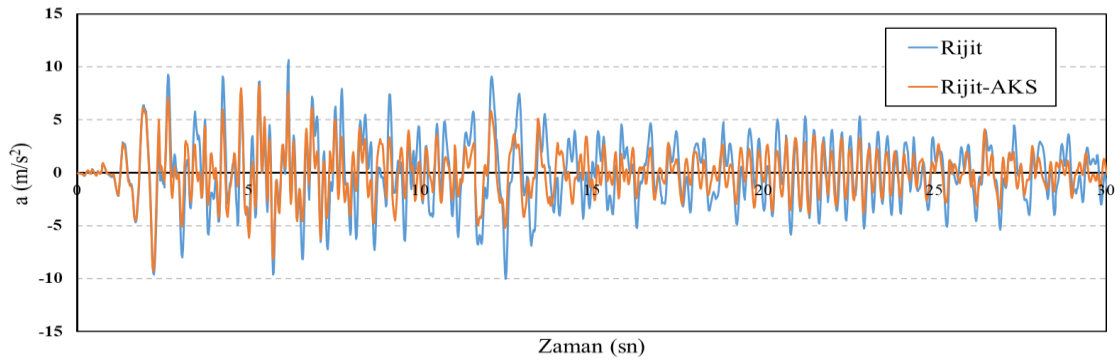


Şekil 7.12. Orta sıkı kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li yerdeğiştirme dağılımı

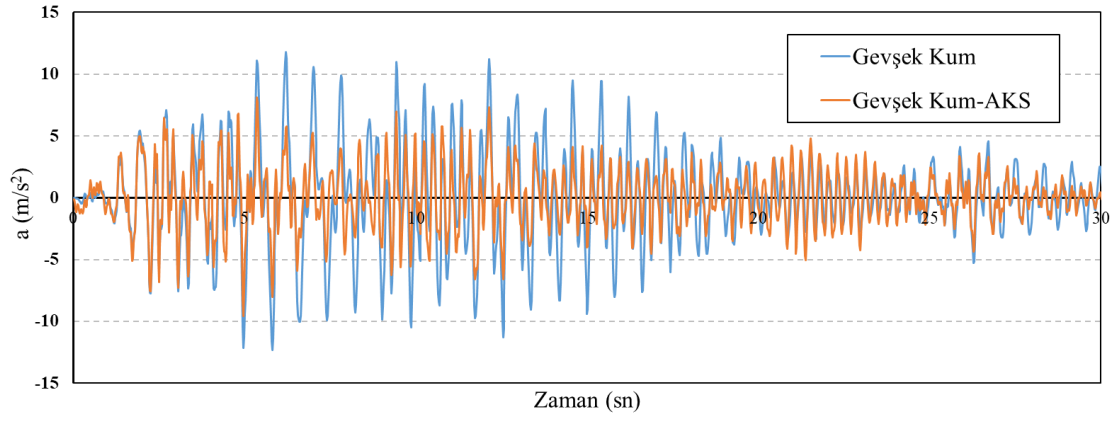


Şekil 7.13. Sıkı kumlu zemin durumunda 1. Katta sönümsüz ve AKS'li yerdeğiştirme dağılımı

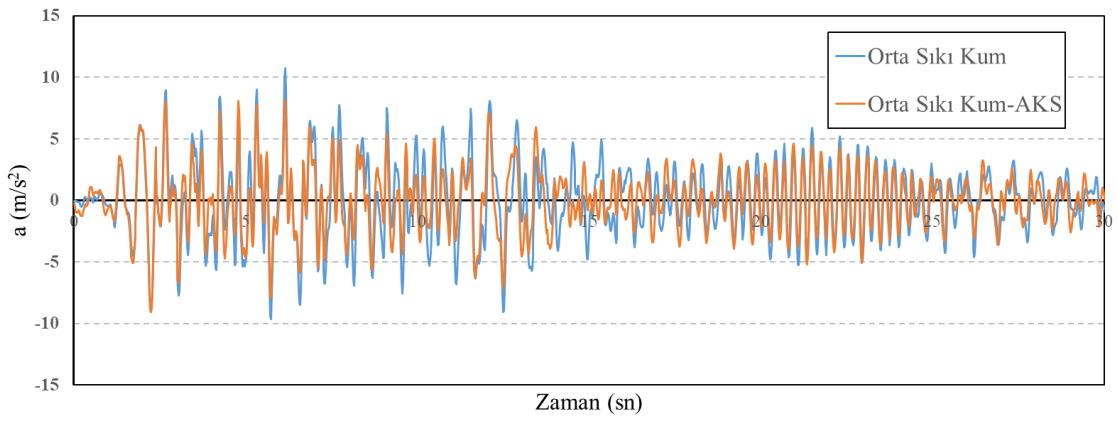
Şekil 7.14, Şekil 7.15, Şekil 7.16 ve Şekil 7.17'de görüldüğü üzere, 5. Katta ivme değerlerinde AKS kullanımı ile azalma meydana gelmiştir. Ayrıca Şekil 7.7, Şekil 7.11 ve Şekil 7.15'de görüldüğü gibi yapılan analizlerin en iyi sonuç verdiği zemin, gevşek kumlu zemindir.



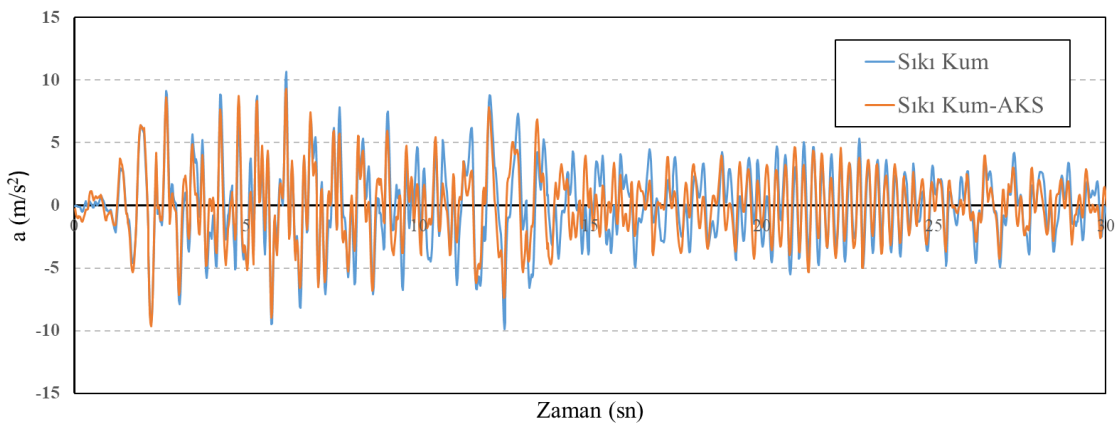
Şekil 7.14. Rijit durumda 5. Katta sönümsüz ve AKS'li ivme dağılımı



Şekil 7.15. Gevşek kumlu zemin durumunda 5. Katta sönümsüz ve AKS'li ivme dağılımı



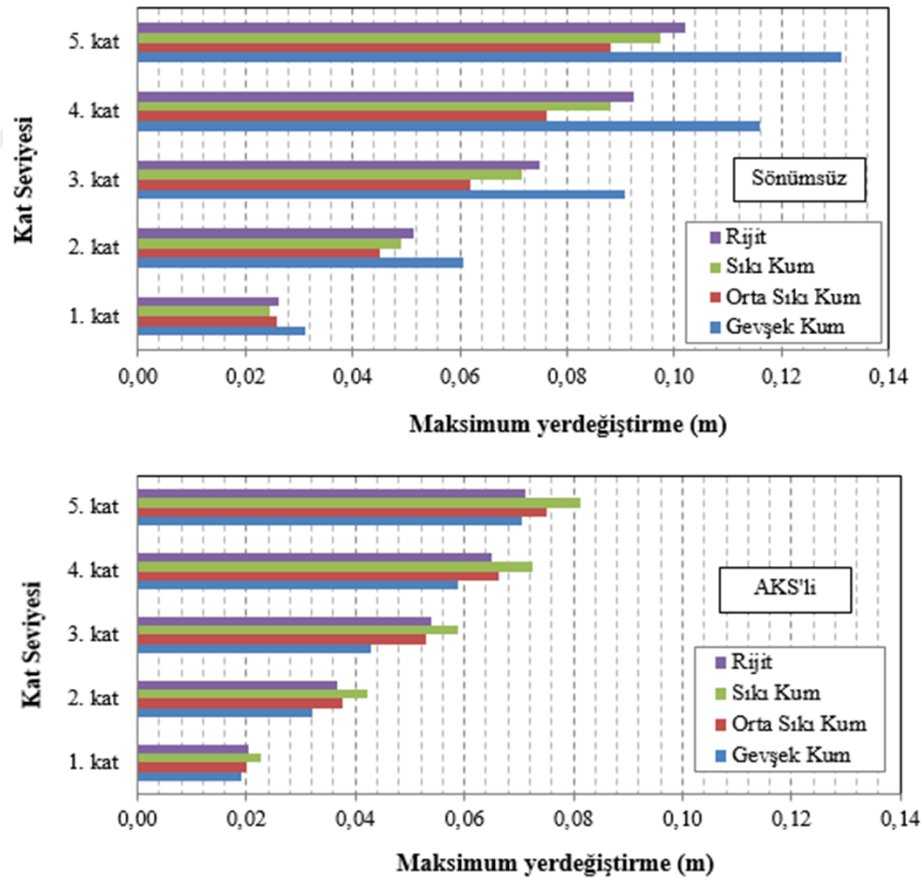
Şekil 7.16. Orta sıkı kumlu zemin durumunda 5. Katta sönümsüz ve AKS'li ivme dağılımı



Şekil 7.17. Sıkı kumlu zemin durumunda 5. Katta sönümsüz ve AKS'li ivme dağılımı

Sönümleyici kullanılması ve kullanılmaması halinde, rijit ve farklı sıklığa sahip kumlu zemin (gevşek, orta sıkı ve sıkı kum) durumları için 2. Kat, 3. Kat, 4. Kat ve 5. Kat'a ait zaman tanım alanındaki analizlerinden elde edilen toplam yerdeğiştirme, rölatif yerdeğiştirme ve sadece 5. Kata ait ivme grafikleri Ek-B'de verilmiştir.

Sönümleyicili ve sönümleyicisiz analizden; rijit, gevşek, orta sıkı ve sıkı kumlu zemin durumlarında her bir kat için maksimum toplam yerdeğiştirmeler Şekil 7.18'de karşılaştırılmıştır. Hem sönümlü hem de sönümsüz durumlarda, üst katlara çıkıldıkça zemin türü fark etmeksizin maksimum toplam yerdeğiştirmelerin arttığı belirlenmiştir. Sönümsüz yani AKS'nin kullanılmadığı durumda, maksimum toplam yerdeğiştirme, gevşek kumlu zeminde diğer zemin durumlarına göre kat seviyesi arttıkça daha büyük değerlere sahip olduğu ve yapıyı oldukça olumsuz etkidiği görülmüştür. AKS ile yapının iyileştirilmesi durumunda ise gevşek kumlu zeminin toplam yerdeğiştirme açısından olumsuz etkisi ortadan kalktığı belirlenmiştir (Şekil 7.18).



Şekil 7.18. Farklı sıklığa sahip zemin durumlarına göre sönümsüz ve AKS'li maksimum yerdeğiştirme dağılımı

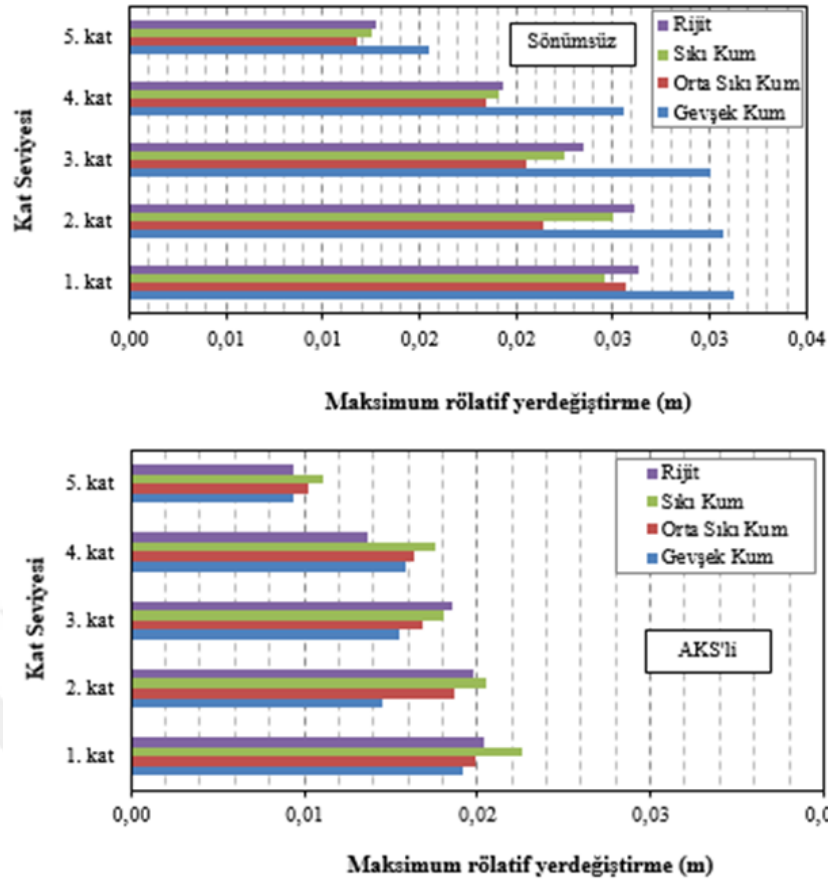
Sönümleyicili (AKS'li) sistemde rijit durum için; 1. Katta 0,02 m mertebelerine ulaşan maksimum yerdeğiştirme, 5. Katta 0,07 m civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü sistemde ise yine rijit durum için maksimum yerdeğiştirme; 1. Katta yaklaşık 0,03 m de maksimum değerine ulaşılırken 5. Katta 0,1 m olduğu belirlenmiştir.

Sönümleyicili sistemde gevşek kum zemin için; 1. Katta 0,02 m mertebelerine ulaşan maksimum yerdeğiştirme, 5. Katta 0,07 m civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü sistemde ise yine gevşek kumlu zemin için maksimum yerdeğiştirme; 1. Katta yaklaşık 0,03 m de maksimum değerine ulaşılırken 5. Katta ise 0,1 m olduğu belirlenmiştir.

Sönümleyicili sistemde orta sıkı kum zemini için; 1. Katta 0,02 m mertebelerine ulaşan maksimum yerdeğiştirme, 5. Katta 0,08 m civarında pik değerine ulaşmaktadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü sistemde ise yine orta sıkı kum zemini için maksimum yerdeğiştirme; 1. Katta yaklaşık 0,03 m de maksimum değerine ulaşılırken 5. Katta 0,09 m olduğu belirlenmiştir.

Sönümleyicili sistemde sıkı kum zemini için; 1. Katta 0,02 m mertebelerine ulaşan maksimum yerdeğiştirme, 5. Katta 0,08 m civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü sistemde ise yine sıkı kum zemini için maksimum yerdeğiştirme; 1. Katta yaklaşık 0,03 m de maksimum değerine ulaşılırken 5. Katta ise 0,1 m olduğu belirlenmiştir.

Sönümleyicili ve sönümleyicisiz analizden; rijit, gevşek, orta sıkı ve sıkı kumlu zemin durumlarında her bir kat için maksimum rölatif yerdeğiştirmenin karşılaştırılması Şekil 7.19'de gösterilmiştir. Maksimum rölatif yerdeğiştirmeler, üst katlara çıkıldıkça sönümsüz yada sönümlü durumlar için fark etmeksizin azaldığı belirlenmiştir. Sönümsüz yani AKS'nin kullanılmadığı durumda, maksimum rölatif yerdeğiştirme gevşek kumlu zeminde diğer durumlara göre belirgin farkla daha olumsuz etkilendiği görülmüştür. AKS ile yapının iyileştirilmesi durumunda ise gevşek kumlu zeminin olumsuz etkisi maksimum rölatif yerdeğiştirme açısından ortadan kalktığı söylenebilir.



Şekil 7.19. Farklı sıklığa sahip zemin durumlarına göre sönümsüz ve AKS'li maksimum rölatif yerdeğiştirme dağılımı

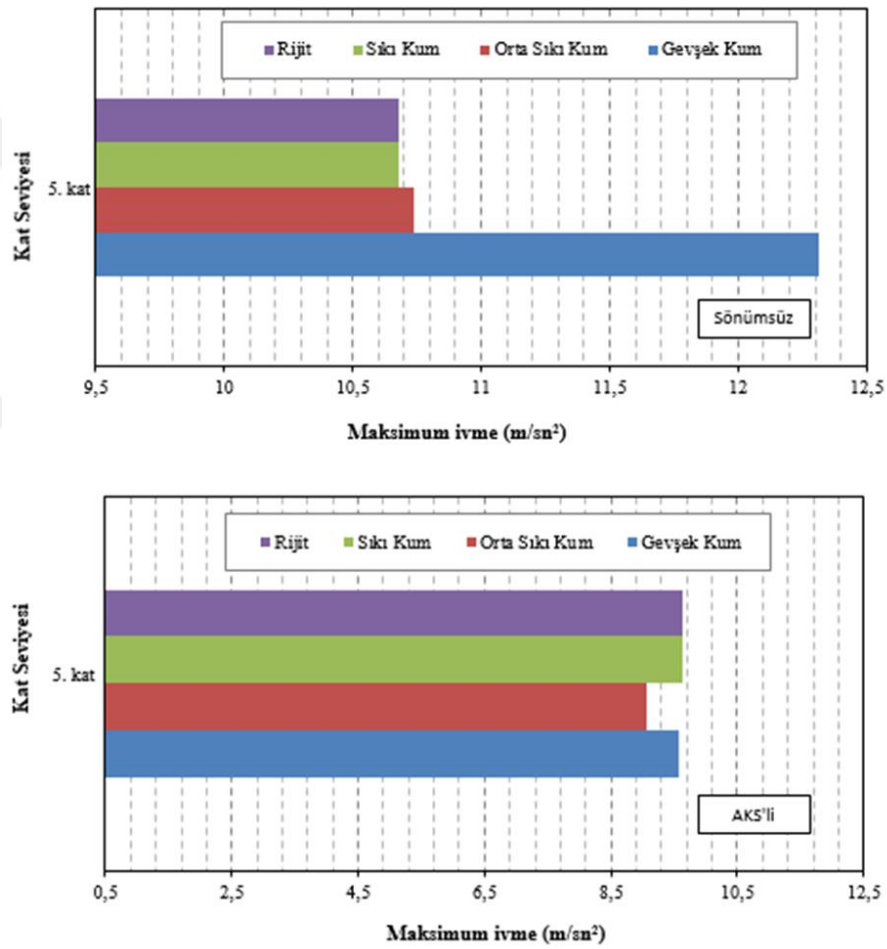
Sönümleyicili sistemde rijit durum için; 1. Katta 0,02 m mertebelerine ulaşan maksimum rölatif yerdeğiştirme 5. Katta 0,009 m civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü sistemde ise rijit durum için maksimum rölatif yerdeğiştirme; 1. Katta yaklaşık 0,03 m de maksimum değerine ulaşılırken 5. Katta 0,01 m olduğu belirlenmiştir.

Sönümleyicili sistemde gevşek kum zemin için; 1. Katta 0,02 m mertebelerine ulaşan maksimum rölatif yerdeğiştirme 5. Katta 0,01 m civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü sistemde ise gevşek kum zemin için maksimum rölatif yerdeğiştirme; 1. Katta yaklaşık 0,03 m de maksimum değerine ulaşılırken 5. Katta 0,02 m olduğu belirlenmiştir.

Sönümleyicili sistemde orta sıkı kum zemini için; 1. Katta 0,02 m mertebelerine ulaşan maksimum rölatif yerdeğiştirme 5. Katta 0,01 m civarındadır.

Sönümleyicisiz, doğal sönümlü sistemde ise yine orta sıkı kum zemini için maksimum rölatif yerdeğiştirme; 1. Katta yaklaşık 0,03 m de maksimum değerine ulaşılırken 5. Katta 0,01 m olduğu belirlenmiştir.

Sönümleyicili sistemde sıkı kum zemini için; 1. Katta 0,02 m mertebelerine ulaşan maksimum rölatif yerdeğiştirme 5. Katta 0,01 m civarındadır. Sönümleyicisiz, doğal sönümlü sistemde ise yine sıkı kum zemini için maksimum rölatif yerdeğiştirme; 1. Katta yaklaşık 0,02 m de maksimum değerine ulaşılırken 5. Katta 0,01 m olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.20. Farklı sıklığa sahip zemin durumlarına göre sönümsüz ve AKS'li 5. Kattaki maksimum ivme değerinin dağılımı

Rijit ve farklı zemin türleri (gevşek kum, orta sıkı kum, sıkı kum) için sönümleyicili ve sönümleyicisiz durumlarda sadece 5. Katta oluşan ivme değerleri kıyaslanmıştır (Şekil 7.20). Rijit durum için maksimum ivme değeri sönümsüz durumda $10,6 \text{ m/s}^2$,

sönümlü durumda ise $9,6 \text{ m/s}^2$; gevşek kumlu zemin için maksimum ivme değeri sönümsüz durumda $12,3 \text{ m/s}^2$, sönümlü durumda ise $9,5 \text{ m/s}^2$; orta sıkı kumlu zemin için maksimum ivme değeri sönümsüz durumda $10,7 \text{ m/s}^2$, sönümlü durumda $9,0 \text{ m/s}^2$; sıkı kum için maksimum ivme değeri sönümsüz durumda $10,6 \text{ m/s}^2$, sönümlü durumda $9,6 \text{ m/s}^2$ olarak belirlenmiştir. Sönümsüz yani AKS'nin kullanılmadığı durumda, maksimum ivme gevşek kumlu zeminde diğer durumlara göre yapıya oldukça olumsuz etkidiği görülmüştür. AKS ile yapının iyileştirilmesi durumunda ise gevşek kumlu zeminin olumsuz etkisi ortadan kalktığı belirlenmiştir (Şekil 7.20).

Sonuç olarak; yapılan optimizasyon neticesi AKS'nin kullanılması, deprem altında yapıda meydana gelebilecek rölatif yerdeğiştirme, yerdeğiştirme ve ivme değerlerinin iyileştirilmesine katkı sağlamıştır.

BÖLÜM VIII

SONUÇ VE ÖNERİLER

Ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum tasarımı yaygın olarak bilinen bir araştırma konusudur. Literatürde genellikle yapıların zemine mesnetlenmesi rijit olarak düşünülerek AKS'lerin optimum parametreleri hesaplanır. Bu çalışmada yapı-zemin etkileşim modeli kurulmuş ve farklı sıklık derecesine sahip kumlu zemin durumları (gevşek kum, orta sıkı kum, sıkı kum) gözönüne alınmıştır. Yapının tepesine yerleştirilen AKS'nin optimum parametreleri gerek rijit gerekse farklı sıklıkta kumlu zemin durumları için bulunmuştur. Yapılan sayısal analizlerin sonuçları, aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Rijit durum için literatürde gösterilen metod gevşek kum, orta sıkı kum ve sıkı kumlu zemin durumlarına uygulanmış ve optimum sönümleyici parametreleri bulunmuştur.
- Rijit durum, gevşek kum, orta sıkı kum ve sıkı kumlu zemin durumları için yapıyı kontrol eden AKS'nin kütlesi ayarlanarak, optimum parametreler belirlenmiştir. Sonuç olarak, farklı sıklığa sahip kumlu zemin durumlarında farklı AKS kütlelerine ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir.
- Bir tasarım depremi altında kat yerdeğiştirmeleri, katlar arası rölatif yerdeğiştirmeler ve tepe nihai ivmeleri zaman tanım alanında incelenmiş ve AKS'nin yerdeğiştirmelerinin, bütün zemin durumlarında yapısal davranışı iyileştirdiği görülmüştür.
- Özellikle en kötü zemin durumu olan gevşek kumlu zeminlerde, AKS'nin yerleştirilmesi ile yapısal davranışlar ciddi oranda azaltılmıştır.
- Zeminin sıkı ve orta sıkı olması durumlarında, yerdeğiştirmeler ve ivmeler beklendiği gibi gevşek kumlu duruma göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

- Analizler sonucunda yapının dinamik davranışında zeminin olumsuz etkileri AKS'ler ile iyileştirilebileceği gözlenmiştir.
- Deprem etkisindeki yapıların tasarımında üst yapı ile alt yapının birlikte düşünülmesi ve zemin etkisinin dikkate alınması gerektiği ortaya konmuştur.



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”, Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 2007.

Aldemir, Ü ve Aydın, E., “Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Yeni Yaklaşımlar”, **Türkiye Mühendislik Haberleri** 435,81-85, 2005.

Al Hai & Al Mukaddam For Geotechnical 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 Symposium***, Orlando, Florida, sayı: 2 s. 643-650, 1988.

Bishop, R.E.D. and Welbourn, D.B., "The problem of the dynamic vibration absorber", ***Engineering***, 174 - 769, London, 1952.

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 conference 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 Methods Applied Mech. Eng.*** 125, s. 1-16, 1995.

Chen, Y., H. ve Chen, D., S., 2004. Timoshenko Beam with Tuned Mass Dampers to Moving Loads, *J. Bridge Eng.*, 9, 167-177.

Connor, J.J., Introduction To Structural Motion Control, ***Prentice Hall Pearson Education***, inc., 2003

DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönerge, 2007.

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

Den Hartog, J.P., Mechanical Vibrations, 4th ed., ***McGraw-Hill***, New York, 1956.

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., Nuhoglu, A., “Taban izolatörlü ve pasif enerji sönümleyicili yapıların dinamik davranışı”, **Deprem Sempozyumu**, KOÜ, Kocaeli, 23-25 Mart 2005.

Falcon, K.C., Stone, B J., Simcock, W.D. and Andrew, C., “Optimization of vibration absorbers: a graphical method for use on idealized systems with restricted damping”, *J. Mech. Engng Sci*, 9, 374-381, 1967.

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 stress 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 conference 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 Sathiyavageswara, K. R., “Effects of added-damper distribution on the seismic Response of Building”, **Comp. Struct.** 43(5), 941-950, 1992.

Hazırbaşı, 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 geotechnical engineering**, ASCE, 1990.

Hoar, R. J. and Stokoe, K. H., “Field and laboratory measurements of material damping of soil in shear”, **Proceedings, 8th World Conference on Earthquake 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 Technical Note, TN-14, Urawa Research Institute, OYO Corporation**, Tokyo, Japan, 1976.

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

Ioi, T. and Ikeda, K. “On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system”, **Bull. Japanese Soc. Mech. Engng.**, 21 (151), 64-71, 1978.

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 Foch, 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 Mechanics**, 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.

MEGEP, İnşaat Teknolojisi Deprem İzolatör Sistemleri, ***MEB***, Ankara, 2006.

Mirkelam, Z. , Katlar arasında yalıtım elemanları kullanılan çok katlı binalarda taban yalıtımı etkinliğinin araştırılması, Doktora Tezi, ***SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü***, Isparta, 2006.

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., “Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes”, ***Earthquake Engineering and Structural Dynamics***, 167-187, 1978.

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

Okut,O,. Ayarlı Kütle Sönüleyicilerin sismik etkiler altında performansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2006.

Onur, M. İ., “Dinamik etkiler altında zemin deformasyonun incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü** , Eskişehir 2007.

Ormondroyd, J.and Den Hartog, J.P., “ The theory of dynamic vibration absorber”, **Trans. ASME**, APM-50-7, 9-22, 1928.

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.

Parmelee, R.A., “The influence of foundation parameter on the seismic response of interaction systems”, **Proceedings of the 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium**, 1970.

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

Rana, R. and Soong T.T., “Parametric study and simplified design of tuned mass dampers”, **Engineering Structures**, 20(3),. 193-204, 1997.

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.

Ristic., D., Control of Structural Behaviour-Part 2: Passive Structural Control, **Lectures for the International Post Graduate Studies**, Skopje, 1993.

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.

Samani, F., S. ve Pellicano, F., Vibration Reduction of Beams under Successive Traveling Loads by Means of Linear and Nonlinear Dynamic Absorbers, 331, 2272-2290, 2012.

Sawangsurriya, 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 techniques for making in situ shear wave velocity measurements-a description and evaluation”, **Proceedings, International Conference 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 retaining walls”, **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE 108, 679-695.

Soong, T.T. and Constantinou, M.C., Passive and Active structural Vibration Control in Civil Engineering, *International Sciences Courses and Lectures No:345*, New York, 1994.

Soto-Birito R and Ruiz S.E. “Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic* 28, 1255-71, 1999.

Takewaki, I., “Optimal Damper Placement for Minimum Transfer Functions”, *Earthquake Engineering and Struct.* 26, 1113-1124, 1997.

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

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

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

Takewaki, I., “Inverse Stiffness Design of Shear-Flexural Building Models in Including Soil-Structure Interaction”, *Engineering Structures* 2, 1045-1054, 1999b.

Takewaki, I., “Soil-Structure Random Response Reduction Via TMD-VD Simultaneous Use”, *Comp. Methods. Appl. Mech. Eng* 190, 677-690, 2000a.

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

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

Thompson, A.G. “Optimum damping and tuning of a dynamic vibration absorber applied to a force excited and damped primary system”, **J. Sound Vib.**, 77, 403-415, 1981.

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 Yayınevi**, İstanbul, 2009.

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

URL-1 <https://www.wbur.org/artery/hancock-mural-coming-down>, 20.04.2016.

URL-2 <https://www.6sqft.com/former-citicorp-center-is-the-citys-newest-landmarked-building/> ,07.10.2016.

URL-3 <http://worldradiomap.com/ca/toronto> , 1995.

URL-4 <https://muza-chan.net/japan/index.php/blog/japanese-modern-architecture-chiba-port-tower> , 2014.

URL-5 <https://docplayer.biz.tr/56385743-Yrd-doc-dr-beyza-taskin.html> ,2006.

URL-6 <http://buildgreen.ro/project/crystal-tower-office-building-bucharest/> ,2007.

URL-7 https://en.wikipedia.org/wiki/File:London_millennium_wobbly_bridge.jpg, 2006.

Wu, J., Seismic performance, design and placement of multiple tuned mass dampers in building applications, Phd Thesis, **University Of Missouri**, Rolla, 2000.

Wu, J., J., Study on the Inertia Effect of Helical Spring of the Absorber on Suppressing, 297, 981-999, 2006.

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.

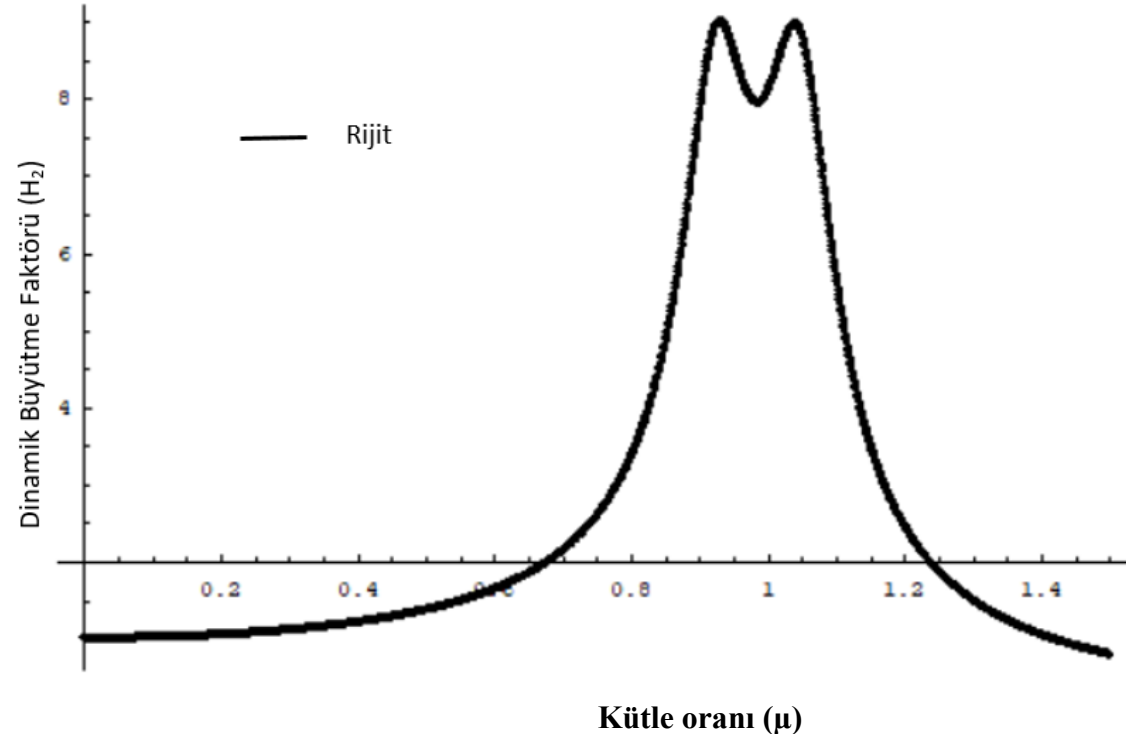
Youd, T. L., “Packing changes and liquefaction susceptibility”, ***Journal of the Geotechnical Engineering Division***, ASCE 103, 918-922, 1977.

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

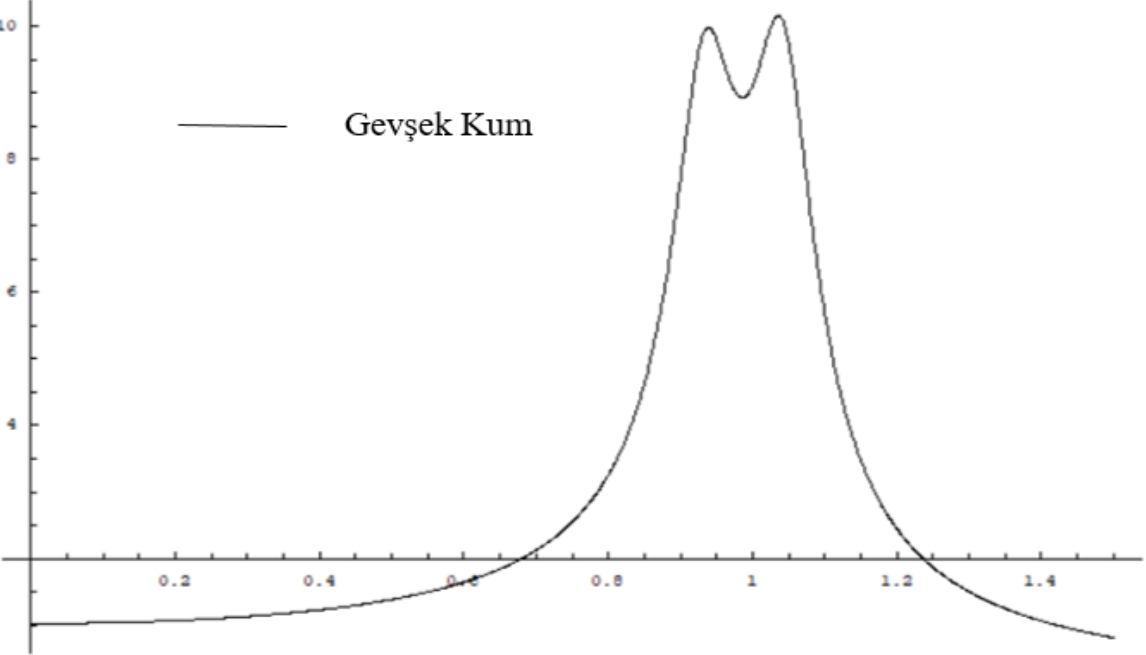
Ziyaeifer, M., Vibration Control in Train-Bridge-Track Systems, 46, 5, 355-384, 2008.

EK- A Optimizasyon Sonuçları

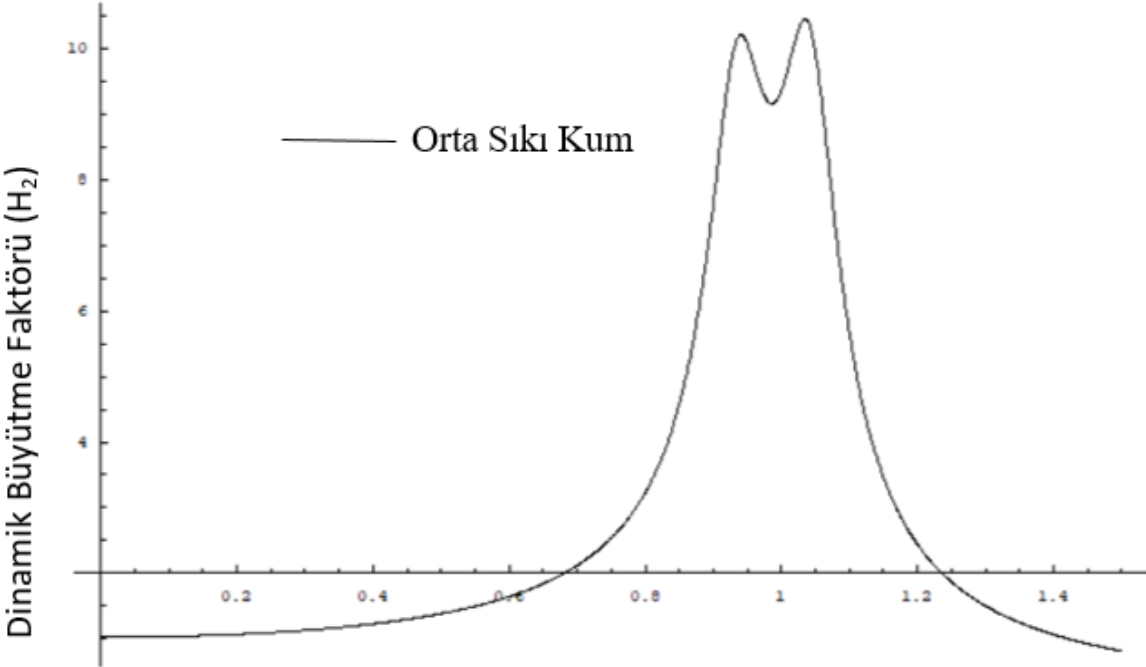
Zemin Cinsi	RİJİT $m=3.10^4$ (kg)	
	Frekans (1/s)	
	$m_d = 5 * m * 0,18$	
	1,3077	
	3,8171	
	6,01739	
	7,73012	
	8,8166	
μ	0,0259767	
α_{opt}	0,968632	
ξ_{opt}	0,100094	
k_{opt}	609315	
C_{opt}	43018	
ω_d	4.7505	



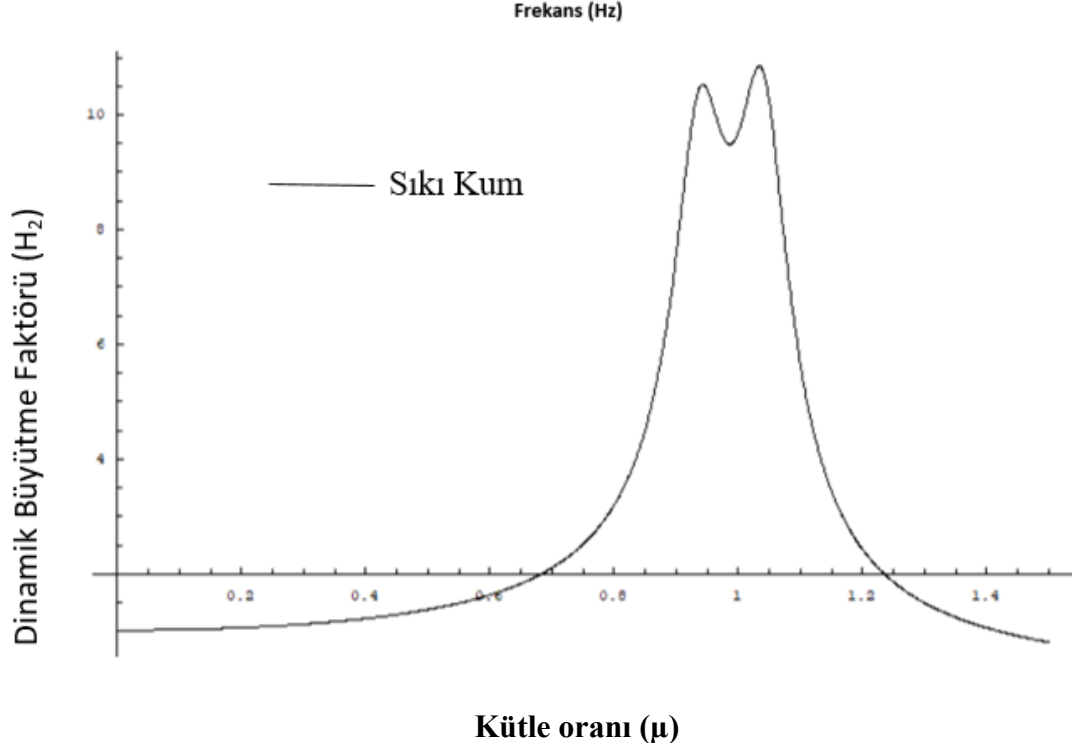
EK- A Optimizasyon Sonuçları (Devamı)

Zemin Cinsi	GEVŞEK KUM ($\nu=0,25$ $v_s=150$ m/s $\rho=1450$ kg/m ³ $m=1.10^4$ $m_0= 9.10^4$)	
	Frekans (1/s)	$m_d = (5 * m + m_0) * 0,12$
	1,2154	
	3,76657	
	5,9807	
	7,70719	
	16,0655	
	0,+6,0431.10 ⁸ i	
μ	0,0205714	
α_{opt}	0,973961	Kütle oranı (μ)
ξ_{opt}	0,0895821	
k_{opt}	487851	
C_{opt}	38378.1	
ω_d	4.11574	

EK- A Optimizasyon Sonuçları (Devamı)

Zemin Cinsi	ORTA SIKI KUM ($\nu=0,3$ $v_s=300$ m/s $\rho=1650$ kg/m ³ $m=3.10^4$ (kg) $m_0= 9.10^4$)	
	Frekans (1/s) / Periyot (s)	$m_d = (5 * m + m_0) * 0,09$
	1,2871	 Dinamik Büyütme Faktörü (H_2) Orta Sıkı Kum Kütle oranı (μ)
	3,80643	
	6,00931	
	7,72536	
	33,4517	
μ	0,0194838	
α_{opt}	0,975041	
ξ_{opt}	0,0872951	
k_{opt}	463082	
C_{opt}	29736,4	
ω_d	4,63023	

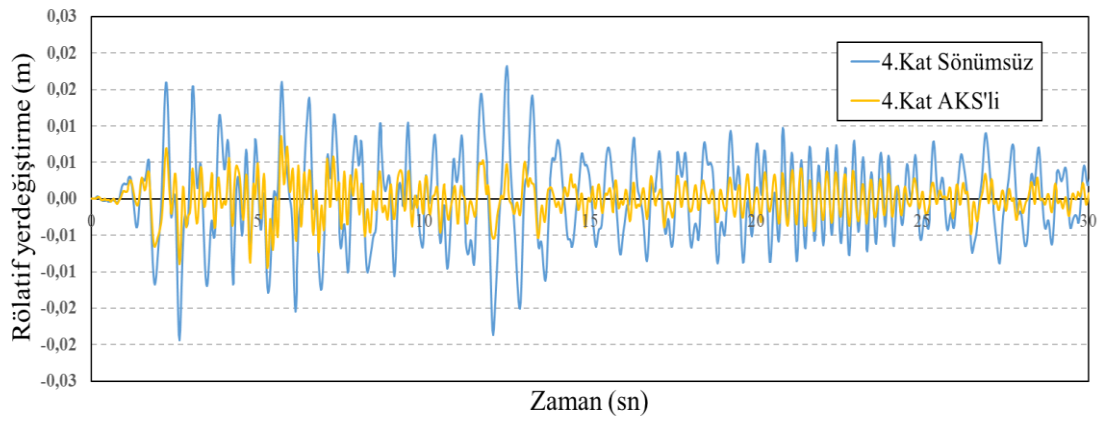
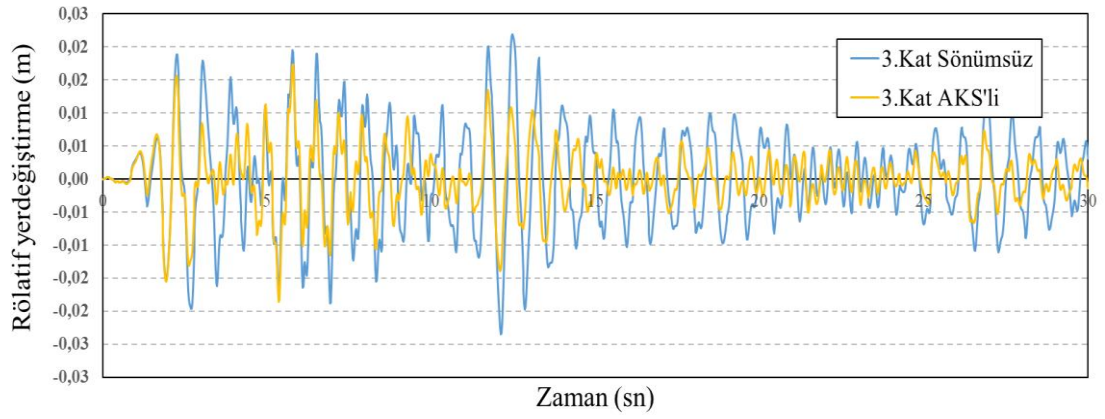
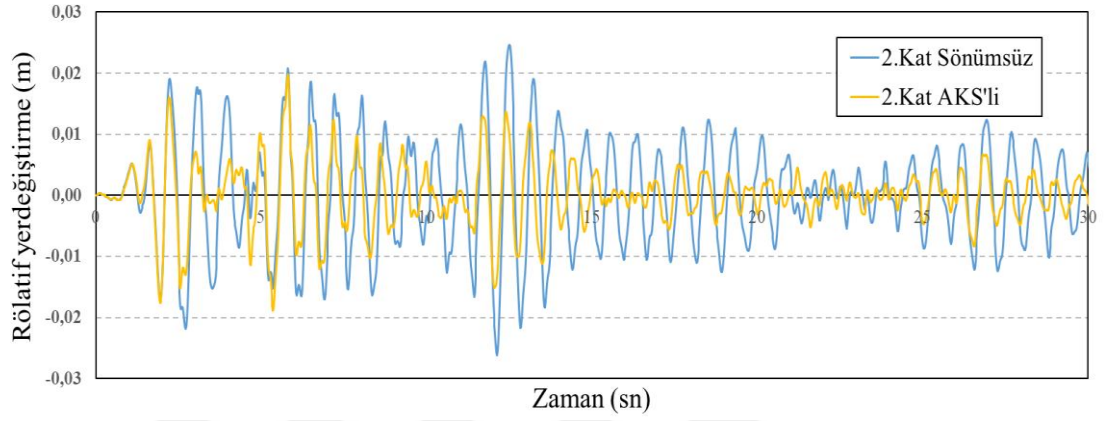
EK- A Optimizasyon Sonuçları (Devamı)

Zemin Cinsi	SIKI KUM $(\nu=0,35 \quad v_s=450 \text{ m/s} \quad \rho=1850 \text{ kg/m}^3 \quad m=1.10^4 \quad m_0= 9.10^4)$	
	Frekans (1/s)	$m_d = (5 * m + m_0) * 0,08$
	1,30252	 Frekans (Hz) Dinamik Büyütme Faktörü (H_2) Sıki Kum Kütle oranı (μ)
	3,81446	
	6,01533	
	7,72891	
	8,81625	
	66,5749	
μ	0,0181771	
α_{opt}	0,97634	
ξ_{opt}	0,0844567	
k_{opt}	433180	
C_{opt}	25913,8	
ω_d	4.74989	

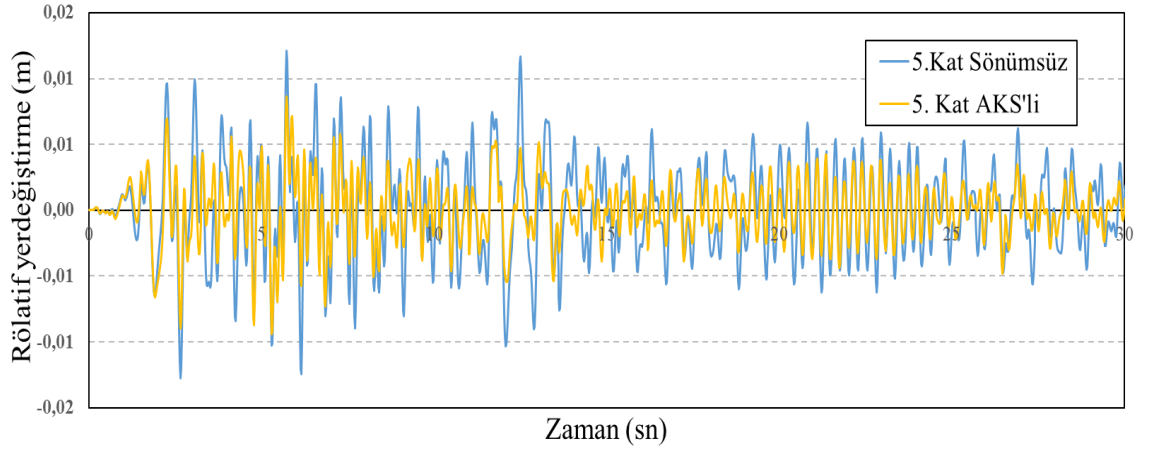
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro

RÖLATİF YERDEĞİŞTİRME

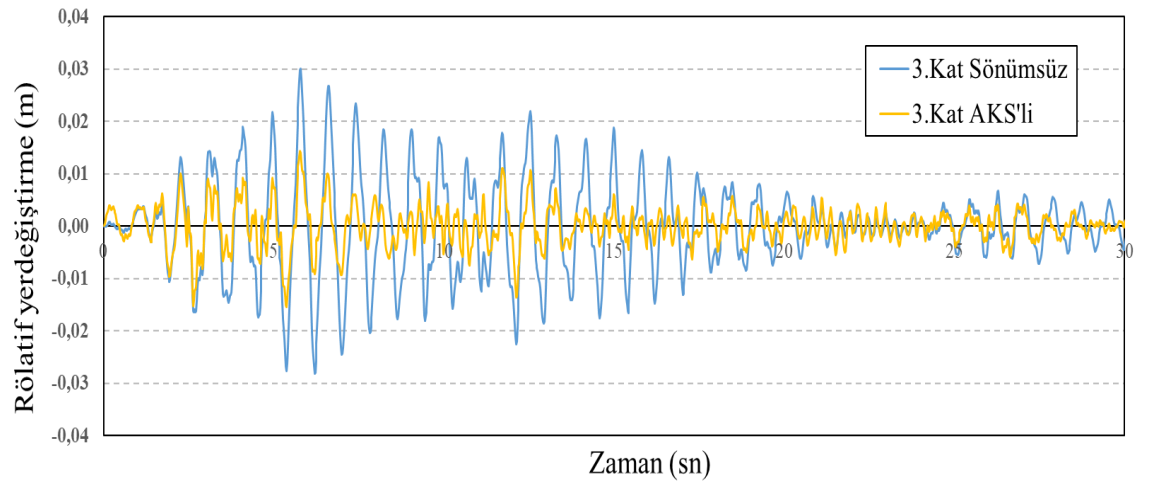
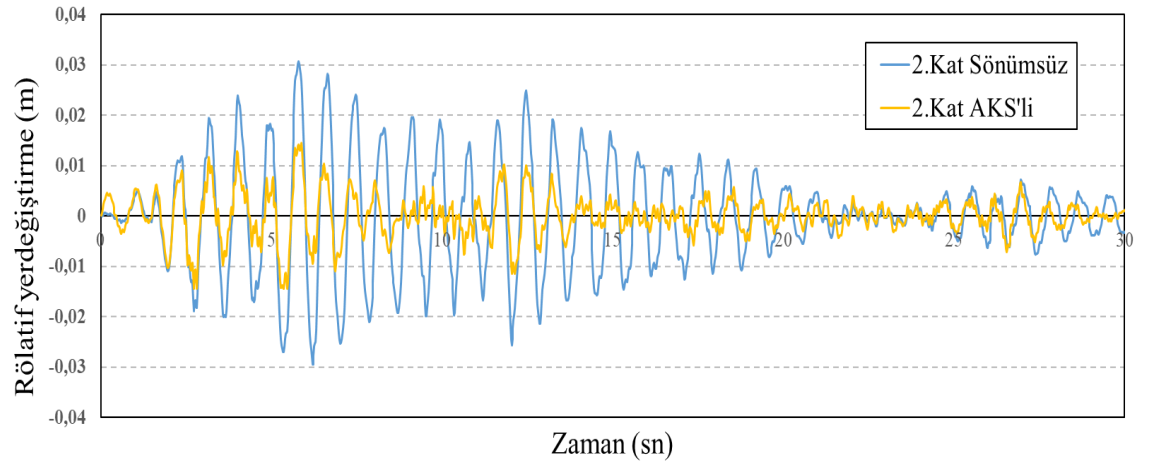
➤ Rijit



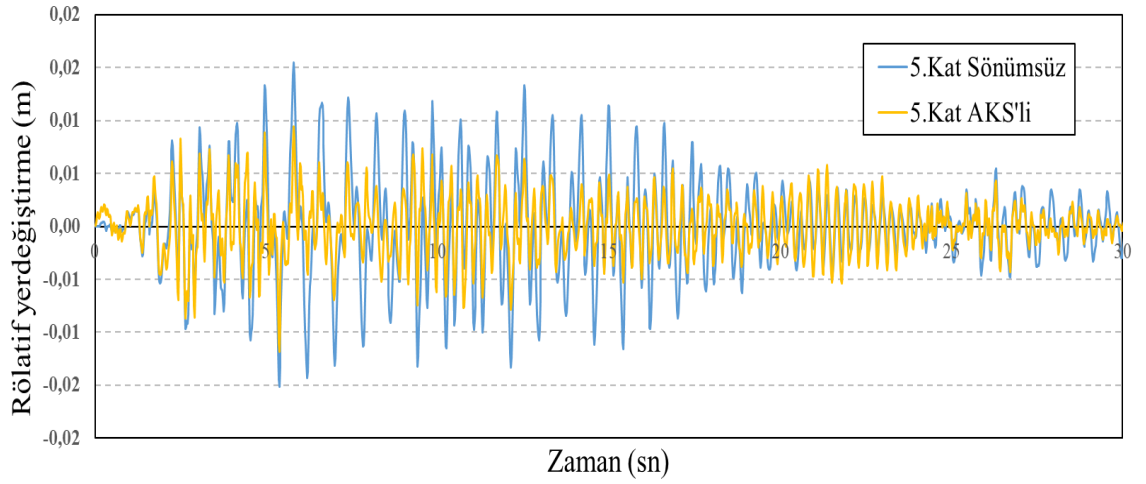
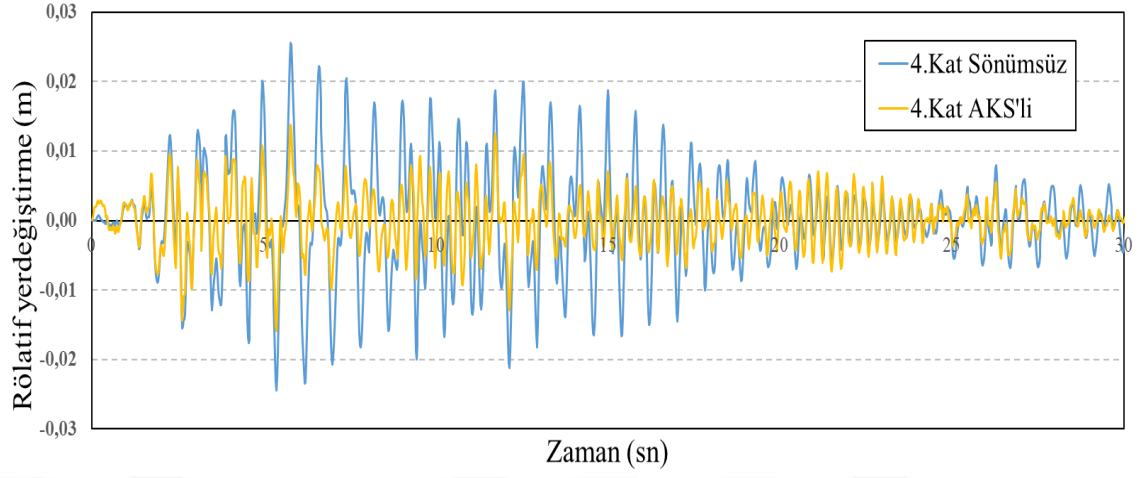
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)



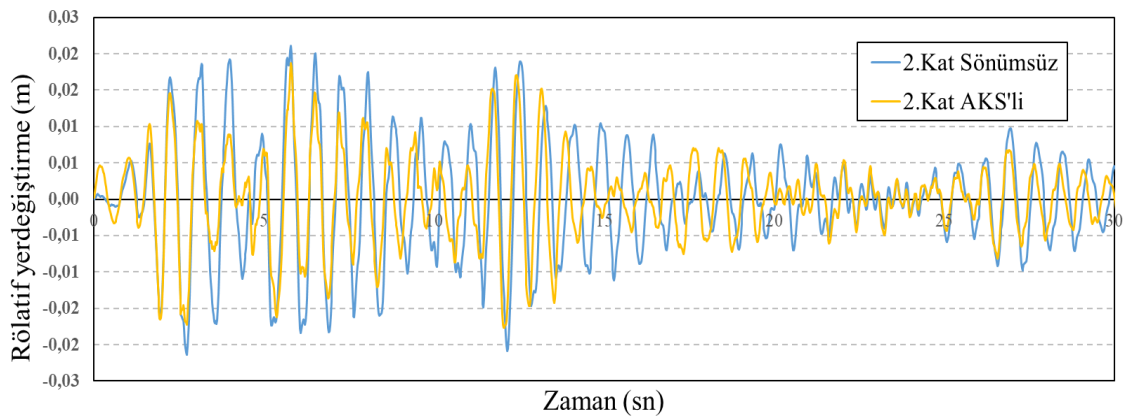
➤ Gevşek Kum



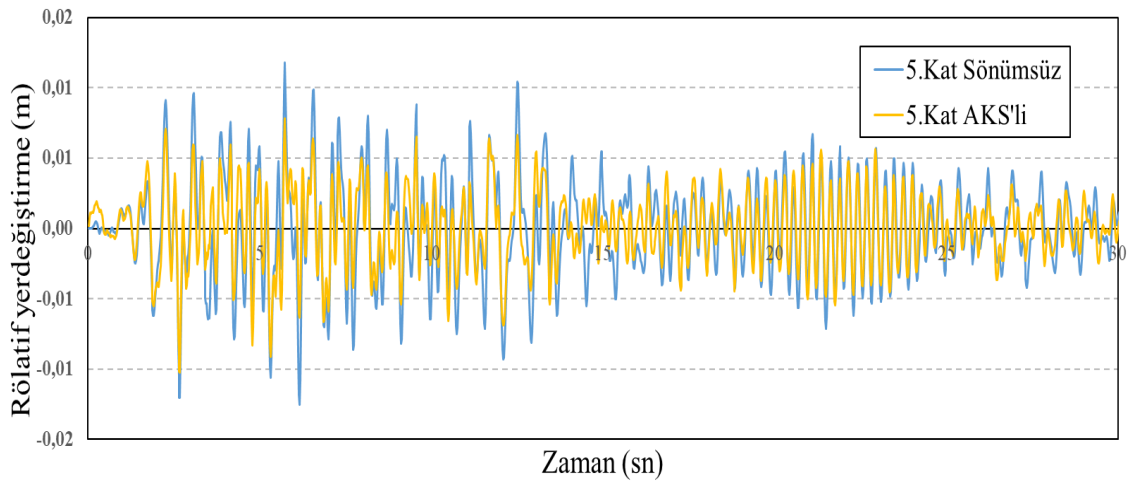
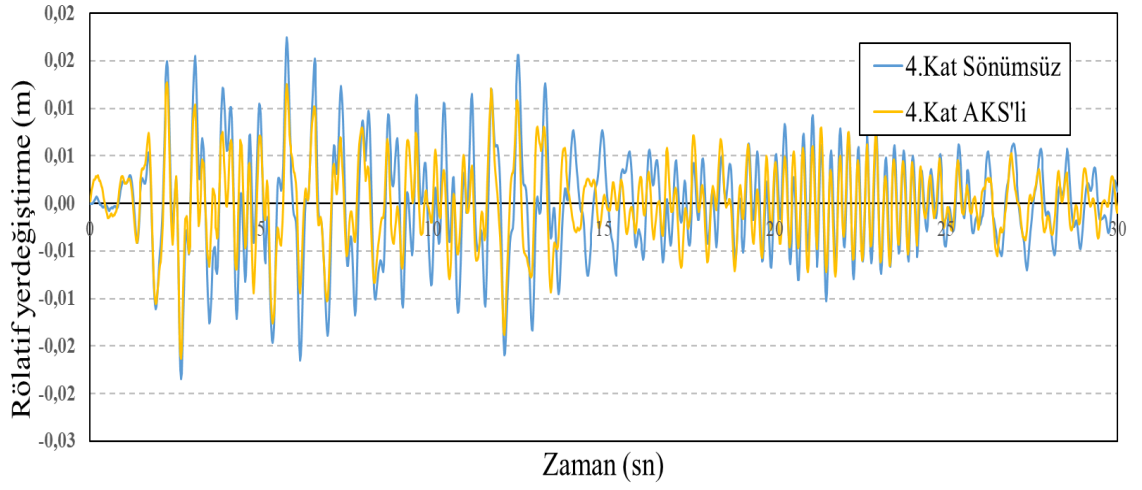
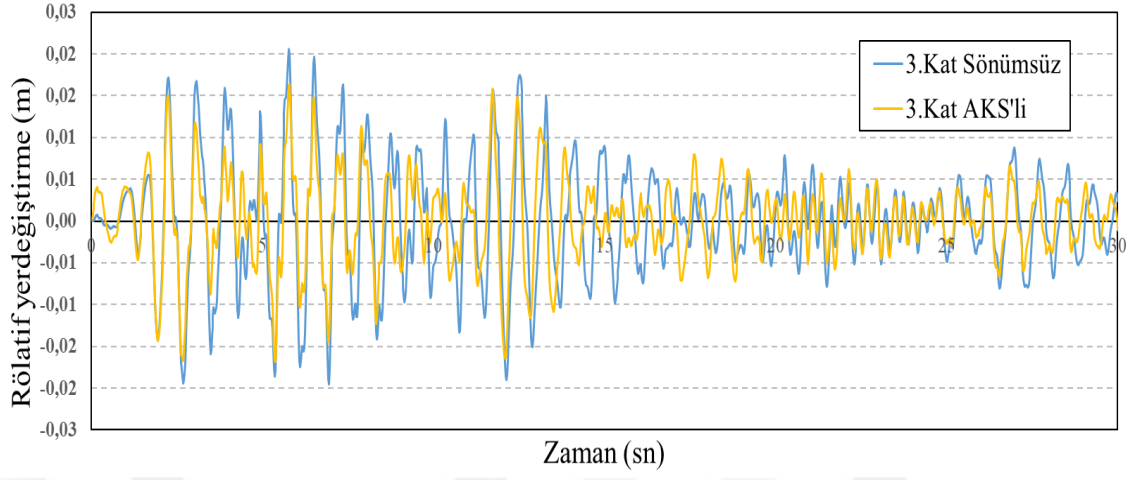
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)



➤ Orta Sıkı Kum

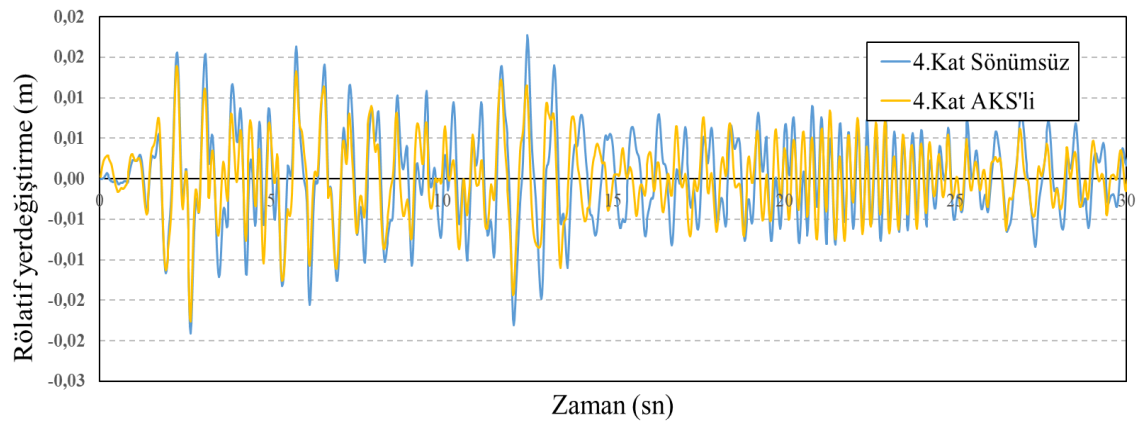
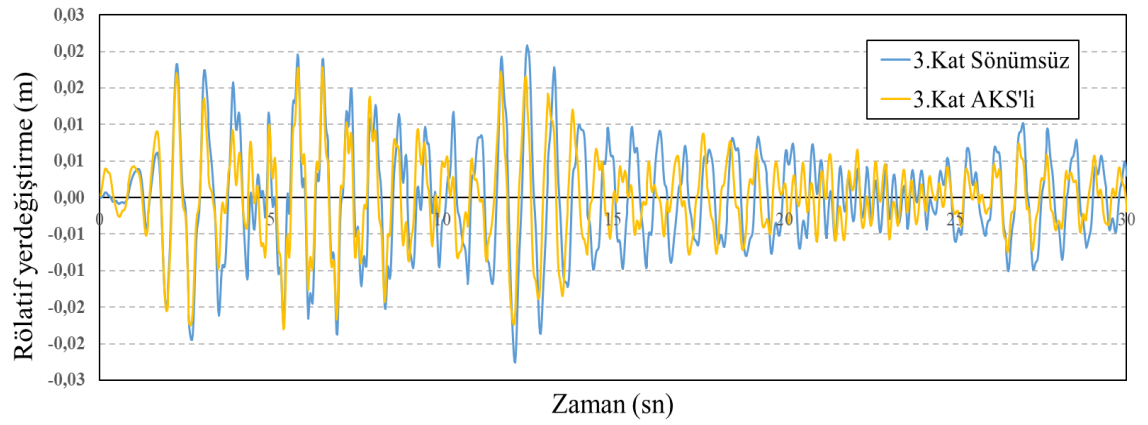
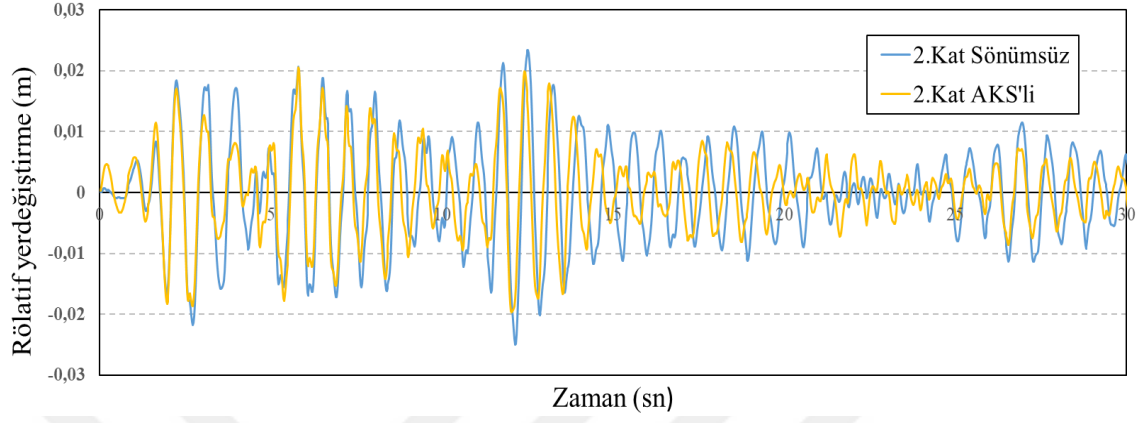


EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

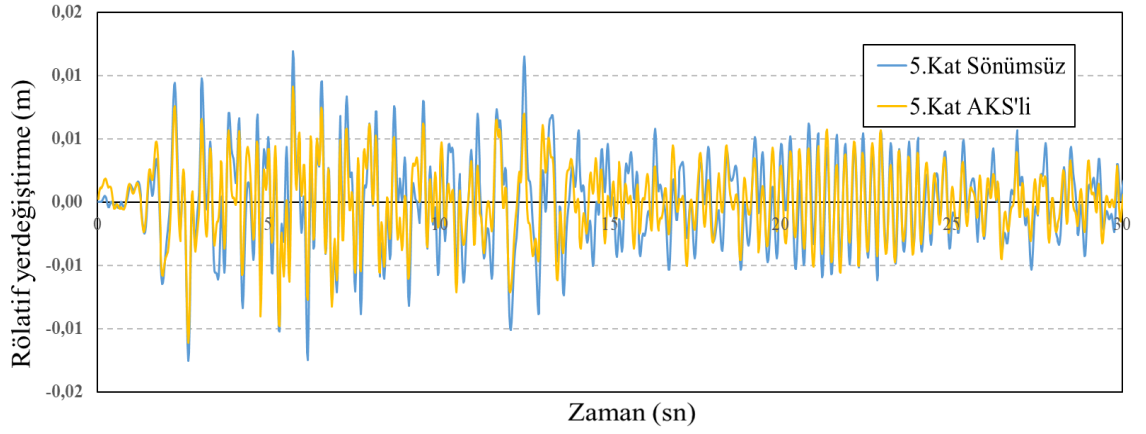


EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

➤ Sıkı Kum

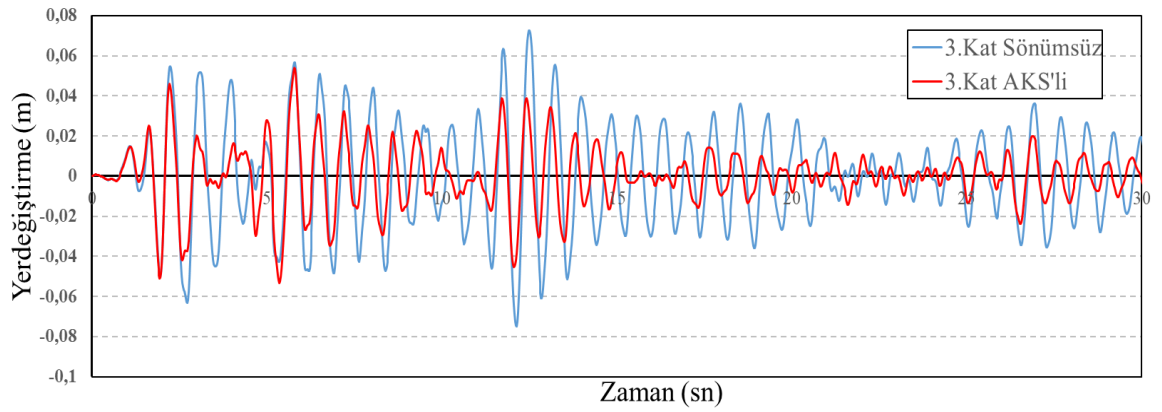
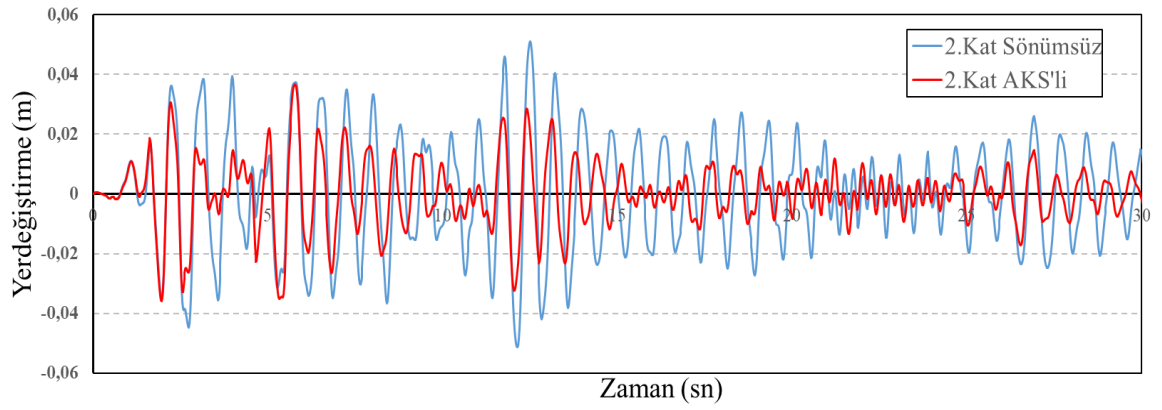


EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

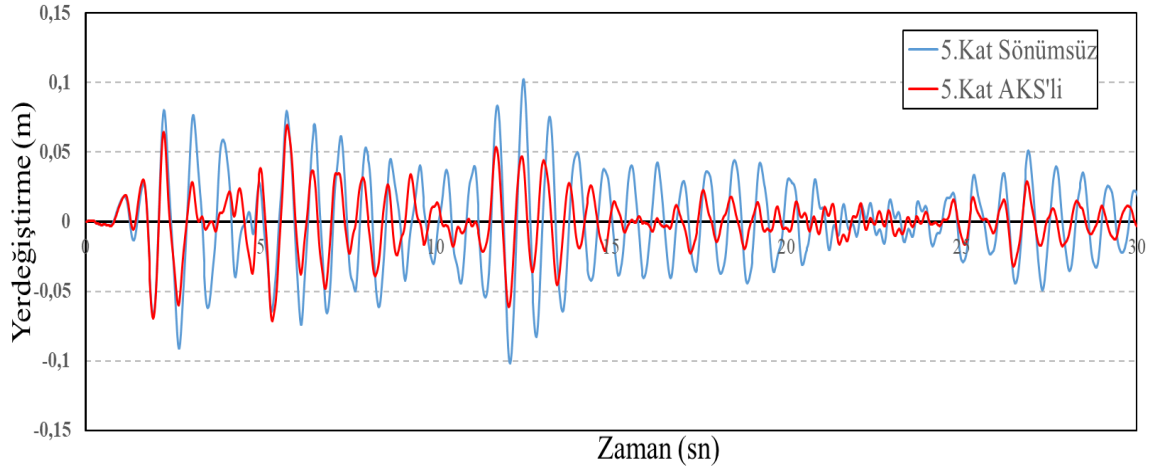
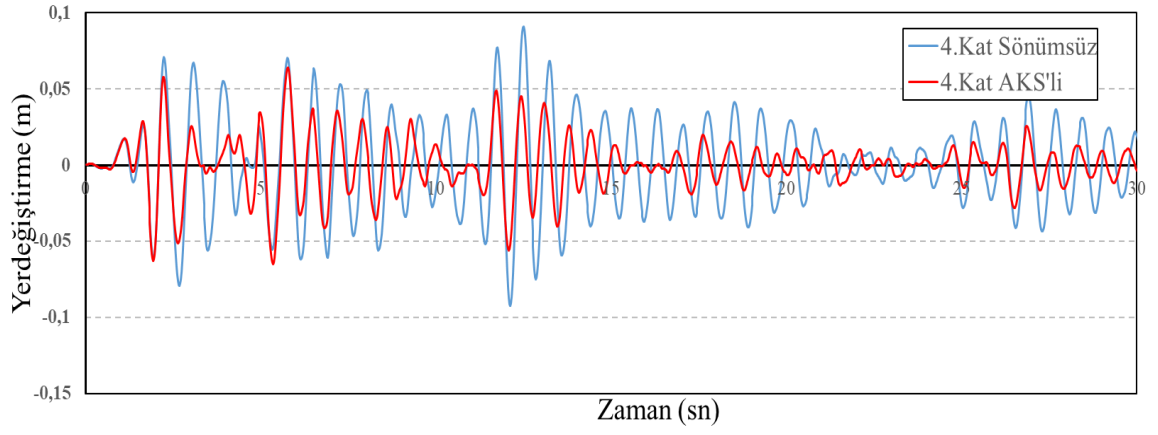


YERDEĞİŞTİRME

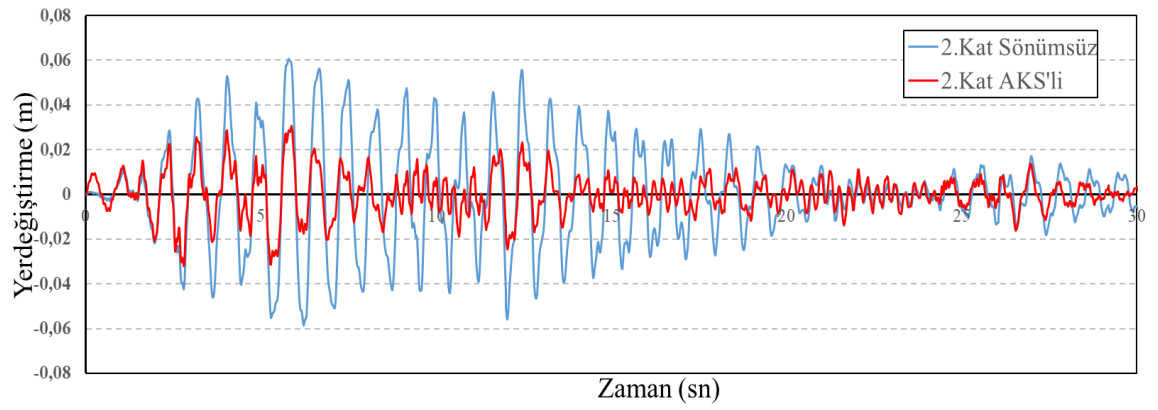
➤ Rijit



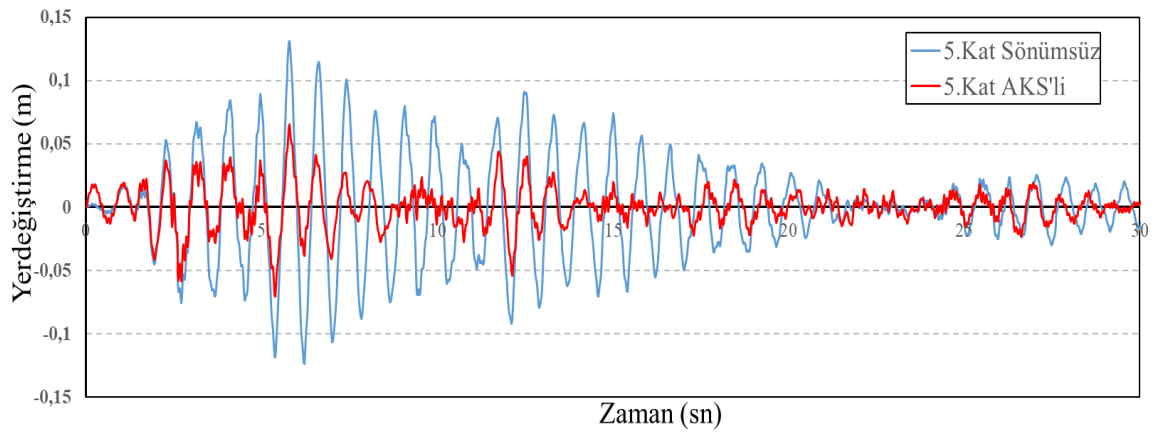
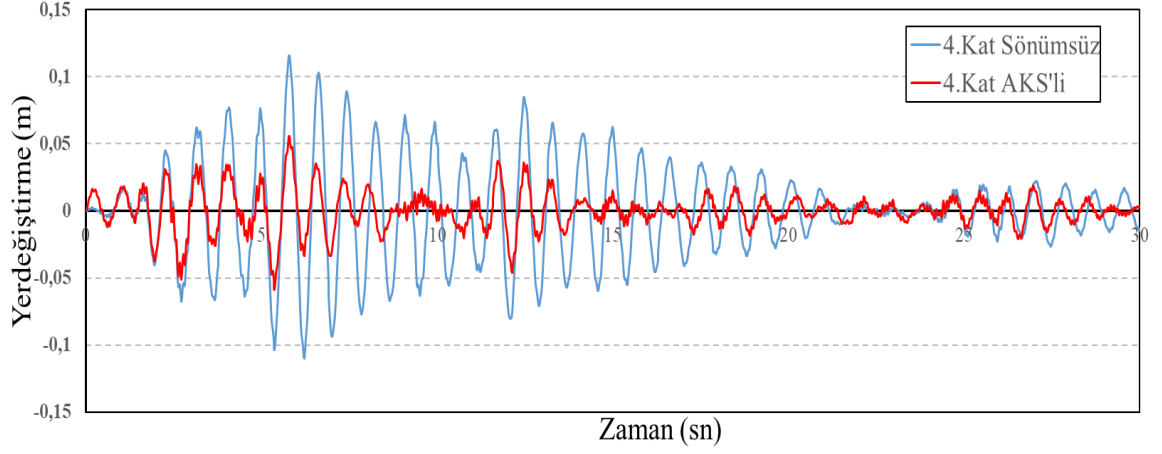
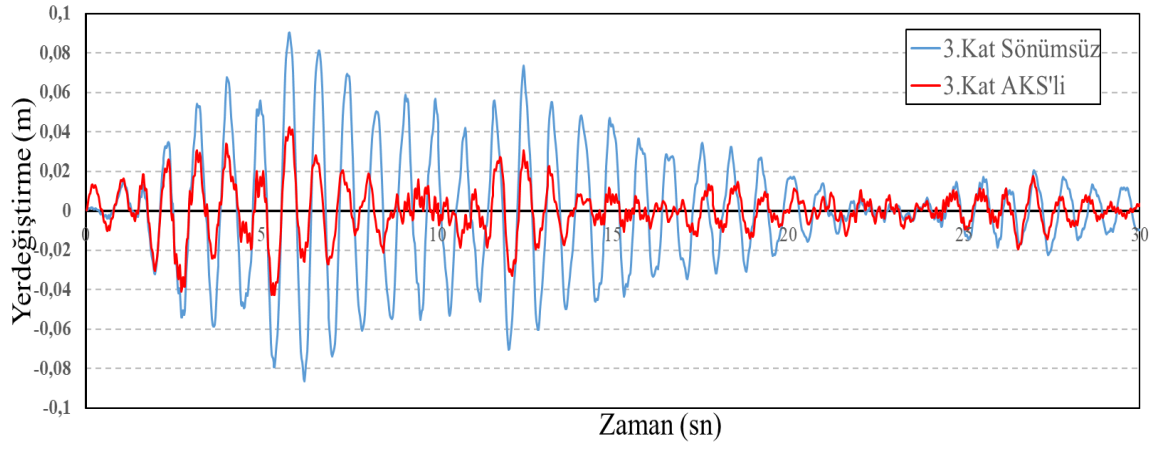
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)



➤ Gevşek Kum

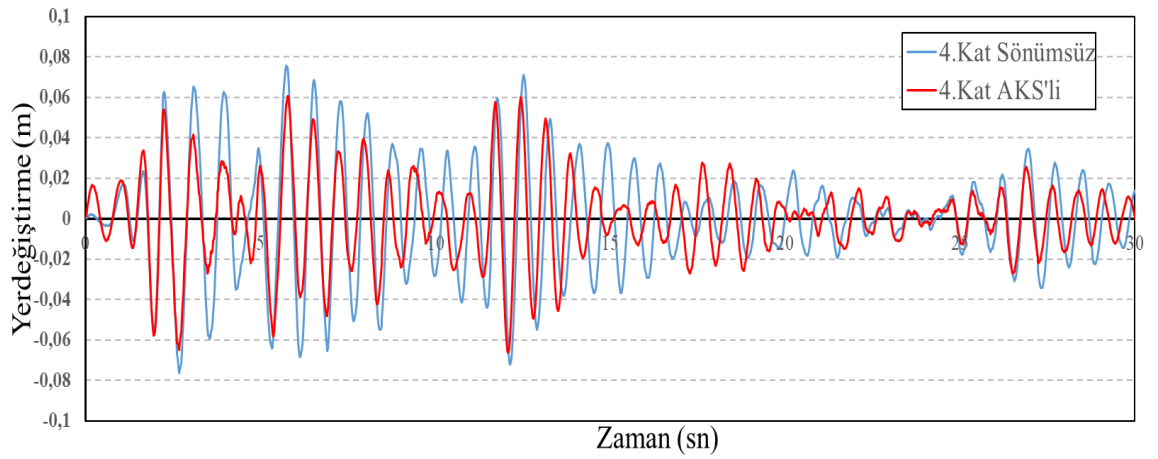
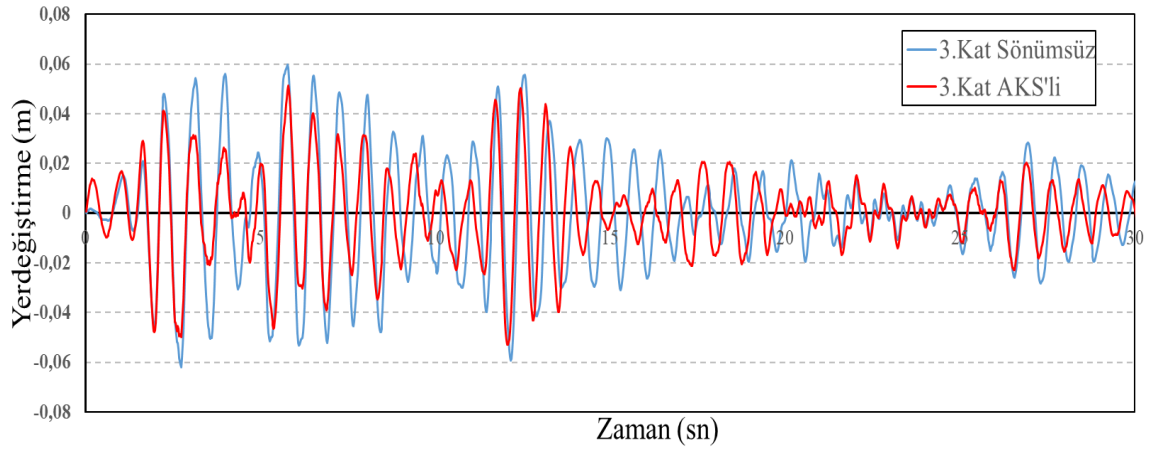
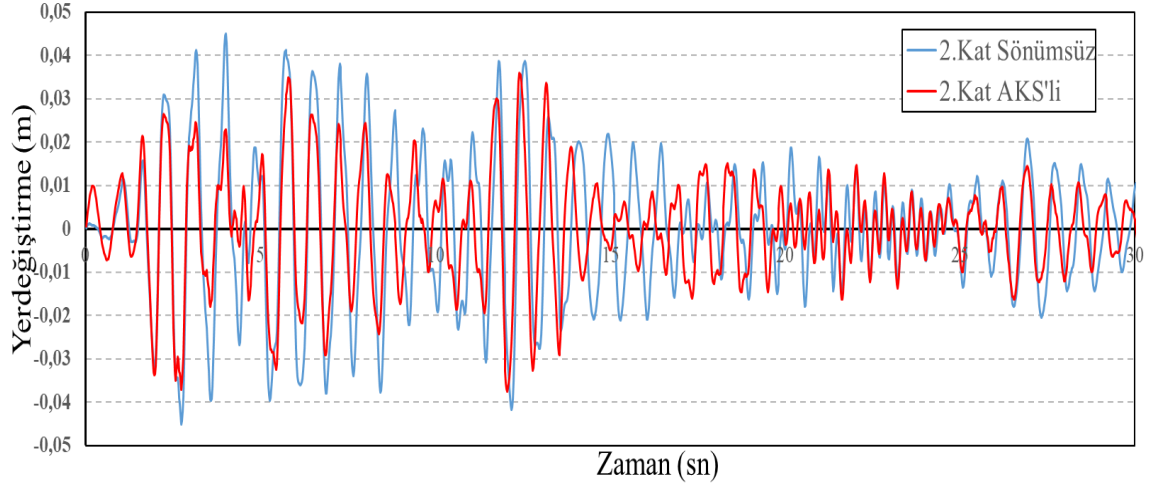


EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

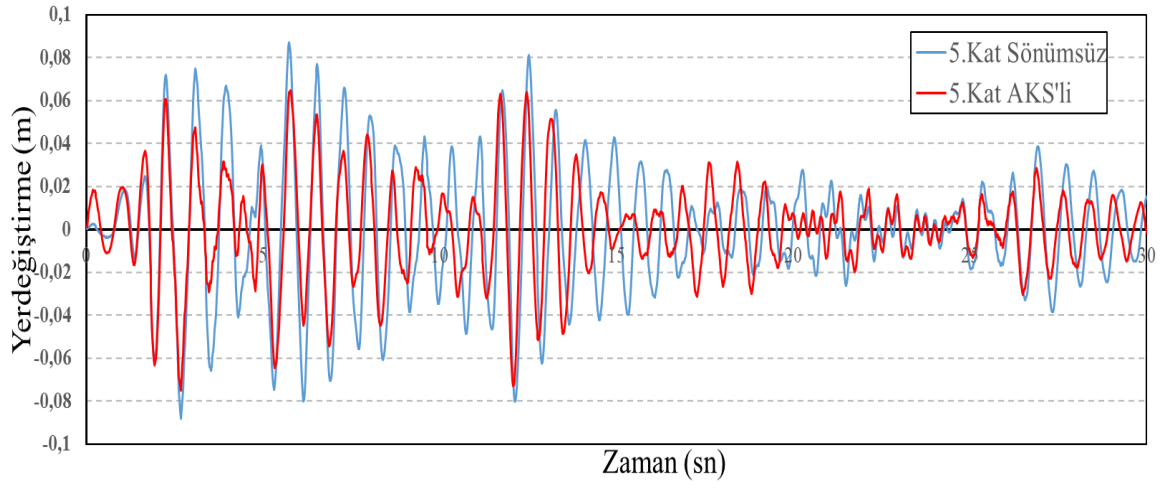


EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)

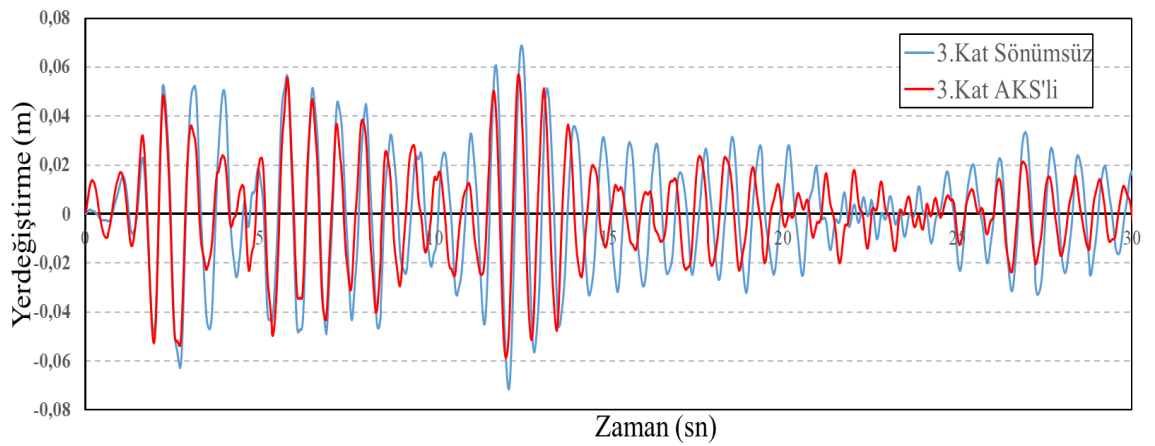
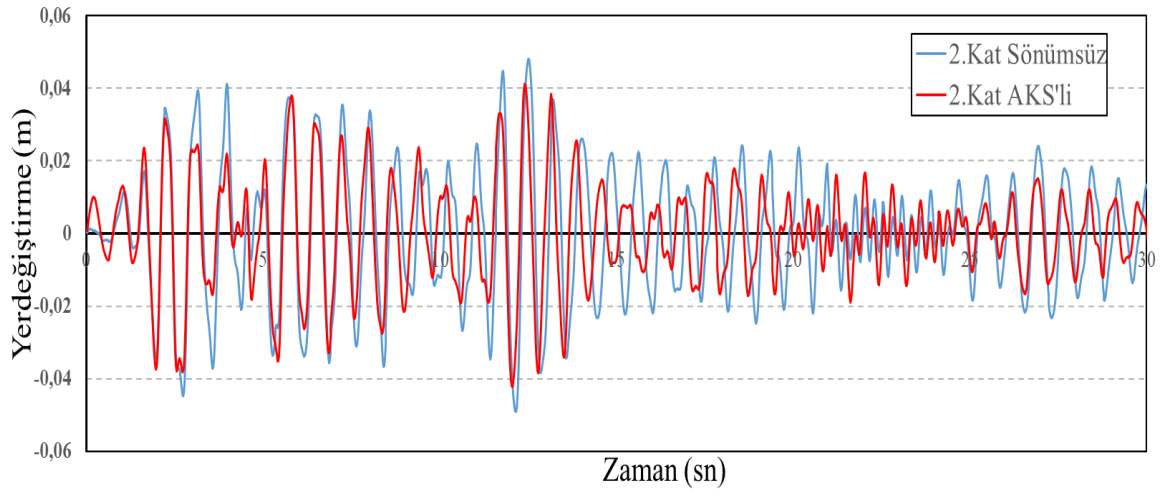
➤ Orta Sıkı Kum



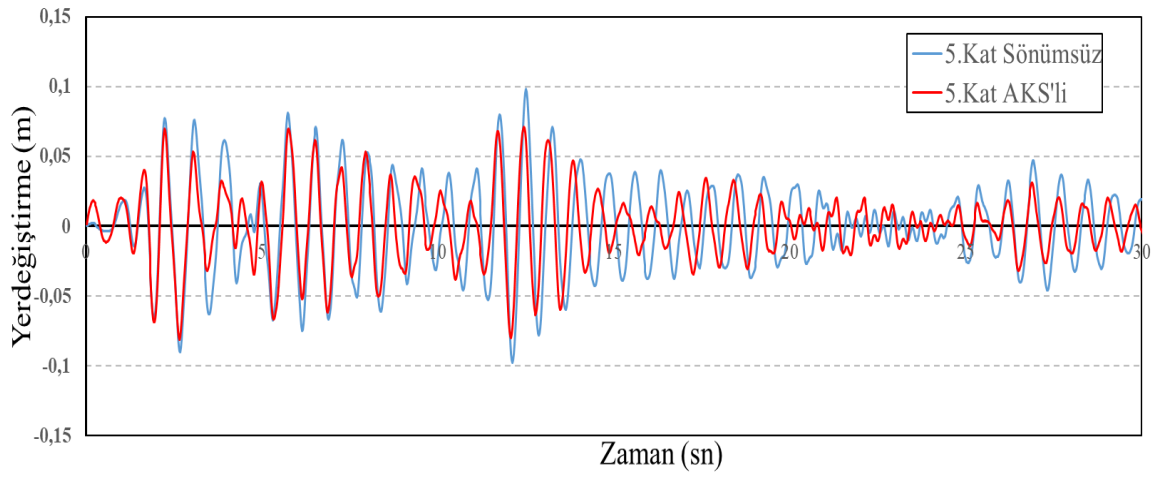
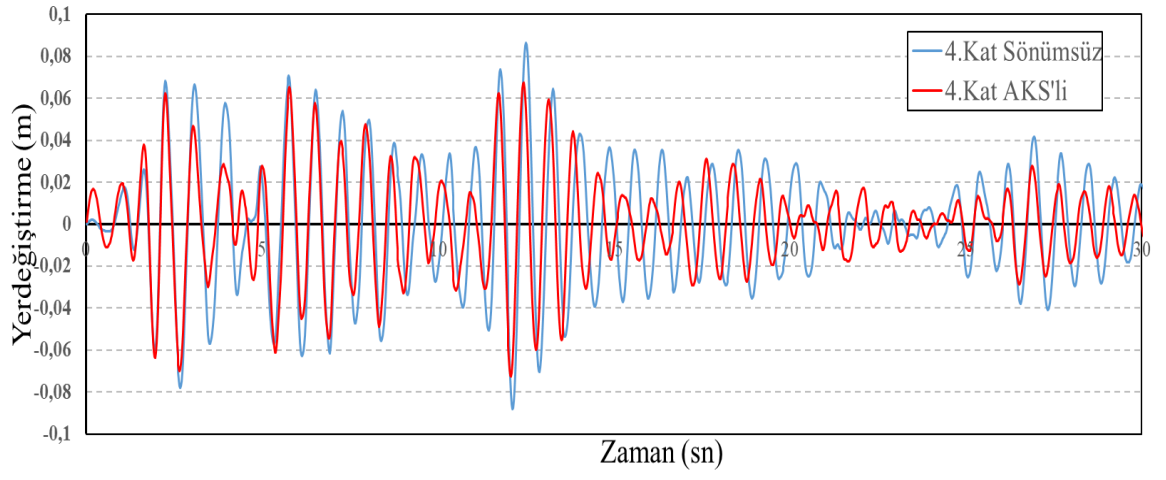
EK-B Deprem Analiz Sonuçları, El Centro (Devamı)



➤ Sıkı Kum



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



ÖZ GEÇMİŞ

Şeyma TEBERİK, 20. 09. 1993 tarihinde Niğde’ de doğdu. İlköğretimini Neziha ve Tahsin İlköğretim Okulunda ve lise eğitimini Niğde Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2011 yılında girdiği Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2015’de mezun oldu. 2016 – 2017 Öğretim Yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’ nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve öğrenimine devam etmekte olan TEBERİK, inşaat mühendisliği alanında doktora eğitime devam etmeyi hedeflemektedir. Bilim dalındaki ilgi alanı geoteknik başta olmak üzere mekanik ve yapı anabilim dallarıdır.