ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa TOLUN

DİNAMİK YÜK ETKİSİNDEKİ KAZIKLARIN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA-2016

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİNAMİK YÜK ETKİSİNDEKİ KAZIKLARIN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Mustafa TOLUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 19/12/2016 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

…….....	…….....	…….....
Prof. Dr. Mustafa LAMAN	Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ	Doç. Dr. Hamza GÜLLÜ
DANIŞMAN	ÜYE	ÜYE

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİNAMİK YÜK ETKİSİNDEKİ KAZIKLARIN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Mustafa TOLUN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Mustafa LAMAN
Yıl: 2016, Sayfa: 120
Jüri : Prof. Dr. Mustafa LAMAN
: Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
: Doç. Dr. Hamza GÜLLÜ

Bu çalışmada, kum zemine gömülü tekil bir kazığın dinamik yük etkisindeki davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde, sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca, bu programın dinamik analiz modülünün ürettiği sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için zeminlerin bir boyutlu yer tepki analizini gerçekleştirebilen Deepsoil bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Her iki programdan elde edilen sonuçların oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Analizlerde, zemin sıkılığının etkisi, dinamik yükün genliğinin ve frekansının etkisi, kazık başlığının etkisi, kazık rijitliğinin ve sünekliğinin etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Bu parametreler için Plaxis 2D programında yer alan iki farklı zemin modeli kullanılmış ve analizlerde kullanılan dinamik yük zemin tabanına etki ettirilen sinüzoidal bir yer hareketi olarak belirlenmiştir. Araştırılan her parametrenin kazık davranışında önemli bir etkisinin olduğu görülmüş ve elde edilen sayısal sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Deepsoil, Dinamik analiz, Kum zemin, Kazık, Plaxis 2D.

ABSTRACT

MSc THESIS

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOUR OF PILES UNDER THE DYNAMIC LOAD

Mustafa TOLUN

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa LAMAN
Year: 2016, Pages: 120
Jury : Prof. Dr. Mustafa LAMAN
: Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
: Assoc. Prof. Dr. Hamza GÜLLÜ

In this study, the behaviour of a single pile under the dynamic load has been investigated numerically in sand soil conditions. Numerical analyses carried out for this purpose have been performed by using Plaxis 2D which is a software based on finite element method. Furthermore, Deepsoil computer software that can perform one-dimensional site response analysis of ground has been used to check the accuracy of the results produced by Plaxis 2D dynamic analysis module. It has been observed that the results obtained from both programs are quite compatible. In the analyses, the effect of the relative density of sand, the effect of the dynamic load amplitude and frequency, the effect of the pile cap, and the effect of the pile stiffness and flexibility have been investigated in detail. For these parameters, two different soil models in the Plaxis 2D have been used and the dynamic load used in the analyses has been determined as a sinusoidal ground motion applied to sand bottom. It has been observed that the all investigated parameters affect significantly the behaviour of pile and the results obtained from analyses have been presented in detail.

Keywords: Deepsoil, Dynamic analysis, Plaxis 2D, Pile, Sand soil

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Bu çalışmada, kum zemine gömülü tekil bir kazığın dinamik yük etkisindeki davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde, sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Bu programın dinamik analiz modülünün ürettiği sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için ilk olarak çalışmaya konu olan kum zeminin bir boyutlu yer tepki analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, zeminlerin bir boyutlu yer tepki analizini belirlemek amacıyla Deepsoil bilgisayar yazılımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Plaxis programının ürettiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Her iki programdan ürettiği sonuçların oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Analizlerde kullanılan dinamik yük, modelde yer alan kum zeminin tabanına 5 saniye boyunca etki ettirilen ve maksimum genliği 0.1g olan sinüzoidal bir yer hareketidir. Yer hareketinin zemin tabanına 5 saniye boyunca etki ettirilmesinin nedeni, bu sürenin maksimum ivmelenmeyi ve deplasmanları elde etmek için yeterli olmasıdır. Analizlerde, zemin sıkılığının etkisi, dinamik yükün genliğinin ve frekansının etkisi, kazık başlığının etkisi, kazık rijitliğinin ve sünekliğinin etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Bu parametreler için Plaxis 2D programında yer alan iki farklı zemin modeli kullanılmıştır.

Kum zeminin sıkılığının etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, kum zemin için sıkılığın artmasının deplasmanları azaltma da olumlu bir etkisi olduğu gözlenmiştir.

Dinamik yükün genliğinin tekil bir kazıkta oluşan deplasmanlara ve ivme değerlerine olan etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, yer hareketinin genliğinin artması ile kazık başında elde edilen hem maksimum ivme değerinin hem de düşey deplasmanın arttığı gözlenmiştir.

Dinamik yükün frekansının tekil bir kazıkta oluşan düşey deplasmanlara etkisini incelemek için gerçekleştirilen analizlere göre, dinamik davranışta rezonans frekans durumunun üzerinde durulması gereken çok önemli bir nokta

olduğu ve kazıkta oluşan maksimum deplasmanların bu frekans değerinde ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Dinamik yük etkisindeki tekil bir kazığın başında yer alan kazık başlığının, kazıkta meydana gelen düşey deplasmanlara olan etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, kazık ile birlikte başlık üretmenin düşey yönde meydana gelen deplasmanları azalttığı gözlenmiştir.

Kazık rijitliğinin etkisini incelemek için gerçekleştirilen analizlerde, kazık rijitliğinin artmasının kazık başında oluşan düşey deplasmanları azalttığı gözlenmiştir.

Kazık sünekliğinin etkisini incelemek için gerçekleştirilen analizlerde, kazık sünekliğinin artmasının kazık başında oluşan düşey deplasmanları azalttığı gözlenmiştir.

Sonuç olarak, araştırılan her parametrenin kazıkların dinamik davranışında önemli bir etkisinin olduğu görülmüş ve elde edilen sayısal sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince, çalışmalarıma yön veren, çalışmamın tüm aşamasında tavsiye ve eleştirileri ile yardımlarını esirgemeyen ve bana "Dinamik Yük Etkisindeki Kazıkların Davranışının İncelenmesi" konulu yüksek lisans tezini öneren, yapıcı ve yönlendirici fikirleri ile bana daima yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa LAMAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Değerli katkılarından dolayı, Sayın Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ'a, Sayın Doç. Dr. Hamza Güllü'ye ve bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Desteklerinden dolayı Sayın Arş. Gör. Buse EMİRLER'e, Sayın Arş. Gör. Sedat KARAAHMETLİ'ye ve Sayın İnş. Yük. Müh. Ahmet ARSLAN'a teşekkür ederim.

Katkılarından dolayı, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü personelleri Muzaffer KURT'a, ve Süleyman EVLEKSİZ'e teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her aşamasında yanımda olan ve benden desteklerini esirgemeyen değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ I
ABSTRACT III
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET V
TEŞEKKÜR VII
İÇİNDEKİLER IX
ÇİZELGELER DİZİNİ XIII
ŞEKİLLER DİZİNİ XV
SİMGELER VE KISALTMALAR XIX
1. GİRİŞ 1
1.1. Genel 1
1.2. Amaç ve Kapsam 3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 5
2.1. Genel 5
2.2. Deneysel Çalışmalar 8
2.2.1. Tamura ve ark (2000) 9
2.2.2. Meymand ve ark (2000) 13
2.2.3. Kagawa ve ark (2004) 18
2.2.4. Su ve Li (2006) 22
2.2.5. Zhang ve ark (2008) 24
2.2.6. Song ve Wu (2009) 27
2.2.7. Ünsever (2015) 29
2.3. Sayısal Çalışmalar 32
2.3.1. Finn ve Fujita (2002) 32
2.3.2. Hutchinson ve ark (2005) 35
2.3.3. Ramachandran (2005) 37
2.3.4. Cubrinovski ve ark (2005) 39
2.3.5. Irshad ve Akhtar (2006) 42

2.3.6. Ordu ve Özkan (2006) 44
2.3.7. Zhang ve ark (2008) 48
2.3.8. Zhaoyu ve ark (2009) 49
3. MATERYAL VE METOT 53
3.1. Genel 53
3.2. Zemin Özellikleri ve Modelleri 53
3.2.1. Lineer Elastik Model (LE) 57
3.2.2. Mohr-Coulomb Model (MC) 58
3.2.2.1. Young Modülü (E) 59
3.2.2.2. Poisson Oranı (ν) 61
3.2.2.3. Kohezyon (c) 61
3.2.2.4. İçsel Sürtünme Açısı (φ) 62
3.2.2.5. Genleşim Açısı (ψ) 63
3.2.3. Hardening Soil Model (HS) 64
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Dinamik Analiz 68
3.3.1. Dinamik Davranış Formülasyonu 68
3.3.2. Dalga Hızları 70
3.3.3. Kritik Zaman Adımı 72
3.3.4. Model Sınırları 73
3.3.4.1. Viskoz Sınırlar (Sönümleyiciler) 74
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 75
4.1. Genel 75
4.2. Bir Boyutlu Yer Tepki Analizi 75
4.3. İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi 79
4.3.1. Zemin Sıkılığının Etkisinin İncelenmesi 80
4.3.2. Dinamik Yükün Frekansının ve Genliğinin Etkisinin İncelenmesi 85
4.3.2.1. Dinamik Yükün Genliğinin Etkisi 85
4.3.2.2. Dinamik Yükün Frekansının Etkisi 93
4.3.3. Kazık Başlığının Etkisinin İncelenmesi 98

4.3.4. Kazık Rijitliğinin Etkisinin İncelenmesi.....101
4.3.5. Kazık Sünekliğinin Etkisinin İncelenmesi.....105
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 109
5.1. Genel 109
5.2. Sonuçlar.....110
5.3. Öneriler.....113
KAYNAKLAR.....115
ÖZGEÇMİŞ.....119

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 4.1. Deepsoil programında kullanılan kum zemin özellikleri 77
Çizelge 4.2. Plaxis programında kullanılan kum zemin özellikleri.....78
Çizelge 4.3. Farklı rölatif sıkılıktaki zeminlerin sınıflandırılması 81
Çizelge 4.4. Mohr-Coulomb zemin modeli parametreleri.....81
Çizelge 4.5. Hardening Soil zemin modeli parametreleri.....82
Çizelge 4.6. Kazık elemanın malzeme parametreleri 87
Çizelge 4.7. Farklı “w/w_n” oranları için yer hareketinin frekansları 93

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 2.1. İdealleştirilmiş kazık-yapı sistemi 6
Şekil 2.2. Zemin modülünün derinli ile değişimi 7
Şekil 2.3. Sarsma tablası deney düzeneği 10
Şekil 2.4. Küçük ivme değerleri için elde edilen sonuçlar 11
Şekil 2.5. Büyük ivme değerleri için elde edilen sonuçlar 12
Şekil 2.6. Deney sonrası kazıklarda meydana gelen çatlaklar 13
Şekil 2.7. Farklı ağırlıklar altındaki tekil kazıklar 14
Şekil 2.8. Kazıklarda meydana gelen eğilme momentleri 15
Şekil 2.9. Direkt (Doğrudan) yöntem modeli 16
Şekil 2.10. Altsistem yöntemi modeli 17
Şekil 2.11. Sarsma tablası ve santrifüj deney kasaları 19
Şekil 2.12. Zeminin farklı frekanslar için davranışı 19
Şekil 2.13. Büyük ölçekli sarsma tablası deney düzeneği 20
Şekil 2.14. Farklı frekanslar için deneylerin karşılaştırılması 21
Şekil 2.15. Santrifüj deney kasası ve düzeneği 22
Şekil 2.16. Farklı sarsma şiddetleri için boşluksuyu basınçları 23
Şekil 2.17. Boşluksuyu basınçlarının derinlik ile değişimi 23
Şekil 2.18. Kazık boyunca oluşan eğilme momentleri 24
Şekil 2.19. Grup kazık santrifüj deneyi düzeneği 25
Şekil 2.20. Santrifüj deneylerde kullanılan deprem veri kaydı 25
Şekil 2.21. Farklı zemin koşulları için ivme değerleri 26
Şekil 2.22. Durum 1 ve 2 için ölçülen ivme değerleri 27
Şekil 2.23. Temel, kazık ve kompozit malzeme 28
Şekil 2.24. Kazık boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler 29
Şekil 2.25. Deneylerde kullanılan kazık grubu ve radye temel 30
Şekil 2.26. Sarsma tablası ve laminar deney kasası 30
Şekil 2.27. Zeminin rezonans frekansı 31

Şekil 2.28. Radyeli ve radyesiz durumdaki düşey deplasmanlar.....32
Şekil 2.29. PILE-3D sonlu elemanlar ağı.....33
Şekil 2.30. Eğilme momentlerinin derinlik ile değişimi.....34
Şekil 2.31. Kütleli ve kütlesiz tekil bir kazığın yanal rijitliği.....35
Şekil 2.32. 2D mesafe için eğilme momenti-deplasman.....36
Şekil 2.33. Tekil kazığın üçboyutlu sonlu elemanlar modeli.....37
Şekil 2.34. Tekil bir kazığın farklı ara yüzler için davranışı.....38
Şekil 2.35. Sarsma tablası deney düzeneği.....39
Şekil 2.36. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli.....40
Şekil 2.37. Kazık başında oluşan yatay deplasmanlar.....41
Şekil 2.38. Palplanş başında oluşan yatay deplasmanlar.....42
Şekil 2.39. Deforme olmuş sonlu elemanlar ağı.....42
Şekil 2.40. Kazıkta oluşan moment ve kesme kuvveti.....43
Şekil 2.41. San Fernando depremine ait yer hareketi.....44
Şekil 2.42. Analizlerde kullanılan zemin kazık sistemi.....45
Şekil 2.43. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli.....46
Şekil 2.44. Kazık boyunca elde edilen eğilme momentleri.....47
Şekil 2.45. Kazık boyunca elde edilen kesme kuvvetleri.....47
Şekil 2.46. İkinci durum için sonlu elemanlar modeli.....48
Şekil 2.47. Ölçülen ve hesaplanan ivme değerleri.....49
Şekil 2.48. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan modeller.....50
Şekil 2.49. Analizlerde kullanılan deprem kaydı.....50
Şekil 2.50. Statik yükleme için dolguda oluşan deplasmanlar.....51
Şekil 2.51. Dinamik yükleme için dolguda oluşan ivmeler.....52
Şekil 3.1. Plaxis 2D'de oluşturulan sonlu elemanlar ağı.....56
Şekil 3.2. Duvarda oluşan eğilme momentleri.....57
Şekil 3.3. Elastik-tam plastik model.....59
Şekil 3.4. E_0, E_{50} ve E_{ur} modülleri.....60
Şekil 3.5. Mukavemet parametreleri.....62

Şekil 3.6. Mohr-Coulomb akma yüzeyi.....64
Şekil 3.7. Hardening Soil akma yüzeyi 65
Şekil 3.8. Gerilme-deformasyon ilişkisi.....66
Şekil 3.9. Cisim dalgalarının oluşturdukları deformasyon 70
Şekil 4.1. Zemin yüzeyine yakın kesimde düşey dalga yayılması 76
Şekil 4.2. Analizlerde kullanılan sinüzoidal yer hareketi.....77
Şekil 4.3. Plaxis sonlu elemanlar ağı.....78
Şekil 4.4. Deepsoil ve Plaxis yer tepki analiz sonuçlarının karşılaştırılması 79
Şekil 4.5. Sonlu elemanlar modeli ve viskoz sınırlar (sönümleyici sınırlar).....82
Şekil 4.6. Zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman grafiği–(MC) 83
Şekil 4.7. Zemin yüzeyinde elde edilen deplasman-zaman grafiği–(MC) 83
Şekil 4.8. Zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman grafiği–(HS).....84
Şekil 4.9. Zemin yüzeyinde elde edilen deplasman-zaman grafiği–(HS).....85
Şekil 4.10. Gevşek kum zemin için rezonans frekansındaki sinüzoidal yer hareketi.....86
Şekil 4.11. Sıkı kum zemin için rezonans frekansındaki sinüzoidal yer hareketi ...86
Şekil 4.12. Kazık eleman ve eksenel simetrik sonlu elemanlar modeli.....88
Şekil 4.13. Gevşek koşullar için kazık başındaki ivme-zaman grafiği–(MC).....88
Şekil 4.14. Gevşek koşullar için kazık başındaki deplasman-zaman grafiği–(MC) 89
Şekil 4.15. Sıkı koşullar için kazık başındaki ivme-zaman grafiği–(MC) 89
Şekil 4.16. Sıkı koşullar için kazık başındaki deplasman-zaman grafiği–(MC) 90
Şekil 4.17. Gevşek koşullar için kazık başındaki ivme-zaman grafiği–(HS).....91
Şekil 4.18. Gevşek koşullar için kazık başındaki deplasman-zaman grafiği–(HS) .91
Şekil 4.19. Sıkı koşullar için kazık başındaki ivme-zaman grafiği–(HS).....92
Şekil 4.20. Sıkı koşullar için kazık başındaki deplasman-zaman grafiği–(HS).....92
Şekil 4.21. Gevşek koşullarda farklı frekanslar için düşey deplasmanlar–(MC) 94
Şekil 4.22. Gevşek koşullarda farklı frekanslar için maksimum deplasmanlar–(MC).....94
Şekil 4.23. Sıkı koşullarda farklı frekanslar için düşey deplasmanlar–(MC).....95

Şekil 4.24. Sıkı koşullarda farklı frekanslar için maksimum deplasmanlar–(MC) .95
Şekil 4.25. Gevşek koşullarda farklı frekanslar için düşey deplasmanlar–(HS) 96
Şekil 4.26. Gevşek koşullarda farklı frekanslar için maksimum deplasmanlar–(HS).....96
Şekil 4.27. Sıkı koşullarda farklı frekanslar için düşey deplasmanlar–(HS).....97
Şekil 4.28. Sıkı koşullarda farklı frekanslar için maksimum deplasmanlar–(HS)...97
Şekil 4.29. Kazık başlığının etkisi için oluşturulan sonlu elemanlar modeli.....98
Şekil 4.30. Mohr-Coulomb zemin modeli ve gevşek kum zemin koşulları 99
Şekil 4.31. Mohr-Coulomb zemin modeli ve sıkı kum zemin koşulları.....99
Şekil 4.32. Hardening Soil zemin modeli ve gevşek kum zemin koşulları 100
Şekil 4.33. Hardening soil zemin modeli ve sıkı kum zemin koşulları 100
Şekil 4.34. Farklı çapa sahip kazıklar (a) B=0.4m; (b) B=0.5m; (c) B=0.6m 101
Şekil 4.35. Kazık çapının gevşek kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(MC) .102
Şekil 4.36. Kazık çapının sıkı kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(MC).....103
Şekil 4.37. Kazık çapının gevşek kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(HS) ..103
Şekil 4.38. Kazık çapının sıkı kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(HS).....104
Şekil 4.39. Farklı boya sahip kazıklar (a) L=4m; (b) L=5m; (c) L=6m 105
Şekil 4.40. Kazık boyunun gevşek kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(MC)106
Şekil 4.41. Kazık boyunun sıkı kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(MC) 107
Şekil 4.42. Kazık boyunun gevşek kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(HS) 107
Şekil 4.43. Kazık boyunun sıkı kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(HS).....108

SİMGELER VE KISALTMALAR

B : Kazık çapı

c : Kohezyon

C : Sönüm matrisi

C_1, C_2 : Sönümleme katsayıları

E : Young Modülü

E_{eod}^{ref} : Referans tanjant modülü

E_{ur} : Boşaltma/tekrar yükleme modülü

E_{ur}^{ref} : Referans boşaltma/tekrar yükleme modülü

E_0 : Başlangıç rijitlik modülü

E_{50} : Sekant modülü

E_{50}^{ref} : Referans rijitlik modülü

f : Akma fonksiyonu

F : Yük vektörü

g : Yer çekimi ivmesi

G : Kayma modülü

G_0^{ref} : Referans kayma modülü

H : Zemin tabaka kalınlığı

HS : Hardening Soil model

I_e : Ortalama eleman boyu

K : Rijitlik matrisi

K_0 : Sükunet basınç katsayısı

L : Kazık boyu

LE : Lineer Elastik model

m : Gerilme seviyesine bağlı rijitlik oranı

M : Kütle matrisi

MC : Mohr-Coulomb model

M_t : Kazık başında yer alan üstyapı kütlesi

p^{ref} : Referans çevre basıncı

q_a : Kayma mukavemetinin asimptot kaldığı değer

R_f : Göçme oranı

S, B : Sonlu elemanın en büyük boyutları

SH : Kayma dalgasının düşey bileşeni

u : Deplasman vektörü

$\dot{u}$: Hız vektörü

$\ddot{u}$: İvme vektörü

V_p : Basınç dalga hızı

V_s : Kayma dalga hızı

w : Dinamik yükün frekansı

w_n : Zeminin doğal frekansı

$\Delta t_{critical}$: Kritik zaman adımı

α_R, β_R : Rayleigh katsayıları

γ : Birim hacim ağırlık

γ_k : Kuru birim hacim ağırlık

γ_{sat} : Kum zeminin doygun birim hacim ağırlığı

γ_{unsat} : Kum zeminin doygun olmayan birim hacim ağırlığı

$\gamma_{0.7}$: Eşik kayma gerilmesi

ε : Deformasyon

ε^e : Elastik deformasyon

ε^p : Plastik deformasyon

ε_1 : Üç eksenli basınç deneyinden elde edilen düşey deformasyon

ν : Poisson oranı

ξ : Sönüm oranı

ρ : Yoğunluk

σ_n : Normal gerilme

$\sigma_{tension}$: Çekme gerilmesi

τ : Kayma gerilmesi

φ : İçsel sürtünme açısı

ψ : Dilatasyon açısı

1. GİRİŞ

1.1. Genel

Geoteknik mühendisliği uygulamaları arasında önemli yer tutan kazıkların davranışının hem statik hem de dinamik yükleme açısından (deprem yükleri, rüzgâr yükleri, dalga yükleri, titreşimli makine yüklemeleri, düzensiz taşıt hareketleri vb) incelenmesi oldukça önemli bir konudur (Siyahi ve ark, 2015). Kazıkların davranışının statik yükleme açısından incelenmesi uzun yıllar öncesine dayansa da dinamik yükleme açısından incelenmesi çok daha yeni bir araştırma alanıdır. Bu durumun sebebi olarak, derin temellere ihtiyaç duymayan sağlam zeminlerin azalması, açık deniz yapıları, nükleer santraller, gökdelenler ve köprüler gibi önemli yeni uygulama alanlarının ortaya çıkması, yüzeysel temellerin dinamik davranışının incelenmesinde kayda değer bir gelişmenin sağlanması gösterilebilir (Novak, 1991). Fakat en önemli neden, tekil bir kazığın dinamik yük etkisindeki davranışını araştıran problemi tamamıyla anlamanın oldukça zor ve karmaşık olmasıdır. Bu problemi karmaşık hale getiren ve çözülmesini zorlaştıran durumlar kısaca şu şekilde özetlenebilir.

- Zemin-kazık etkileşimi
- Zeminin doğrusal olmayan histerik davranışı
- Kazık-kazık etkileşimi (Grup etkisi)
- Üstyapı-temel etkileşimi

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı, kazıkların dinamik davranışının incelenmesi ilk başlarda birçok araştırmacı tarafından imkansız olarak görülmüş ve bu durumu Terzaghi ve Peck (1967), kazık problemleri ile dinamik açıdan ilgilenen teorik gelişmeler yerinde olmamakla beraber güvenilir bir şekilde göz ardı

edilebilir, şeklinde ifade etmişlerdir. Bu görüşün aksine konunun önemli olduğunu düşünen bazı araştırmacılar, teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Tekil bir kazığın dinamik yükleme etkisindeki davranışı ilk olarak, Parmelee ve ark (1964), Tajimi (1966), Penzein (1970) ve Novak (1974) gibi araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalar genellikle teorik çalışmalar olmakla birlikte, çalışmada en ideal şartlar olan lineer elastik veya viskoelastik homojen bir zemin ve bu zemin ile bir bütünmüş gibi davranan kazık kabulleri yapılmıştır (Novak, 1991).

Tajimi (1966), homojen bir zemin tabakasındaki uç kazığın yatay hareketini incelemiş ve kazığın düşey hareketini ihmal etmiştir. Tajimi'nin bu çalışması, bu alanda gerçekleştirilmiş ilk çalışma olarak değerlendirilmektedir. Nogami ve Novak (1976), ise homojen bir zemin tabakasındaki uç kazığın hem yatay hareketini hem de düşey hareketini incelemişlerdir. Bu çalışmalar, kazık-zemin sisteminin davranışını anlayabilmek için temel fikir oluşturmuştur. Daha sonra Kobori ve ark (1977), Sen ve ark (1985) ve Pak ve Jennings (1987) gibi çok sayıda araştırmacı tarafından analitik yöntemler ortaya çıkarılmış ve bu yöntemlerin doğruluğu Rajapakse ve Shah (1989) gibi farklı araştırmacılar tarafından incelenerek bu analitik yöntemlerin yeterince iyi sonuç vermediği gözlenmiştir (Novak, 1991).

Kazıkların dinamik yük etkisindeki davranışını incelemek için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar oldukça az olmakla birlikte bu çalışmalarda genellikle sarsma tablaları kullanılmıştır ve bu sarsma tablaları üzerine yerleştirilen deney kasaları dalga yansımasını engelleyebilen sınırlara sahiptir (Novak, 1991). Mizuna ve ark (1984), Nomura ve ark (1991), Han (1995), Murono ve ark (1997), Tokimatsu ve Suzuki (2004), Ishizaki ve ark (2012) ve Ünsever (2015) gibi araştırmacılar bu alanda deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarda, model bir uç kazığın kuru zemin koşullarında yatay statik ve dinamik yük

etkisindeki davranışını incelemişlerdir. Kazıklar, deney kasasının tabanına sabitlenerek uç kazığı olarak çalışabilmeleri sağlanmıştır.

Kazıkların dinamik koşullardaki davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için Cheney ve ark (1990), Horikoshi ve ark (2003a, 2003b) ve Matsumoto (2010) gibi araştırmacılar tarafından santrifüj deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kum zemine gömülü kazıkların yatay statik ve dinamik yük etkisindeki davranışları incelenmiştir.

Kazıkların dinamik yükler etkisindeki davranışını anlamak için sıklıkla başvurulan yöntemlerden birisi de sonlu elemanlar yöntemidir. Birçok araştırmacı, bu yöntemin geçerliliğini belirlemek için model deneyler yapmış ve bu yöntemin oldukça iyi sonuçlar verdiğini gözlemişlerdir. İlk olarak, Kuhlemeyer (1976), Blaney ve ark (1976), Wolf ve Von Arx (1978), Waas ve Hartmann (1981), Sanchez-Salinero (1982) gibi araştırmacılar bu yöntemi kullanarak lineer elastik ve homojen bir zemindeki kazığın davranışını incelemişlerdir (Novak, 1991). Bu yöntem sayesinde kazıkların davranışının anlaşılması kolaylaşmış hatta deprem gibi karmaşık dinamik tepkilere karşı analizlerin yapılması mümkün olmuştur.

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada, tekil bir kazığın dinamik yük etkisindeki davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde, sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Bu programın dinamik analiz modülünün ürettiği sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için ilk olarak çalışmaya konu olan kum zeminin bir boyutlu yer tepki analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, zeminlerin bir boyutlu yer tepki analizini belirlemek amacıyla Hashash ve ark (2015) tarafından geliştirilen Deepsoil bilgisayar yazılımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Plaxis programının ürettiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Sayısal çalışmada, tekil bir kazığın başında oluşan düşey deplasmanlar farklı parametreler etkisinde detaylı olarak incelenmiştir. Bu parametreler sırasıyla,

- Zemin sıkılığının etkisi,
- Dinamik yükün frekansının ve genliğinin etkisi,
- Kazık başlığının etkisi,
- Kazık rijitliğinin etkisi
- Kazık sünekliğinin etkisi

şeklindedir. Bu parametreler, hem Mohr-Coulomb zemin modeli hem de Hardening Soil zemin modeli kullanılarak incelenmiştir. Çalışmaya ait bölümler aşağıda verilmiştir.

2. bölümde, konu ile ilgili geniş bir literatür çalışması gerçekleştirilmiş, ve konu hakkındaki önemli bölümler detaylı olarak sunulmuştur.

3. bölümde, sonlu elemanlar programında yer alan ve zeminlerin davranışını modellemek için kullanılan malzeme modellerinden bahsedilmiştir. Ayrıca, dinamik analizde dikkat edilmesi gereken konulara değinilmiştir.

4. bölümde, sonlu elemanlar programının dinamik analiz modülü kullanılarak, incelenmesi amaçlanan parametreler için bir dizi analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmuştur.

5. bölümde, elde edilen sonuçlardan özetle bahsedilmiş ve gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

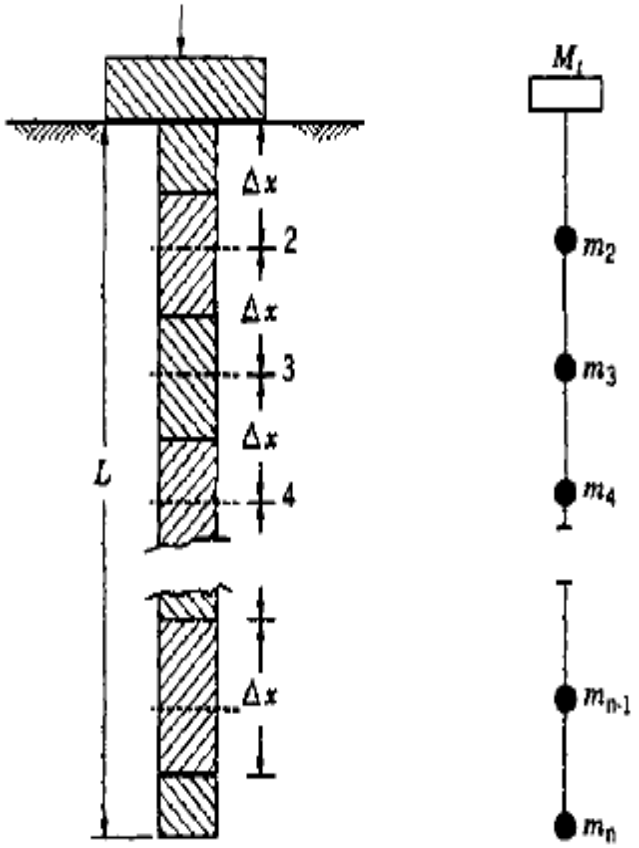
2.1. Genel

Yapılar, kendi ağırlıklarını ve üzerlerine etkiyen yükleri çeşitli taşıyıcı elemanlar (kolon, kiriş, döşeme vb) sayesinde temele aktarırlar. Temel zemini yapıdan gelecek olan yükleri taşıyamayacak kadar zayıf ise bu yükleri daha sağlam zemin tabakasına iletmek için kazıklar vasıtasıyla temelin derinliği artırılır (Ünsever, 2015). Genellikle zayıf zeminlerde kullanılan kazıklar (deprem yükleri, rüzgâr yükleri, dalga yükleri, titreşimli makine yüklemeleri, düzensiz taşıt hareketleri vb) dinamik yüklere maruz kaldıklarında yer hareketini büyüterek yapıda ciddi hasarlara sebep olabilmektedir (Ünsever, 2015). Bu yüzden kazıkların dinamik yük etkisindeki davranışını belirlemek çok önemli bir konu olmakla birlikte günümüzde kazıkların tasarımında kullanılan en yaygın yaklaşım, üstyapının dinamik analizinden elde edilen taban kesme kuvvetinin kazıklara uygulanan toplam yanal kuvvet olarak kabul edilmesidir (Ünsever, 2015).

Dinamik yük etkisindeki bir kazığın zeminle olan etkileşimini ifade eden problemin pratik bir çözümü Chandrasekaran (1974) tarafından önerilmiştir. Bu çözüm, aşağıda verilen bazı kabullere dayanmaktadır (Prakash ve Sharma, 1990).

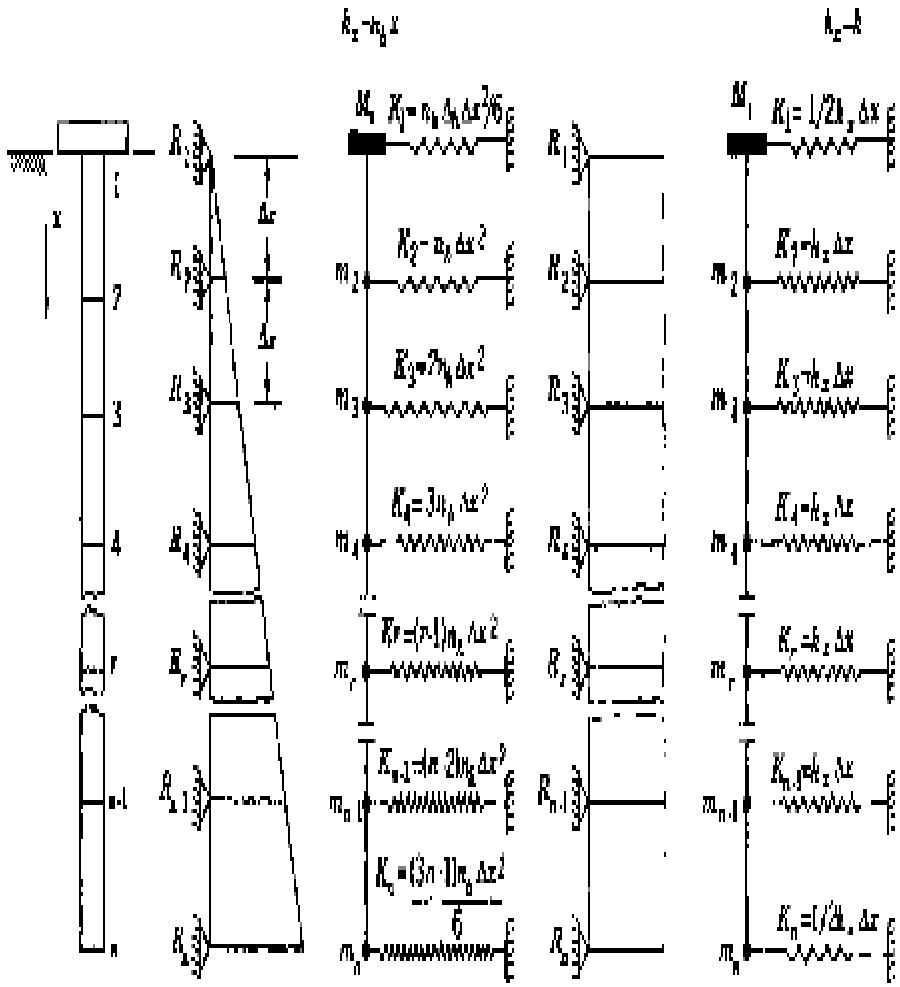
- Kazık uygun sayıda elemanlara ayrılır ve her bir elemanın kütlesi merkezinde toplanır (Şekil 2.1).
- Zemin lineer Winkler yayı olarak kabul edilir ve zemin her bir kazık elamanının merkezinden itibaren tabakalara ayrılır. Zemin modülü, derinlik arttıkça lineer olarak artan ya da derinlikten bağımsız sabit bir değer olarak kabul edilir (Şekil 2.2).
- Üstyapının kütlesi (M_t) kazık başında konumlandırılır ve kazık ucu serbest olarak kabul edilir.
- Sistem bir boyutlu olarak kabul edilir.

Yukarıda verilen kabuller doğrultusunda yapılan çözümlerde, titreşimin ilk üç modu için kazık boyunca meydana gelen eğilme momentleri, kesme kuvvetleri, deplasmanlar ve zemin hareketi incelenmiştir (Prakash ve Sharma, 1990).



Şekil 2.1. İdealleştirilmiş kazık-yapı sistemi (Prakash ve Sharma, 1990)

Burada; (M_t), kazık başında yer alan üstyapı kütlesini temsil ederken, (m_2, m_3, m_4……m_{n-1}, m_n) ise belirli sayıda elemanlara ayrılan kazığın her bir elemanının kütlesini temsil etmektedir.



Şekil 2.2. Zemin modülünün derinlik ile değişimi (Prakash ve Sharma, 1990)

Novak (1991), dinamik yük etkisindeki kazıkların davranışını inceleyen teorik yöntemler hakkında kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmasında yöntemler lineer ve nonlineer davranış göstermelerine göre ikiye ayrılmıştır. Lineer davranışa (Elastic Continuum Model) göre kazık, elastik malzeme özelliği gösterdiği düşünülen zeminle bir bütün olarak davranıyormuş gibi düşünülür ve bu yöntemle çok düşük seviyelerdeki dinamik etkilere maruz kalan homojen zemine gömülü tekil bir kazık probleminin çözümü

gerçekleştirilebilmektedir. Nonlineer davranışta (Lumped Mass-Spring-Dashpot Model) ise, kazık davranışı çevresindeki zemin ortamından ayrı olarak düşünülür ve zemin ortamının kazığın davranışına olan etkisi kazık boyunca tanımlanan yaylar ve sönümleyiciler sayesinde belirlenir. Bu yöntem, tekil bir kazığın sismik davranışını belirlemek amacıyla oldukça yaygın olarak kullanılır ve bu yöntem sayesinde güçlü dinamik etkiler altındaki zemin ve kazık davranışı modellenebilmektedir (Thavaraj, 2000).

Kazıkların dinamik yükler etkisindeki davranışını anlamak için son yıllarda sıklıkla başvurulan yöntemlerden birisi de sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntem sayesinde farklı zemin koşulları için geliştirilmiş zemin modelleri kullanılarak zeminin hem lineer hem de nonlineer davranışı incelenebilmektedir. Ayrıca, bu yöntem sayesinde farklı dinamik yüklemeler (harmonik, deprem) neticesinde kazıklarda oluşabilecek eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve deplasmanlar incelenebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen bu sayısal yöntemlerin geçerliliğinin veya doğrulunun belirlenebilmesi için çok sayıda vaka analizine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu konuda gerçekleştirilmiş vaka analizlerinin sayısı oldukça azdır. Bu yüzden araştırmacılar genellikle laboratuvar deneyleri olan sarsma tablası veya santrifüj deneylerine başvurmaktadır. Sarsma tablası deneyleri, büyük genlikli hareketlerin iyi bir şekilde kontrol edilebilmesini ve modelin gerçekçi davranışını incelemek için daha kolay deneysel ölçümler yapılabilmesini sağlamaktadır. Bunun yanısıra, santrifüj deneylerinde prototipler içerisinde yerçekimsel gerilme alanı oluştuğundan, zeminin karmaşık davranışı daha gerçekçi bir şekilde modellenebilmektedir (Ünsever, 2015).

2.2. Deneysel Çalışmalar

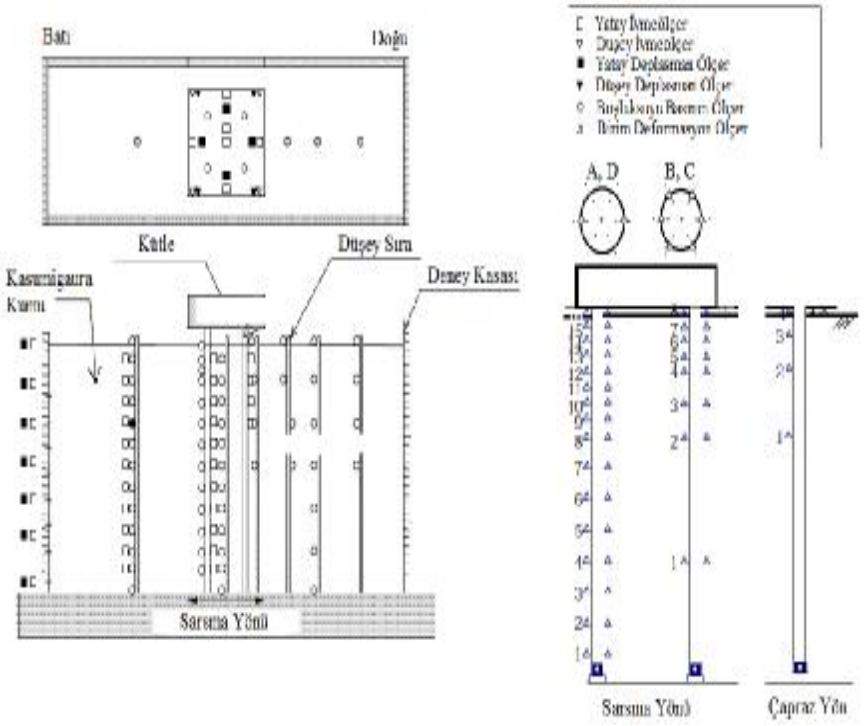
Kazıkların dinamik yük etkisindeki davranışı laboratuvar ortamında incelenmek istenirse bu amaçla gerçekleştirilebilecek iki tip model deney bulunmaktadır. Bunlar, sarsma tablası ve santrifüj deneyleridir. Bu iki deney

arasındaki temel fark, sarsma tablası deneyleri 1-g yerçekimi etkisinde gerçekleştirirlerken, santrifüj deneyleri ise farklı yerçekimi etkisinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu deneylere ait modeller kurulurken, prototipe oranla çok daha küçük boyutlar seçilmektedir. Bu sayede, hem deney kolay bir şekilde kontrol edilebilmekte, hem de deney sonuçlarına hızlı bir şekilde ulaşılabilmektedir. Ayrıca, dinamik yükleme koşulları etkisindeki sarsma tablası ve santrifüj deneylerinde dikkat edilmesi gereken en önemli husus modelin sınırlarıdır. Çünkü deney kasasında bulunan zemin kütlesi sarsıldığında, dalgalar modelin sınırlarından tekrar yansıyabilir (Ünsever, 2015). Bu durumdan kaçınmak için, model sınırlarının sönümleyebilme özelliğine sahip olması gerekmektedir. Bu sayede, zemin ortamı içinde dışa doğru yayılan dalgaların, modelin sınırlarından tekrar yansıyarak zemin ortamına geri dönmesi engellenebilmektedir (Aydınoğlu, 2011).

Literatürde, yanal veya düşey dinamik yük etkisindeki kazıkların davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiş önemli deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Hem doygun hem de doygun olmayan zemin koşullarının dikkate alındığı bu çalışmalardan aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

2.2.1. Tamura ve ark (2000)

Tamura ve ark (2000), doygun kum zemine gömülü kazıkların göçme mekanizmasını belirlemek, kazık-üstyapı sisteminin dinamik davranışını incelemek ve güçlü yer hareketi sonucunda zarar gören kazıkların üstyapıya olan etkisini değerlendirmek amacıyla sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullanılan sarsma tablası, 15m x 15m boyutlarında ve 500ton kapasiteye sahiptir. Ayrıca 6m yüksekliğinde, 3.5m genişliğinde ve 12m uzunluğunda, dinamik deney koşullarına (sönümleyici sınırlara) sahip laminar deney kasası kullanılmıştır (Şekil 2.3).

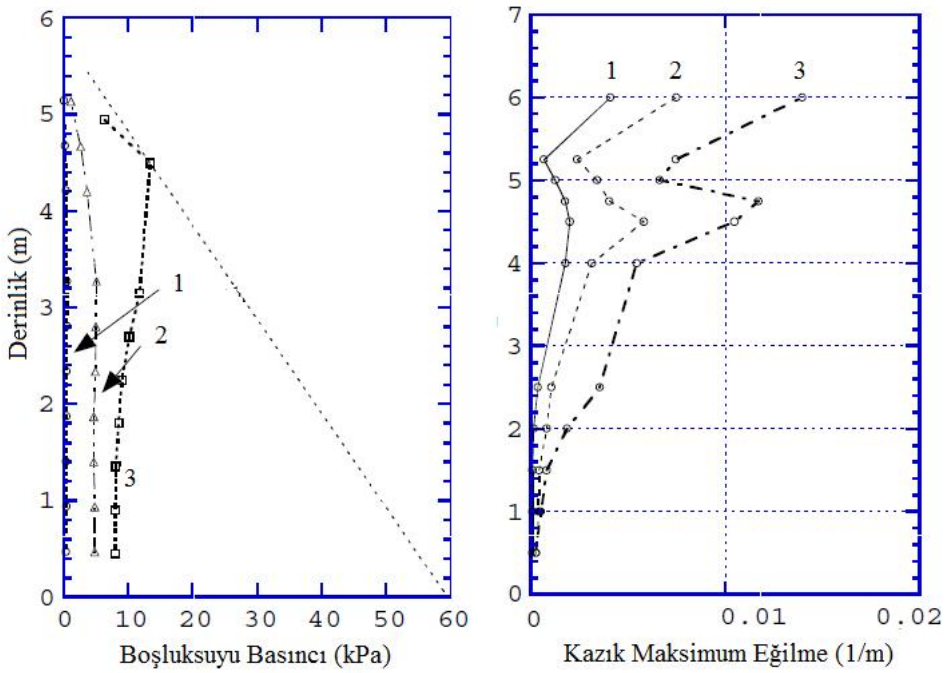


Şekil 2.3. Sarsma tablası deney düzeneği (Tamura ve ark, 2000)

Deneylerde, 6m uzunluğunda ve 15cm çapında, (2x2) yerleşim düzenine sahip 4 adet beton kazık ve rölatif sıkılığı %60 olan kum zemin kullanılmıştır. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyindedir. Üstyapıyı temsil etmesi amacıyla, 14.1ton ağırlığındaki rijit çelik bir plaka kazık başlarına yerleştirilmiştir ve kazık uçları deney kasasının tabanına dönmeye izin verilecek şekilde tutturulmuştur. Deney süresince, kazıklarda oluşan gerilmeleri, üstyapının oturmasını, aşırı boşluk suyu basıncını ve meydana gelen ivmeleri ölçebilmek için gerekli araçlar kullanılmıştır. Deneylerde, Tokyo bölgesi için beklenen muhtemel yer hareketinden elde edilmiş ve üstyapının dinamik tasarımında kullanılan bir yer hareketi 4 farklı maksimum ivme değeri için (10, 30, 60, 310cm/sn^2) kullanılmıştır.

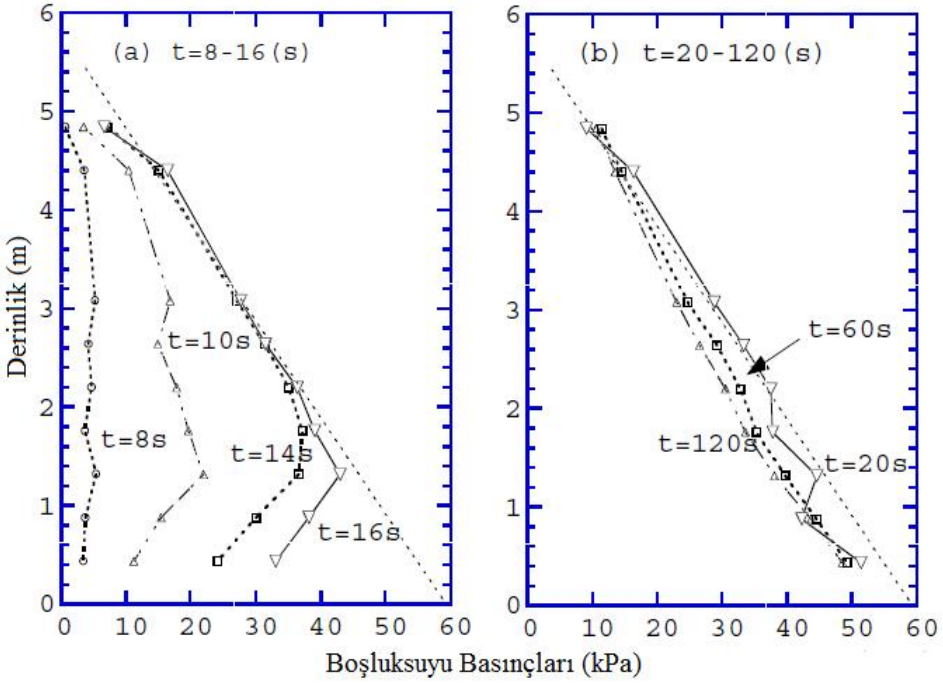
Maksimum ivme değerlerinin 10cm/sn^2, 30cm/sn^2 ve 60cm/sn^2 olduğu yer hareketleri için deney sonuçları incelendiğinde, ilk iki durumda sıvılaşma görülmediği fakat üçüncü durumda boşluk suyu basıncının arttığı gözlenmiştir.

Ayrıca, kazıklarda oluşan maksimum eğilmelerin üstyapının yaklaşık 1,5m aşağısında ve kazık başlarında oluştuğu gözlenmiştir. Kazıklarda oluşan bu maksimum eğilmelere, üstyapıdan temele aktarılan kuvvetlerin sebep olduğu gösterilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Küçük ivme değerleri için elde edilen sonuçlar (Tamura ve ark, 2000)

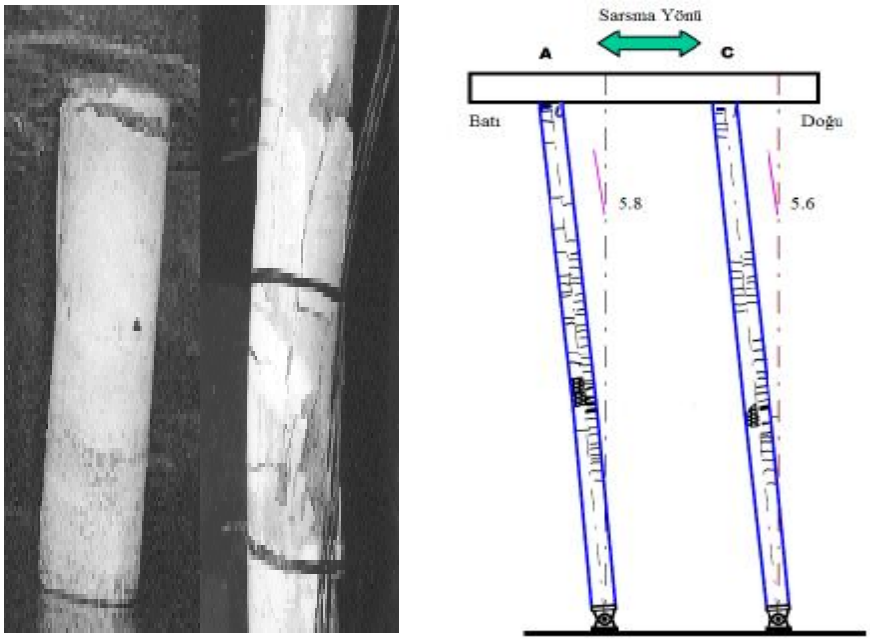
Maksimum ivme değerinin 310cm/sn^2 olduğu kuvvetli yer hareketi için yapılan deneyin 16. saniyesinde, zemin yüzeyine yakın bölgelerde sıvılaşmanın görüldüğü fakat daha derin bölgelerde ise zeminin tamamen sıvılaşmadığı gözlenmiştir. 20. saniyede ise artık zeminin alt bölümününde sıvılaştığı gözlenmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Büyük ivme değerleri için elde edilen sonuçlar (Tamura ve ark, 2000)

Kuvvetli yer hareketinin 16. saniyesinde zemin yüzeyinde büyük deplasmanlar oluştuğu ve üstyapıyı temsil eden modelin yatayda 36cm, düşeyde ise 1.1cm hareket ettiği kaydedilmiştir. Deney sonunda yatay deplasmanın 14cm daha artarak 50cm'ye ulaştığı görülmüştür. Buna ek olarak, deney tamamlandıktan 20 dakika sonra suyun kaynadığı ve zemin yüzeyinde kabarmalar oluşturduğu gözlenmiştir.

Deney tamamlandıktan sonra, kum zemin deney kasasından çıkarılarak, kazıklarda oluşan çatlaklar ve deformasyonlar incelenmiştir (Şekil 2.6).

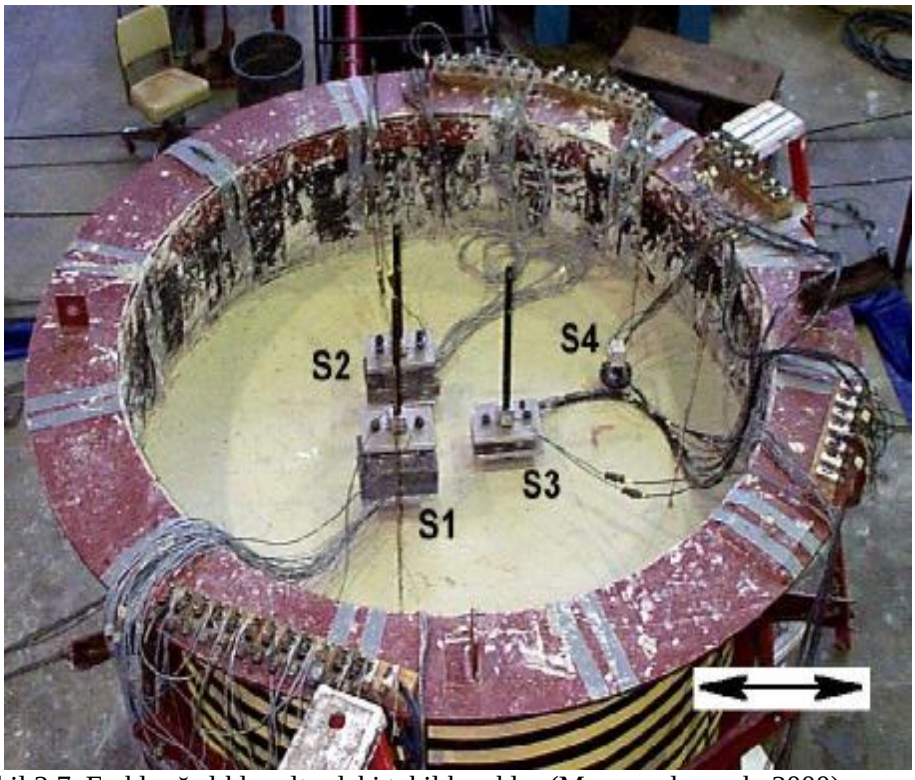


Şekil 2.6. Deney sonrası kazıklarda meydana gelen çatlaklar (Tamura ve ark, 2000)

2.2.2. Meymand ve ark (2000)

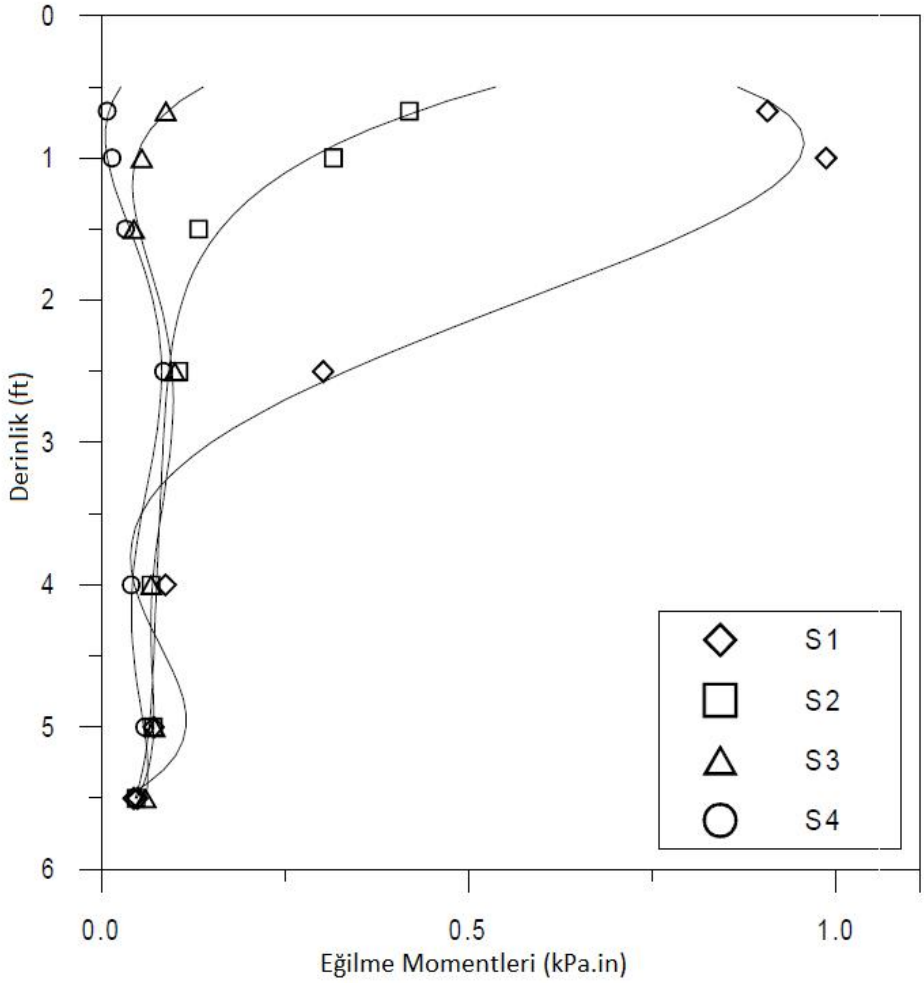
Meymand ve ark (2000), kohezyonlu zemine gömülü farklı üstyapı yüklerine sahip tekil kazıklarının davranışını incelemek amacıyla sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullanılan sarsma tablası, 6.1m x 6.1m boyutlarında ve 58ton kapasiteye sahiptir. Ayrıca 2.3m çapında ve 2.0m yüksekliğinde, dinamik deney koşullarına sahip silindirik bir deney kasası kullanılmıştır. Silindirik geometriye sahip deney kasası seçilmeden önce, farklı geometriye sahip deney kasaları sayısal olarak analiz edilmiş ve dinamik sınır koşullarını en iyi silindirik geometriye sahip deney kasasının temsil ettiğine karar vermişlerdir. Deneylerde, 50.8mm çapına ve 0.71mm et kalınlığına sahip 4 adet alüminyum boru kazık ve birim hacim ağırlığı 14.8kN/m^3 olan kohezyonlu zemin (%74 kaolinit, %24 bentonit, %4 uçucu kül) kullanılmıştır. Farklı üstyapı ağırlığının etkisini incelemek amacıyla, 4.5kg'dan 72.7kg'a değişen ağırlıklar (S1,

S2, S3 ve S4) kazık başlarına yerleştirilmiş ve kazık başları dönmeye, kazık uçları ise ötelenmeye izin verilmeyecek şekilde sabitlenmiştir (Şekil 2.7). Model, Loma Prieta depremi boyunca kaydedilen ve maksimum ivme değerinin 0.20g olduğu bir yer hareketine maruz bırakılmıştır.



Şekil 2.7. Farklı ağırlıklar altındaki tekil kazıklar (Meymand ve ark, 2000)

Sarsma tablası deney sonuçları incelendiğinde, daha büyük ağırlıklar etkisindeki S1, S2 ve S3 kazıklarında oluşan eğilme momentlerinde eylemsizlik etkileşiminin daha baskın olduğu, daha hafif ağırlık etkisindeki S4 kazığında oluşan eğilme momentlerinde ise kinematik etkileşimin daha baskın olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.8).

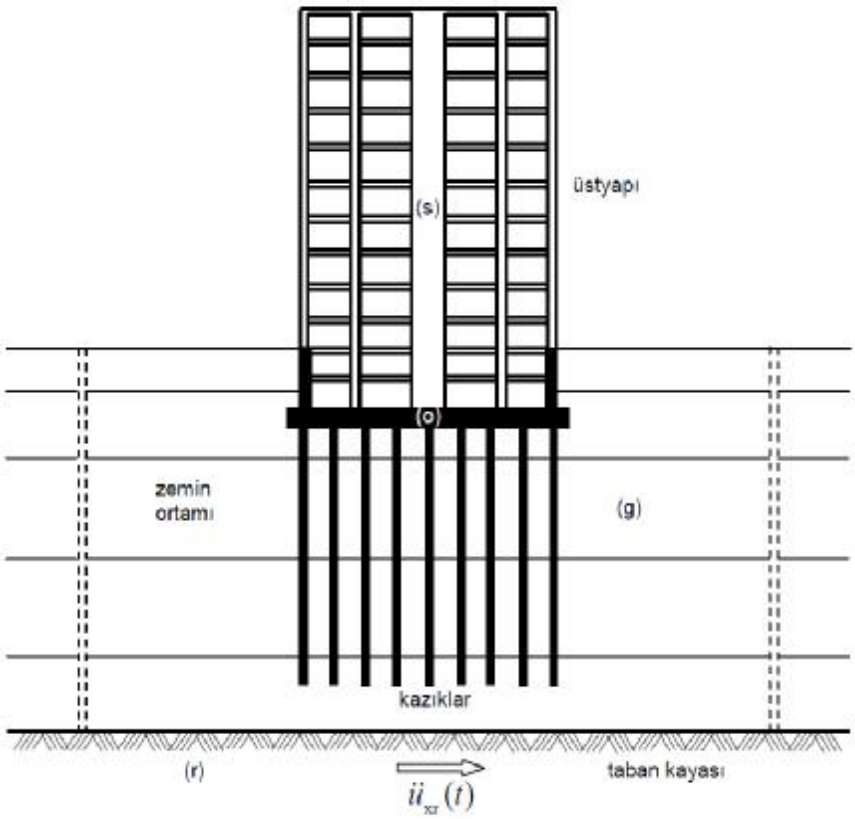


Şekil 2.8. Kazıklarda meydana gelen eğilme momentleri (Meymand ve ark, 2000)

Yapı-zemin etkileşimi genel olarak, deprem etkisi altında zemin ortamı ile üstyapının birlikte göz önüne alındığı ortak bir model çerçevesinde, yapı ve zeminin birbirlerini karşılıklı olarak etkilemesi şeklinde tanımlanırken, *"Direkt (Doğrudan) Yöntem"* ve *"Altsistem Yöntemi"* olmak üzere iki yöntem ile analiz edilebilmektedir. Üstyapı ile zeminin tek bir ortak sistem olarak sonlu eleman modeli ile idealleştirildiği ve taban kayasında tanımlanan depremin etkisi altında analiz edildiği yönteme *"Direkt (Doğrudan) Yöntem"*, kazıklarla birlikte zemin

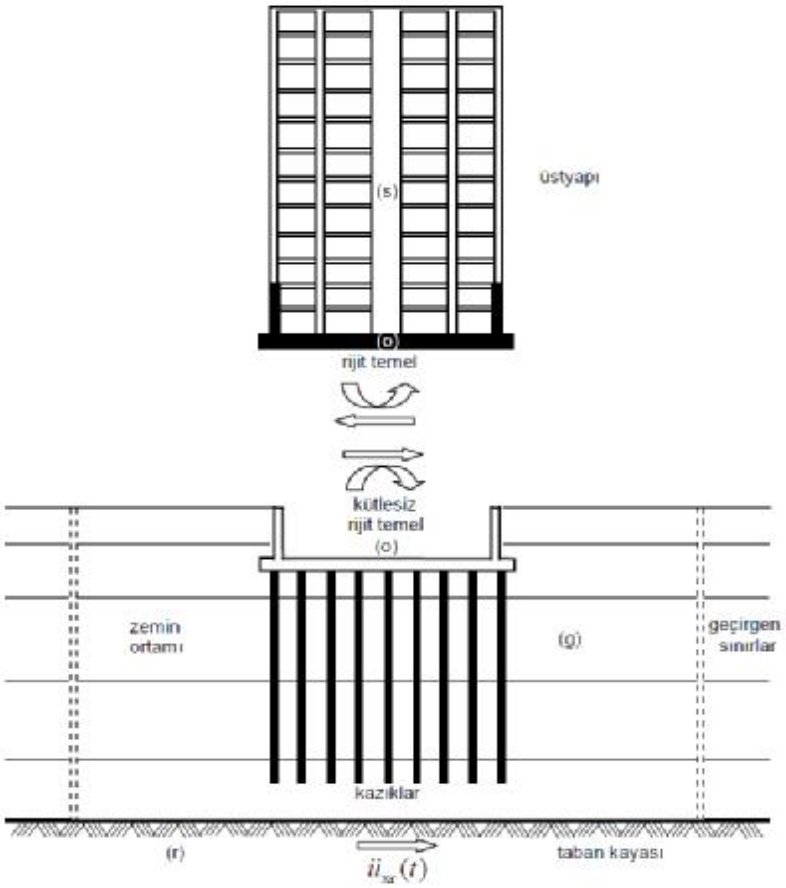
ortamı ve üstyapı ayrı ayrı birer altsistem olarak modellendiği yönteme ise *"Altsistem Yöntemi"* adı verilmektedir (Aydınoğlu, 2011).

Direkt (Doğrudan) Yöntem'de, kuvvetli yer hareketi altında gerek üstyapıda, gerekse zemin ortamında meydana gelebilecek nonlineer şekil değiştirmelerin üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman tanım alanında analizi ile doğrudan elde edilebilmesi olanağı teorik olarak mevcuttur. Fakat günümüzde her iki ortamdaki nonlineer özellikleri tam olarak temsil edebilecek ve deprem mühendisliği açsından pratik olarak kullanılabilecek yazılımlar mevcut olmadığından yapı-zemin nonlineer etkileşiminin pratik analizinde *Altsistem Yöntemi*'nin kullanılması önerilmektedir (Aydınoğlu, 2011).



Şekil 2.9. Direkt (Doğrudan) yöntem modeli (Aydınoğlu, 2011)

Altsistem Yöntemi'nde, kazıklarla birlikte zemin ortamı ve üstyapı ayrı ayrı birer altsistem olarak modellenir. Bu modelleme ile yapı-zemin etkileşiminin *"kinematik etkileşim"* ve *"eylemsizlik etkileşimi"* olmak üzere iki kısma ayrılması mümkün olmaktadır (Aydınoğlu, 2011).



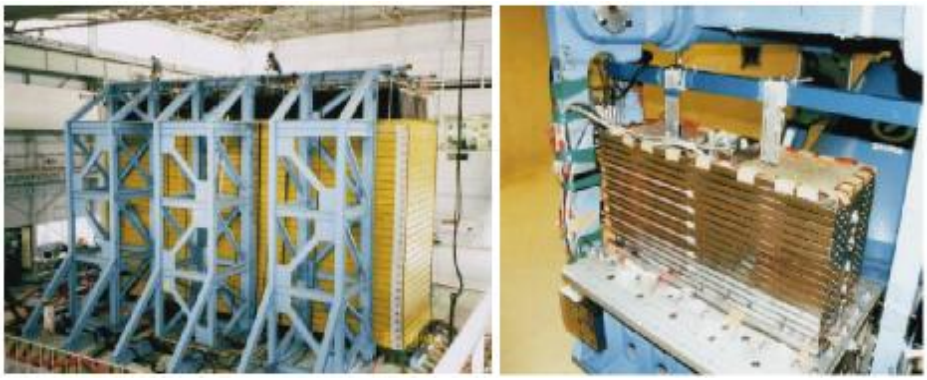
Şekil 2.10. Altsistem yöntemi modeli (Aydınoğlu, 2011)

Yapı-zemin etkileşiminin en güzel örneklerinden birisi olan kazıklı temellerin zamana bağlı yük etkisindeki davranışını, *"eylemsizlik etkileşimi"* ve *"kinematik etkileşim"* olmak üzere iki kısımda incelemek mümkündür. Eylemsizlik etkileşimi ile üstyapının titreşiminden kaynaklanan kuvvetlerin kazıklar üzerindeki

etkisi incelenebilirken, kinematik etkileşim ile zemin hareketinin kazıklar üzerindeki etkisi incelenebilmektedir. Fakat, kazıkların sismik tasarımı için kullanılan yaygın prosedür, eylemsizlik etkileşimidir ve genellikle kinematik etkileşim göz ardı edilmektedir. Bu yüzden, kazıklar üstyapının dinamik analizinden elde edilen eylemsizlik etkileşimine göre tasarlanmaktadır. Birçok araştırmacı bu yöntemi desteklerken, bazı araştırmacılar yaptıkları sarsma tablası deney sonuçlarına göre, kinematik etkileşimin ihmal edilmemesi gerektiğini göstermişlerdir. Zemin-yapı sisteminin doğal frekanslarının yakın olduğu frekanslar dışında, çünkü bu frekanslarda eylemsizlik etkileşimi oldukça büyüktür, kinematik etkileşim kazıklarda oluşabilecek kesme kuvvetlerini ve eğilme momentlerini ciddi bir şekilde artırabilmektedir. Ayrıca, farklı tabaka rijitliğine sahip zeminlere gömülü kazıklarda oluşabilecek momentlere, kinematik etkileşimin katkısı oldukça fazladır. Kazıkların rijitliği ve kazıklar arası mesafe (kazık gruplarında) kinematik etkileşimi etkileyen diğer faktörlerdir. Bu gibi durumlarda kinematik etkileşimi ihmal etmek, kazık başlarında oluşabilecek momentleri ihmal etmek anlamına gelebilmektedir (Ünsever, 2015).

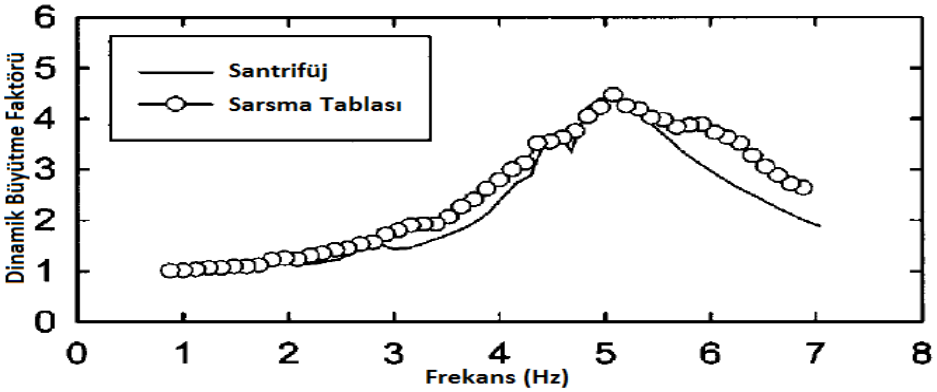
2.2.3. Kagawa ve ark (2004)

Kagawa ve ark (2004), kazıkların dinamik yük etkisindeki davranışını incelemek amacıyla büyük ölçekli sarsma tablası ve santrifüj deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Büyük ölçekli sarsma tablası ve santrifüj deneylerinde kullanılan sarsma tablaları sırasıyla 15m x 15m ve 0,95m x 0,65m boyutlarındadır. Deneylerde kullanılan kum zeminin sıkılığı %65 olup, çelik ve öngermeli beton malzemeye sahip kazıklar kullanılmıştır. Büyük ölçekli sarsma tablası deneylerinde kullanılan ve dinamik sınır koşullarına sahip deney kasası 11.0m x 3.5m x 6.0 (en x boy x yükseklik) boyutlarında iken, santrifüj deneylerinde kullanılan deney kasası ise 0.80m x 0.23m x0.41m (en x boy x yükseklik) boyutlarında tasarlanmıştır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Sarsma tablası ve santrifüj deney kasaları (Kagawa ve ark, 2004)

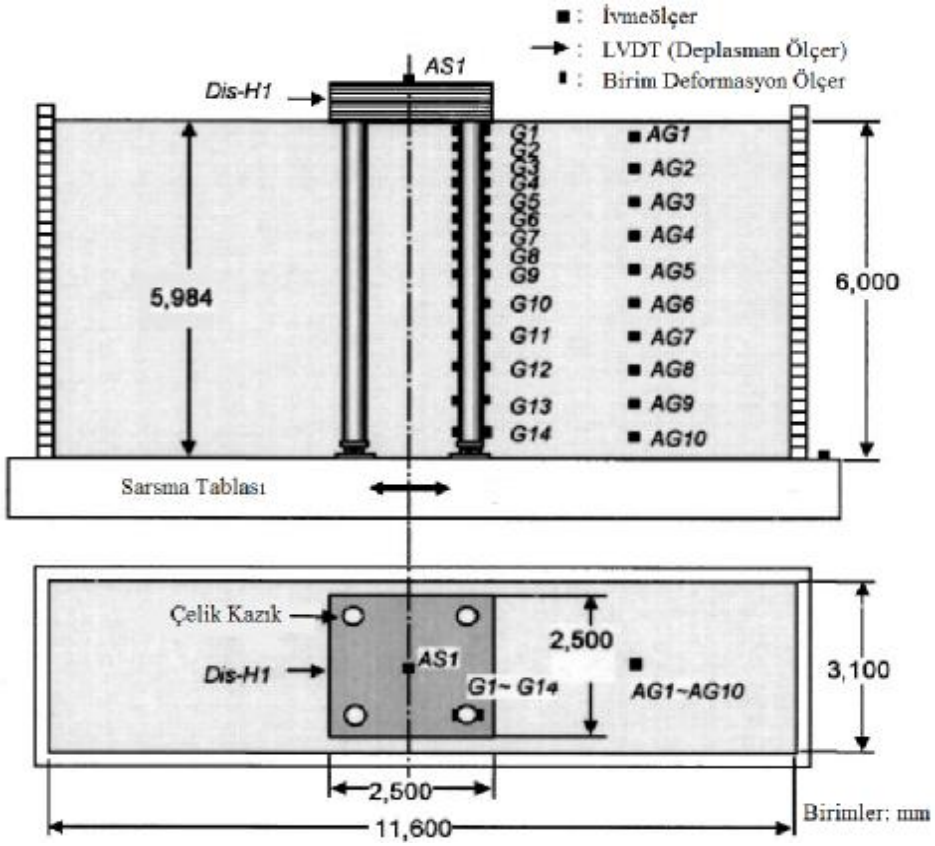
İlk olarak, zeminin dinamik yük etkisindeki davranışı kazık olmaksızın incelenmiştir. Deneylerde, iki farklı frekansa (3 ve 5 Hz) sahip sinüzoidal dinamik yük kullanılmıştır. Büyük ölçekli sarsma tablası ve santrifüj deneylerinden elde edilen bulgular karşılaştırıldığında sonuçların oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Zeminin farklı frekanslar için davranışı (Kagawa ve ark, 2004)

Dinamik büyütme faktörü, sarsma tablasına ve deney kasasına yerleştirilmiş ivmeölçerlerden alınan en büyük değerlerin oranlanması ile elde edilen boyutsuz bir ifadedir (Kagawa ve ark, 2004).

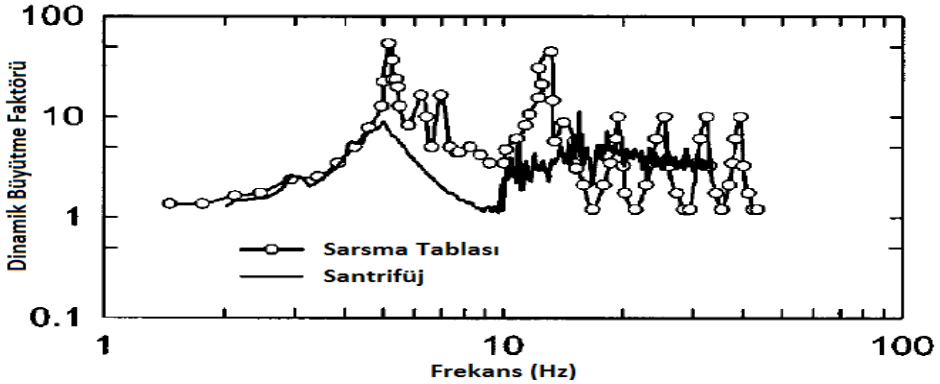
İkinci durumda, çelik malzemeden üretilmiş 4 adet kazık 2x2 yerleşim düzeninde deney kasalarına yerleştirilmiştir. Kazık uçları deney kasalarının tabanına tutturulup uç kazığı olarak çalışması sağlanırken, kazık başları da dönmeye karşı sabitlenmiştir. Ayrıca, kazık başlarına üstyapıyı temsil eden 15.6ton ağırlığında bir model yerleştirilmiştir. Grup etkisini minimize etmek için kazıklar arası mesafe 6D olarak belirlenmiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Büyük ölçekli sarsma tablası deney düzeneği (Kagawa ve ark, 2004)

İkinci durum için yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, kazıklarda meydana gelen en büyük zorlanmaların kazık başlarında oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca, santrifüj deneyinden elde edilen değerlerin büyük ölçekli sarsma

tablasından elde edilenlere nispeten daha küçük olmasına rağmen bu iki deneyin oldukça uyumlu olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.14).



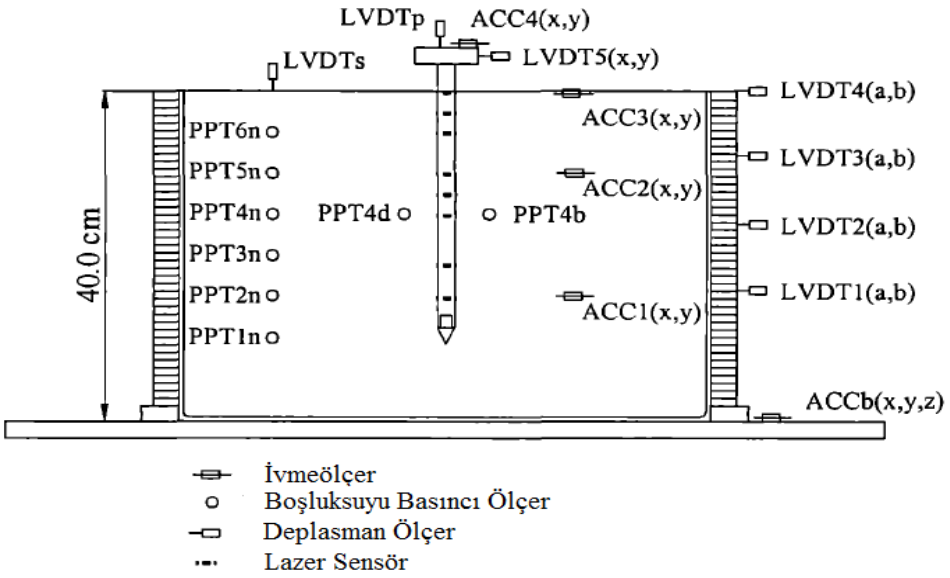
Şekil 2.14. Farklı frekanslar için deneylerin karşılaştırılması (Kagawa ve ark, 2004)

Üçüncü durumda ise, zeminin sıvılaşma durumu incelenmiştir. Bu amaçla, öngermeli beton malzemeden üretilmiş 4 adet kazık 2x2 düzeninde deney kasalarına yerleştirilmiştir. Kazık uçları deney kasalarının tabanına tutturulup uç kazığı olarak çalışması sağlanırken, kazık başları da dönmeye karşı sabitlenmiştir. Ayrıca, kazık başlarına üstyapıyı temsil eden 22.2ton ağırlığında bir model ve boşluk suyu basınçlarının ölçülebilmesi için zemin içerisine boşluk suyu basıncı ölçerler yerleştirilmiştir. Zeminde sıvılaşmanın olabilmesi ve kazıklarda büyük deplasmanların meydana gelebilmesi amacıyla, maksimum ivme değerinin 430cm/sn^2 olduğu, Hyogo-Ken Nanbu depreminde (1995) kaydedilen güçlü bir yer hareketi deneylerde kullanılmıştır. Deney kasaları, zemin yüzeyine kadar su ile doldurularak kum zeminin doygun hale getirilmesi sağlanmıştır.

Her iki deneyden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, üstyapıyı temsil eden modelin yatay hareketi büyük ölçekli sarsma tablası deneyinde 42mm iken, santrifüj deneyinde ise 48mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca, maksimum zorlanmalar büyük ölçekli sarsma tablası deneyinde kazık başına yakın kısımlarda oluşurken, santrifüj deneyinde ise kazık başlarında meydana gelmiştir.

2.2.4. Su ve Li (2006)

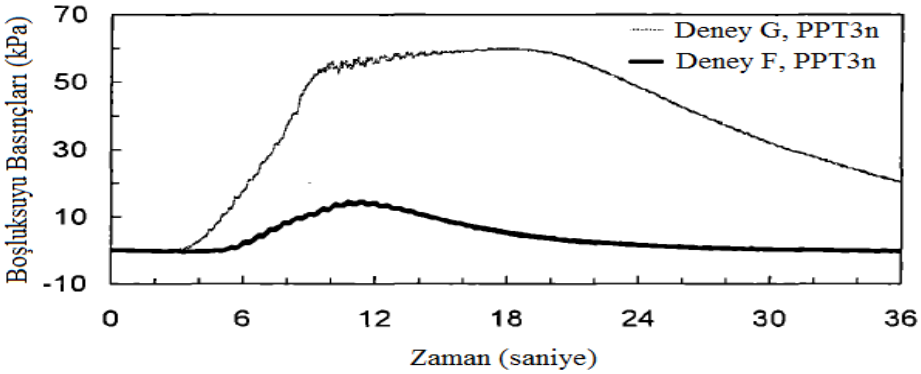
Su ve Li (2006), sıvılaşabilen zemine gömülü tekil bir kazığın faklı sarsma şiddeti etkisi altındaki davranışını incelemek amacıyla santrifüj deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Santrifüj deneylerinde, tek eksenli bir sarsma tablası ve sınır etkisini minimize eden laminar bir deney kasası kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kare en kesite sahip boru kazıklar, 1.9cm boyutlarında ve 3.2mm et kalınlığındadır. Üstyapının dinamik etkisini izole etmek için kazık başlarına yaklaşık 0.42kg ağırlığında yapısal rijit bir model yerleştirilmiştir. Üstyapı modelinin ağırlık merkezi, zemin yüzeyinden 4.2cm yukarıdadır. Ayrıca, kazık uçları deney kasasının tabanından yaklaşık 10cm (5D) yukarıdadır (Şekil 2.15).



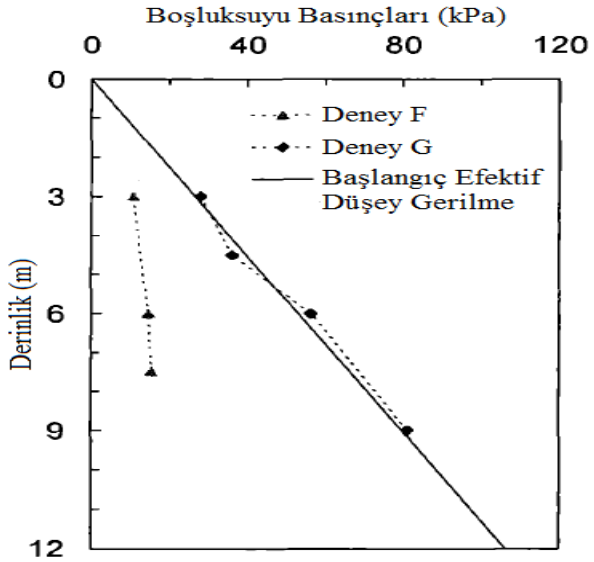
Şekil 2.15. Santrifüj deney kasası ve düzeneği (Su ve Li, 2006)

Sarsma işlemi, maksimum ivme değerleri 0.08g (Deney F) ve 0.47g (Deney G) olan iki farklı sinüzoidal dinamik yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, tekil bir kazığın faklı sarsma şiddeti etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, deney kasasının orta noktasındaki derinlik

için ölçülen boşluksuyu basınçlarının sarsma şiddetinden ciddi derecede etkilendiği gözlenmiştir. Çünkü G deneyi sonucu ortaya çıkan aşırı boşluksuyu basınçları F deneyine göre oldukça büyüktür (Şekil 2.16). Ayrıca, G deneyinde kum zemininin tamamen sıvılaştığı fakat F deneyinde ise bu durumun görülmediği belirtilmiştir (Şekil 2.17).

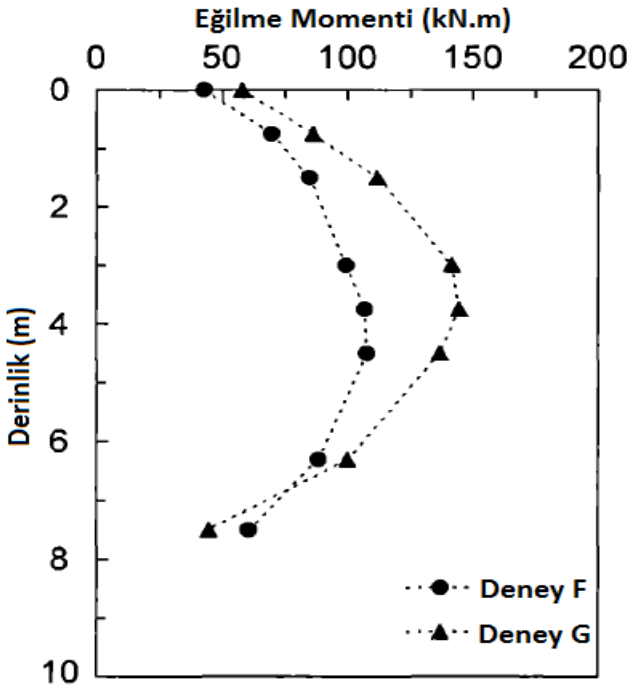


Şekil 2.16. Farklı sarsma şiddetleri için boşluksuyu basınçları (Su ve Li, 2006)



Şekil 2.17. Boşluksuyu basınçlarının derinlik ile değişimi (Su ve Li, 2006)

Her iki deney için kazıklarda oluşan maksimum eğilme momentleri incelendiğinde, G deneyinden elde edilen eğilme momentlerinin, F deneyinden elde edilenlere göre daha büyük olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.18). Bunun sonucunda, sarsma şiddetinin kazıkların davranışına ciddi şekilde etkisi olduğu belirtilmiştir.

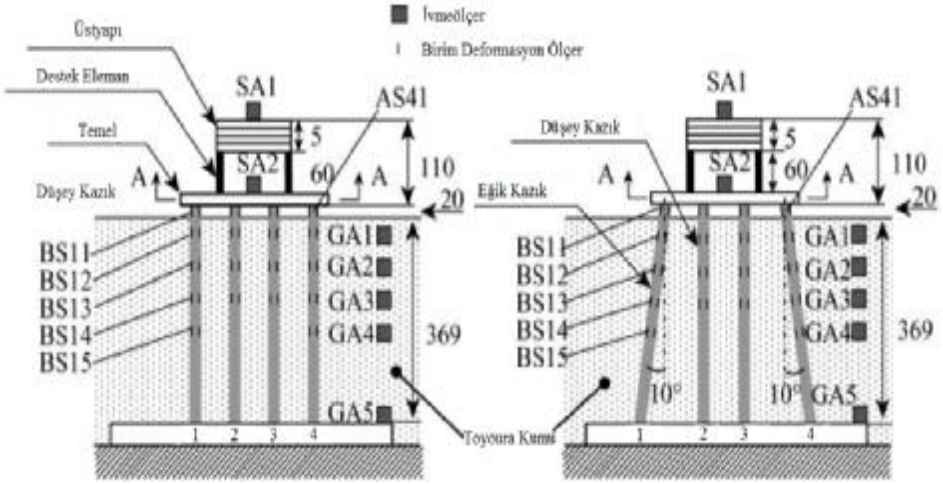


Şekil 2.18. Kazık boyunca oluşan eğilme momentleri (Su ve Li, 2006)

2.2.5. Zhang ve ark (2008)

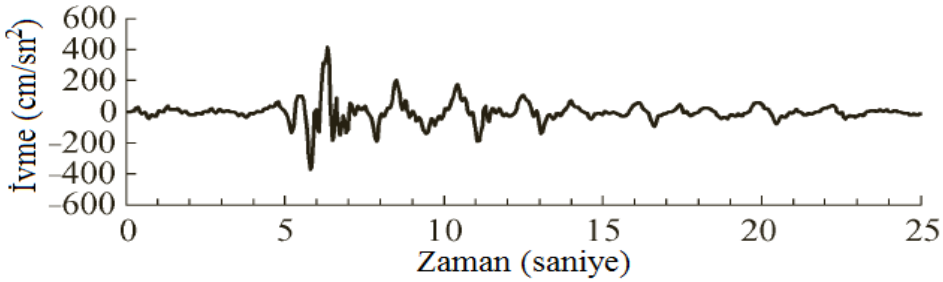
Zhang ve ark (2008), gevşek ve sıkı kum zemine gömülü grup kazıkların dinamik yük etkisindeki davranışını incelemek amacıyla santrifüj deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, 2x4 yerleşim düzenine sahip 8 adet kazık, farklı açılar ile zemine yerleştirilmiştir. Deney kasası 41cm x 33cm x 51cm boyutlarındadır. İlk durumda, bütün kazıklar düşey doğrultuda yerleştirilirken, ikinci durumda ise merkezde bulunan 4 adet kazık düşey doğrultuda, kenarlarda

bulunan 4 adet kazık ise düşey doğrultu ile 10° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.19).



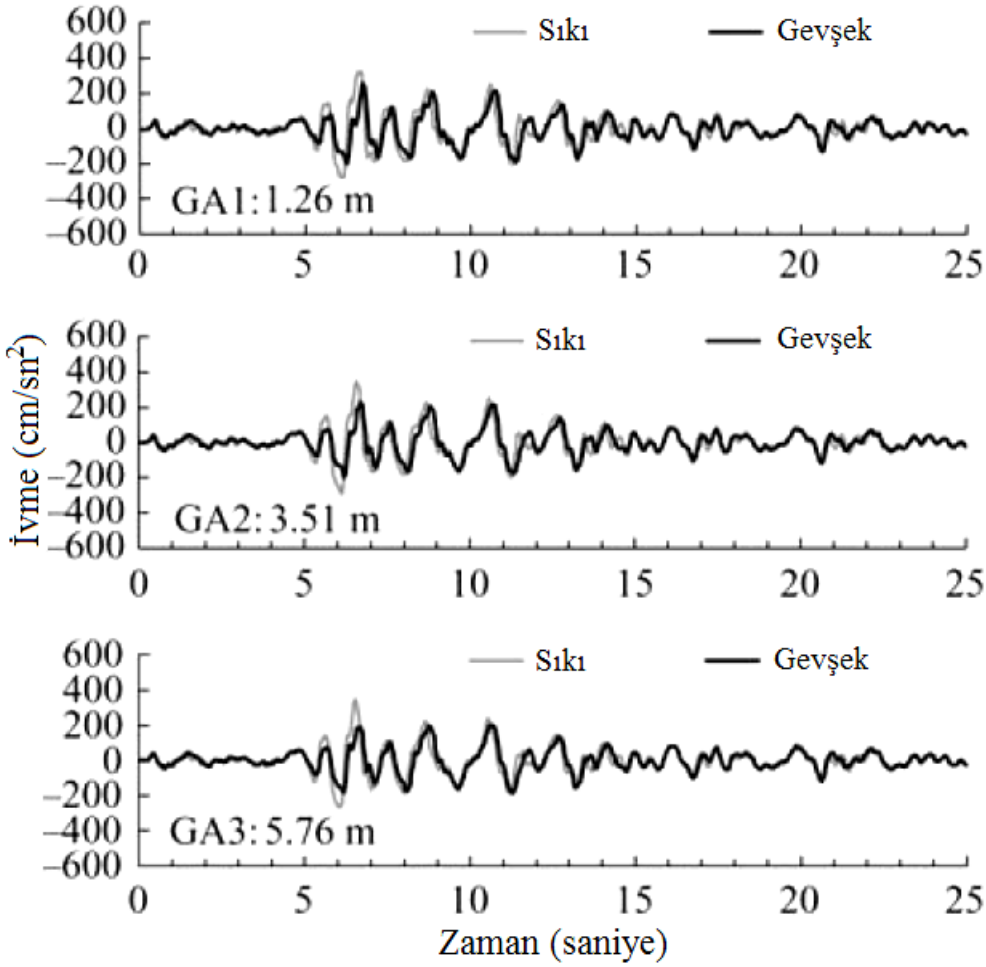
Şekil 2.19. Grup kazık santrifüj deneyi düzeneği (Zhang ve ark, 2008)

Model, 20mm çapa ve 1mm et kalınlığına sahip, kazıklar arası mesafenin 2.5D olduğu 8 adet alüminyum boru kazıklardan oluşmaktadır Ayrıca, üstyapıyı temsil etmesi amacıyla rijit çelik bir plaka kazık başlarına yerleştirilmiştir. Deneylerde, Hyogo-Ken Nanbu depremi (1995) boyunca kaydedilen bir yer hareketi kullanılmıştır (Şekil 2.20).



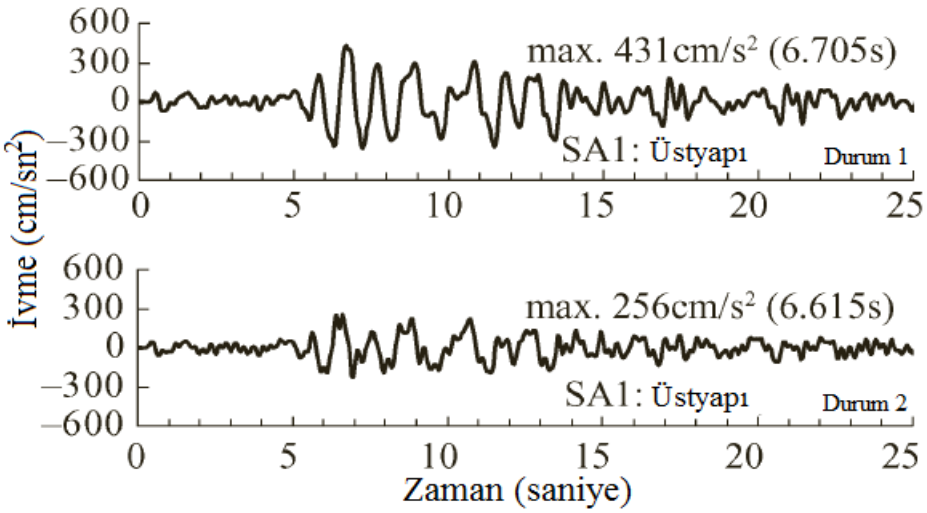
Şekil 2.20. Santrifüj deneylerde kullanılan deprem veri kaydı (Zhang ve ark, 2008)

Zemin sıkılığının yer hareketi üzerindeki etkisini incelemek için, kazık ve üstyapı gibi herhangi bir yapısal eleman olmadan, sıkı (%73) ve gevşek (%27) kum zemin koşullarında sarsma işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı derinliklerdeki ivmeölçerlerden elde edilen sonuçlara göre, sıkı kumda oluşan maksimum ivme değerinin gevşek kumda oluşan maksimum ivme değerinden büyük olduğu gözlenmiş ve zemin sıkılığının yer hareketi üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Farklı zemin koşulları için ivme değerleri (Zhang ve ark, 2008)

Gevşek kum zemin koşullarında farklı yerleşim düzenine sahip kazıkların davranışını incelemek amacıyla, bütün kazıkların düşey doğrultuda yerleştirildiği (Durum 1) ve merkezde bulunan 4 adet kazığın düşey doğrultuda, kenarlarda bulunan 4 adet kazığın ise düşey doğrultu ile 10° açı yapacak şekilde yerleştirildiği (Durum 2) durumlar için sarsma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, birinci durumda oluşan maksimum ivme değerinin ikinci durumda oluşan maksimum ivme değerinden fazla olduğu ve buna ek olarak, birinci durumda kazıklarda oluşan eğilme momentlerinin, ikinci durumda oluşan eğilme momentlerinden fazla olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.22).

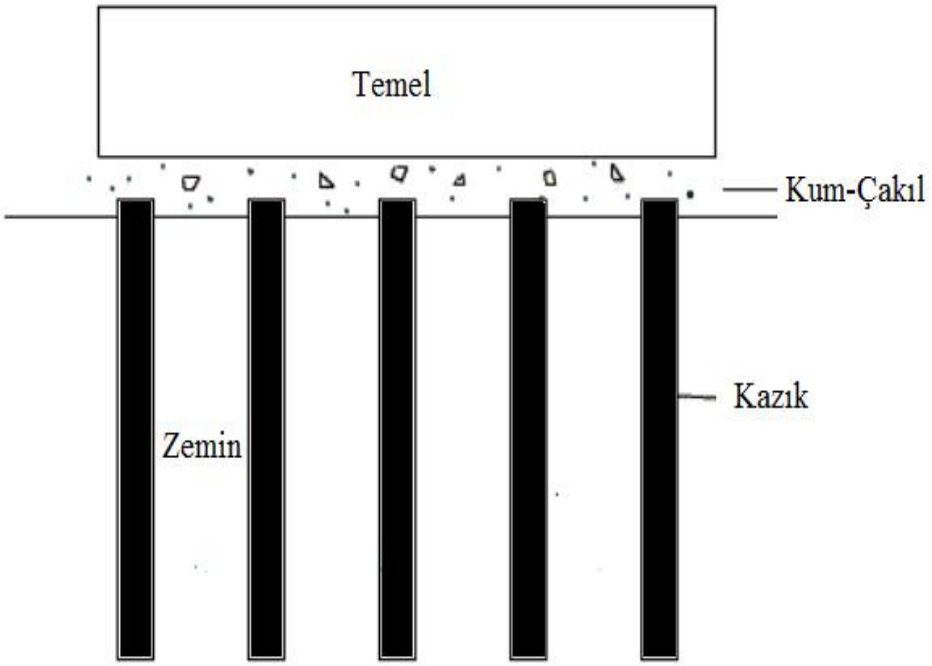


Şekil 2.22. Durum 1 ve 2 için ölçülen ivme değerleri (Zhang ve ark, 2008)

2.2.6. Song ve Wu (2009)

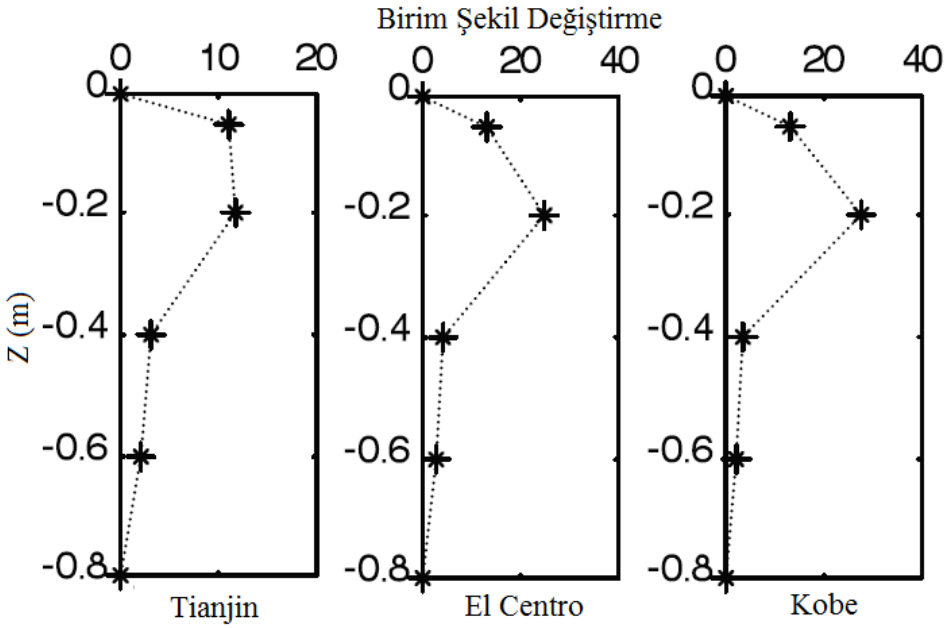
Song ve Wu (2009), siltli kil zemin koşullarında yer alan rijit kazıkların dinamik yük etkisindeki davranışını incelemek için sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, 1.5m çapında ve 1.5m yüksekliğinde sönümleyici sınırlara sahip deney kasası kullanılmıştır. Kazıklar ve temel arasına granüler bir malzeme (kum-çakıl) yastık vazifesi görmesi amacıyla yerleştirilmiştir (Şekil 2.23). Bu sayede, temel ile kazık başları arasına yerleştirilen bu kompozit

malzemenin kazıkların dinamik davranışına olan katkısını incelemeyi hedeflemişlerdir.



Şekil 2.23. Temel, kazık ve kompozit malzeme (Song ve Wu, 2009)

Sarsma işlemi, Tianjin, El Centro ve Kobe depremlerinde kaydedilen ve maksimum ivme değeri 0.25g olduğu üç farklı yer hareketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, kazık başlarında meydana gelen eğilme şekil değiştirmesi, granüler malzemenin varlığından dolayı sıfırdır. Dolayısıyla, bu granüler malzemenin kazık başlarında oluşan eğilme şekil değiştirmesini azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca, maksimum eğilme şekil değiştirmesinin kazık başlarından yaklaşık 20cm aşağıda oluştuğu ve kazıklarda herhangi bir deformasyon oluşmadığı gözlenmiştir (Şekil 2.24).



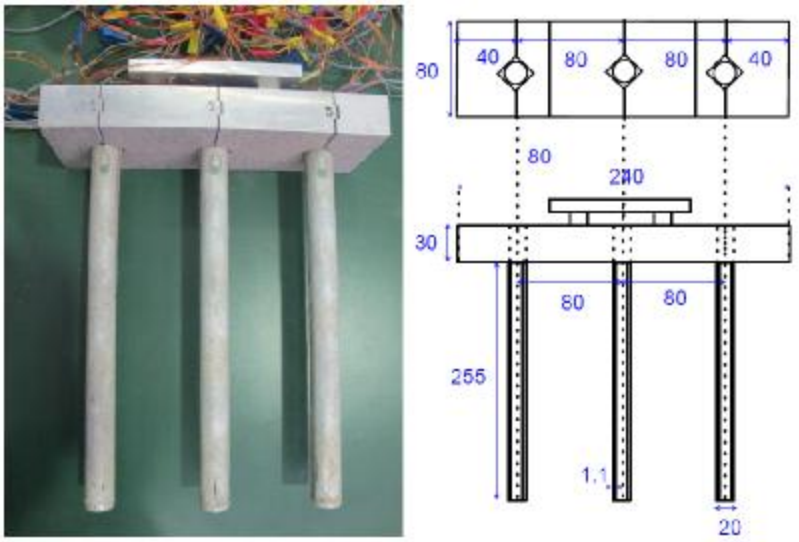
Şekil 2.24. Kazık boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler (Song ve Wu, 2009)

Yer hareketi şiddetinin kazıklar üzerindeki etkisini incelemek için, maksimum ivme değerinin 0.5g olduğu bir yer hareketi deneylerde kullanılmıştır. Bu deney sonucunda, temel ve çevresindeki kompozit malzemede küçük ayrışmaların olduğu fakat kazıklarda herhangi bir deformasyonun oluşmadığı gözlenmiştir.

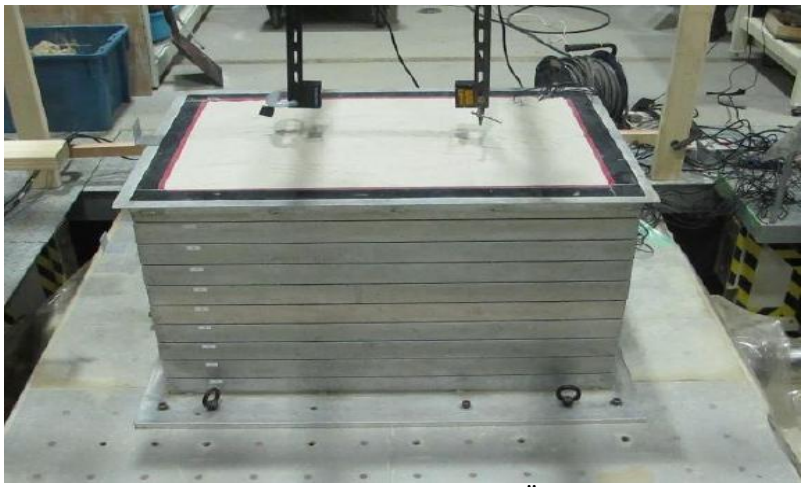
2.2.7. Ünsever (2015)

Ünsever (2015), 3x1 yerleşim düzenine sahip sabit eksenel yük etkisindeki kazık grubunun radyeli (PR) ve radyesiz (PG) durumdaki davranışını incelemek için bir dizi sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneylerde kullanılan boru kazıkların dış çapları 20mm iken, et kalınlıkları 1.1mm'dir. Kazıklar arası mesafe 80mm olarak belirlenmiş olup bu değer kazık çapının 4 katına (4D) karşılık gelmektedir (Şekil 2.25). Ayrıca, dinamik sınırlara (kaynaktan yayılan dalgaların sınırlara çarpıp tekrar yansımasını önleyen sınırlar) sahip, 530mm derinliğinde

800mm ve 500mm boyutlarındaki deney kasası için, 5 ton kapasiteye sahip 1.5m x 1.0m boyutundaki sarsma tablası kullanılmıştır (Şekil 2.26). Deneyler %70 sıkılığa sahip kuru kum koşullarında gerçekleştirilmiştir.

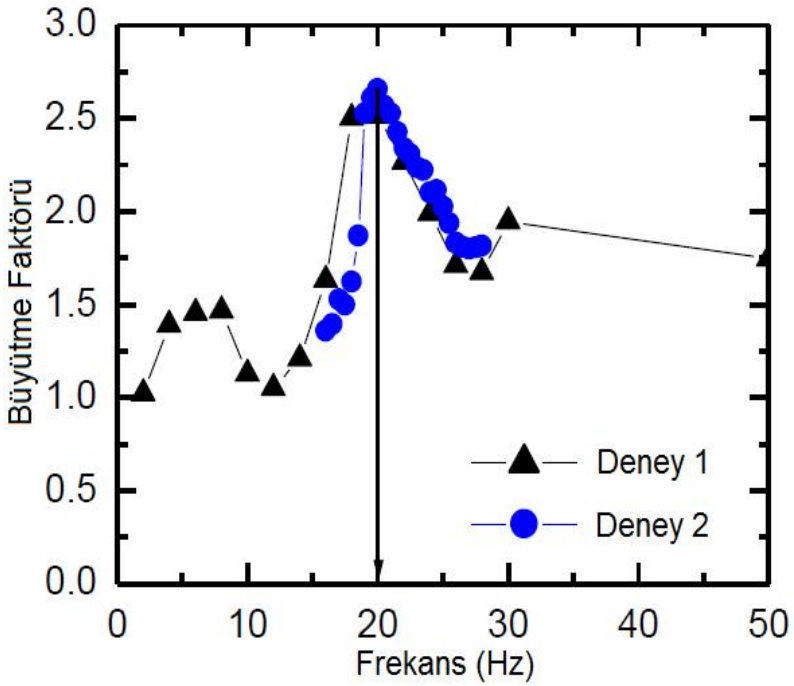


Şekil 2.25. Deneylerde kullanılan kazık grubu ve radye temel (Ünsever, 2015)



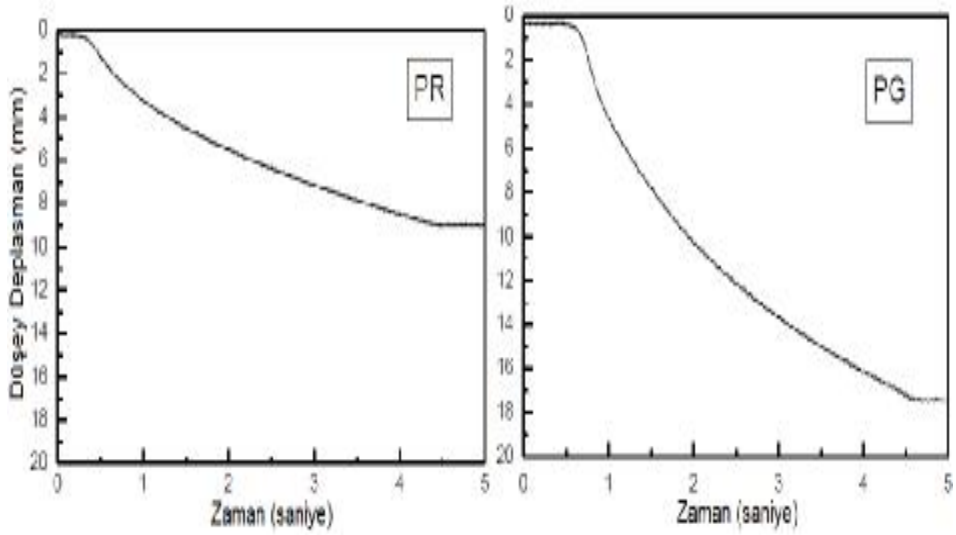
Şekil 2.26. Sarsma tablası ve laminar deney kasası (Ünsever, 2015)

Deney süresince, verileri toplamak için gerekli ivmeölçerler (12 adet) ve deplasman ölçerler (4 adet) zemin içerisinde muhtelif noktalara yerleştirilmiştir. Dinamik yük olarak, frekansının 20 Hz olduğu sinüzoidal bir dalga kullanılmıştır. Bu frekans değeri aynı zamanda zeminin rezonans frekansı (en büyük deplasmanların ve gerilmelerin oluştuğu frekans değeri) olup bu değere herhangi yapısal bir eleman olmaksızın gerçekleştirilen deneyler sonucunda ulaşılmıştır (Şekil 2.27).



Şekil 2.27. Zeminin rezonans frekansı (Ünsever, 2015)

Her iki durum için (radyeli ve radyesiz) gerçekleştirilen sarsma işlemi sonucunda, radyeli durumda düşey yönde ölçülen toplam oturma yaklaşık 9mm iken, radyesiz durumda bu değer yaklaşık 17mm olarak belirlenmiştir (Şekil 2.28). Bu sonuçlara göre, radyenin kazıklarda meydana gelen oturmaları ciddi şekilde azalttığı ifade edilmiştir.



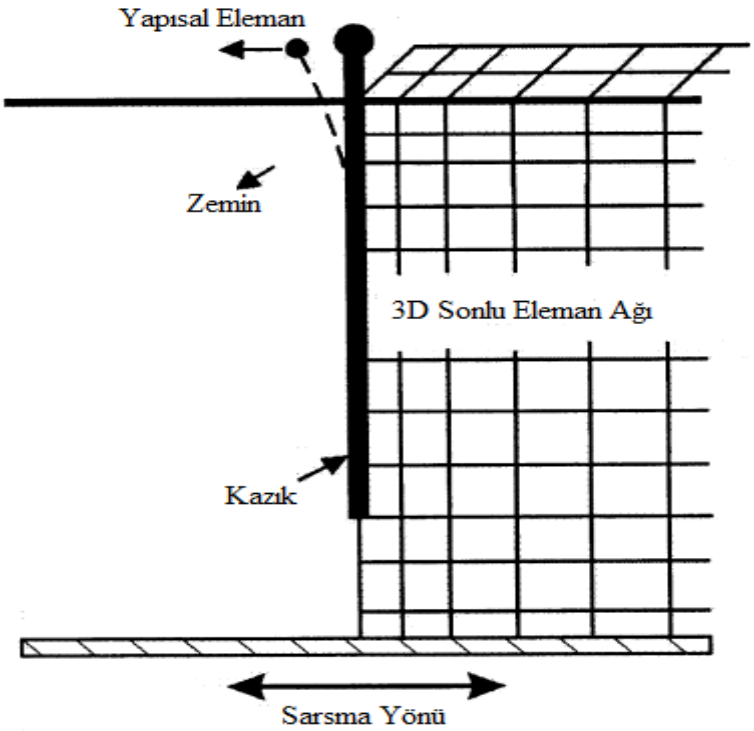
Şekil 2.28. Radyeli ve radyesiz durumdaki düşey deplasmanlar (Ünsever, 2015)

2.3. Sayısal Çalışmalar

Kazıkların dinamik yük etkisindeki davranışını incelemek amacıyla başvurulan yöntemlerden birisi de sayısal çalışmalardır. Bu çalışmalarda, arazi ve laboratuvar koşullarını bilgisayar ortamında bire bir olarak modelleyebilen yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yazılımlar, farklı yöntemleri kullanarak çözüm üretebilseler de en yaygın kullanıma sahip yazılımlar genellikle sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadırlar. Literatürde, yanal veya düşey dinamik yük etkisindeki kazıkların davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiş sonlu elemanlar yöntemini kullanan önemli sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Farklı zemin koşullarının dikkate alındığı bu çalışmalardan aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

2.3.1. Finn ve Fujita (2002)

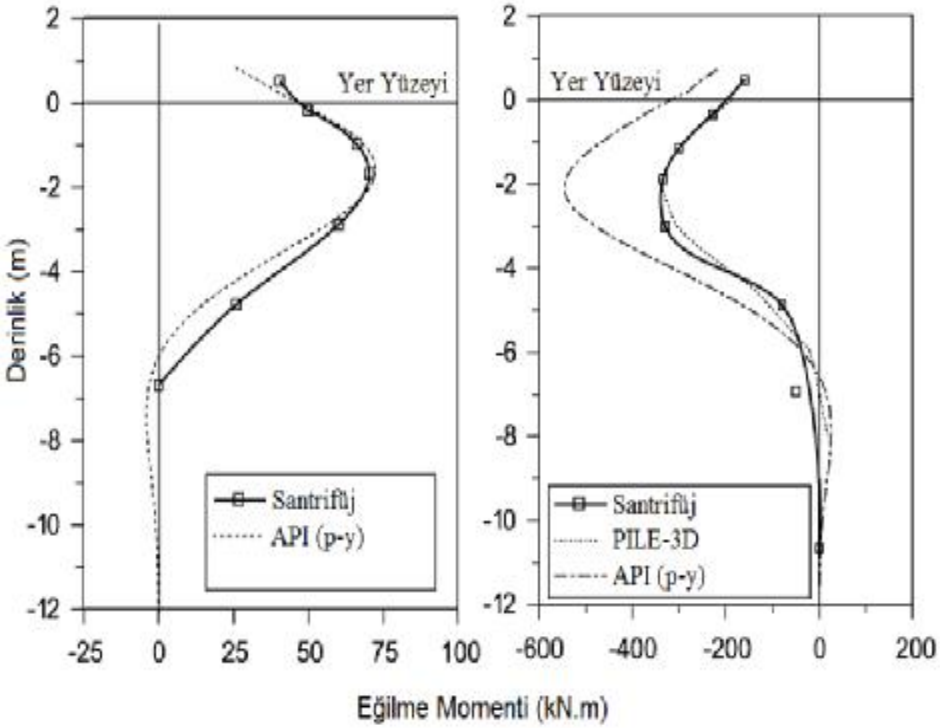
Finn ve Fujita (2002), kum zemin koşullarında yer alan tekil bir kazığın dinamik yük etkisindeki davranışını sonlu elemanlar yöntemine dayanan PILE-3D programını kullanarak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi için oluşturulan model Şekil 2.29'da gösterilmiştir.



Şekil 2.29. PILE-3D sonlu elemanlar ağı (Finn ve Fujita, 2002)

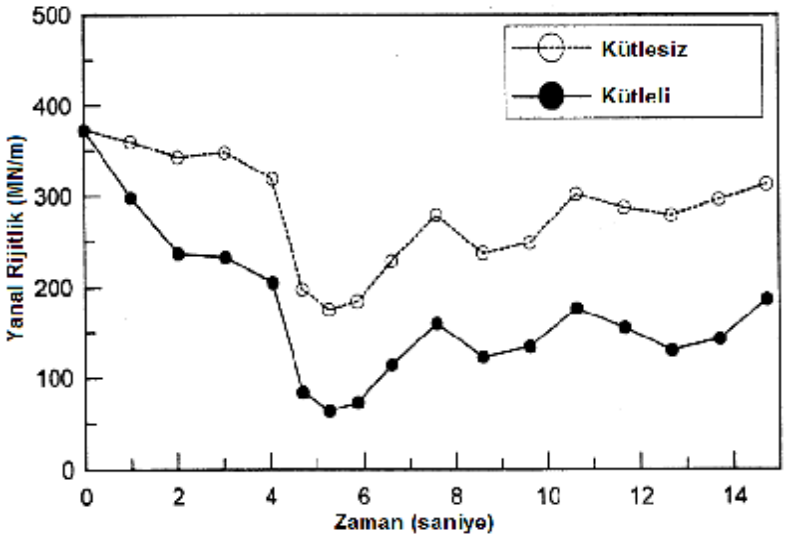
Sonlu elemanlar yönteminin geçerliliğini değerlendirmek amacıyla PILE-3D programı ile yapılan analizlerin sonuçları, Finn ve Gohl (1987) tarafından gerçekleştirilmiş santrifüj deneyinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak, teorik bir yöntem olan API (p-y) eğrileri ile elde edilen sonuçlar da bu iki yönteme göre yorumlanmıştır. Zayıf yer hareketi etkisi altında, API (p-y) eğrileri yöntemi ile elde edilen eğilme momenti değerlerinin santrifüj deneyinden elde edilen eğilme momenti değerleriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Fakat güçlü yer hareketi etkisi altında, böyle bir uyum gözlenememiş ve maksimum eğilme momentinin API (p-y) eğrileri yönteminde yaklaşık iki kat daha fazla olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, bu yöntemin güçlü yer hareketi etkisi altında yeterince iyi sonuçlar vermediği gözlenmiştir. Buna karşın, hem zayıf hem de güçlü yer hareketi etkisi altında sonlu elemanlar yönteminden elde edilen eğilme

momentlerinin santrifüj deneyinden elde edilen eğilme momentleriyle gayet uyumlu olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30. Eğilme momentlerinin derinlik ile değişimi (Finn ve Fujita, 2002)

Üstyapının, kazıkların dinamik davranışı üzerindeki etkisini incelemek için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, bir durumda kazık başlarında üstyapıyı temsil eden bir kütle bulunurken, diğer durumda ise kazıklar kütlesiz olarak modellenmiştir. Güçlü yer hareketi etkisi altında gerçekleştirilen analiz sonuçları incelendiğinde, üstyapı kütlesinin kazık başlarının yanal rijitliğini önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir (Şekil 2.31).



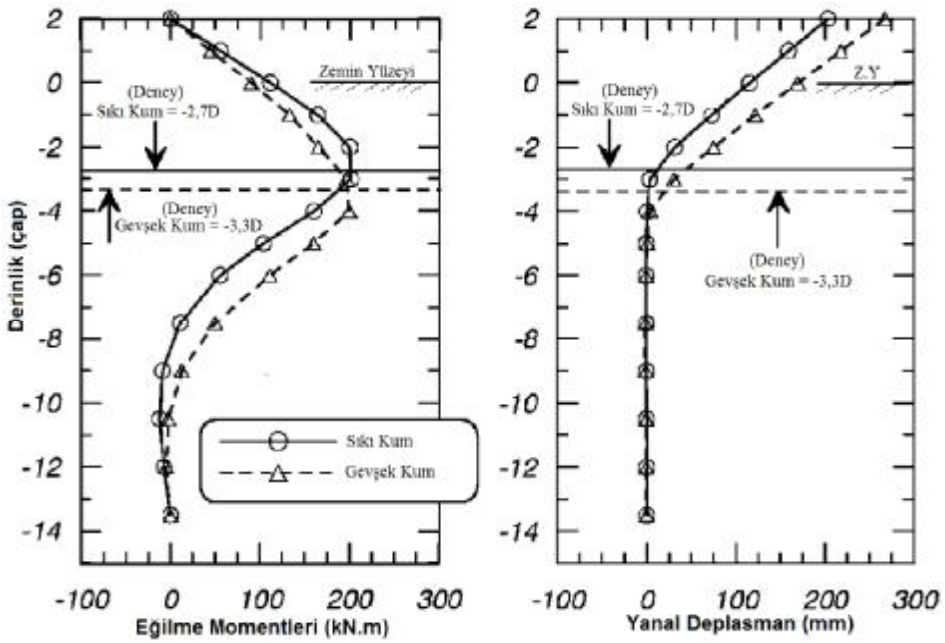
Şekil 2.31. Kütleli ve kütlesiz tekil bir kazığın yanal rijitliği (Finn ve Fujita, 2002)

2.3. 2. Hutchinson ve ark (2005)

Hutchinson ve ark. (2005), kuru kum zemin koşullarında yer alan tekil bir kazığın yanal tekrarlı yük etkisindeki davranışını sonlu elemanlar yöntemine dayanan FEDEAS programını kullanarak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yönteminin geçerliliğini değerlendirmek amacıyla, Chai ve Hutchinson (2002) tarafından gerçekleştirilmiş tam ölçekli bir deneyden elde edilen yük-deformasyon verileri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde, 406mm çapa sahip tekil bir kazığın davranışı gevşek (%37-38) ve sıkı (%42-44) kum zemin koşulları altında incelenmiştir. Ayrıca, kazık başının zemin yüzeyinden 2D ve 6D mesafe yukarıda olacak şekilde konumlandırıldığı durumlarda kazıkta oluşan eğilme momentleri ve yanal deplasmanlar araştırılmıştır.

Kazık başının zemin yüzeyinden 2D mesafe yukarıda olduğu sıkı kum zemin koşullarında, sonlu elemanlar analizinden elde edilen maksimum yanal kuvvetin, tam ölçekli deneyden elde edilen maksimum yanal kuvvetten %2 daha düşük, gevşek kum zemin koşullarında ise bu değerin %20 daha düşük olduğu görülmüştür. Kazık başının zemin yüzeyinden 6D mesafe yukarıda olduğu sıkı ve

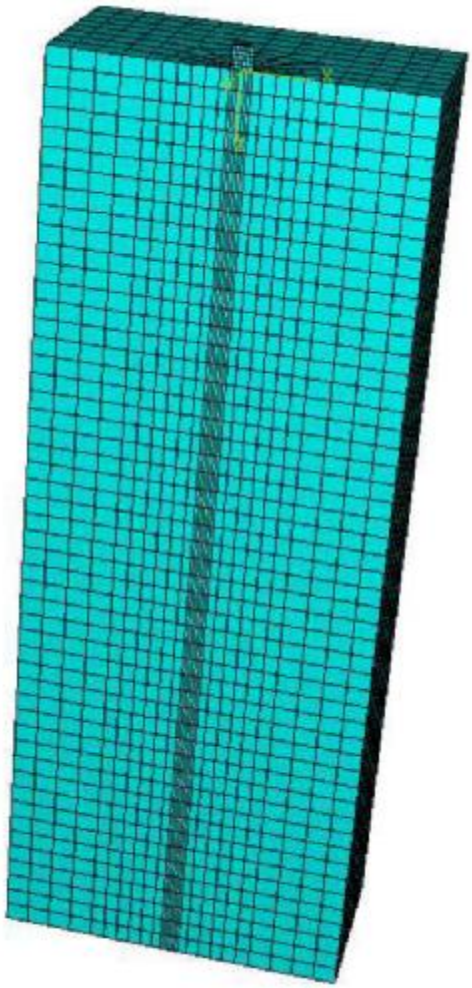
gevşek kum zemin koşullarında ise sonlu elemanlar analizinden elde edilen maksimum yanal kuvvetin, tam ölçekli deneyden elde edilen maksimum yanal kuvvetten %3 daha düşük olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışmalar sonucunda, özellikle kazık başının zemin yüzeyinden çok uzakta olduğu kazıklarda zemin sıkılığının kazıklarda oluşan maksimum yanal kuvvet üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Kazıklarda oluşan maksimum eğilme momentleri ve yanal deplasmanları incelemek amacıyla gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerine göre, kazık başının zemin yüzeyinden 2D mesafe yukarıda olduğu durumlarda maksimum eğilme momenti sıkı kumda 3D derinlikte oluşurken, gevşek kumda ise 4D derinlikte oluşmuştur. Buna karşın, tam ölçekli deneylere göre maksimum eğilme momentinin sıkı kumda 2.7D derinlikte, gevşek kumda ise 3.3D derinlikte oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 2.32). Sonuç olarak, sonlu elemanlar yönteminin deneysel çalışmalar ile oldukça uyumlu olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.32. 2D mesafe için eğilme momenti - deplasman (Hutchinson ve ark, 2005)

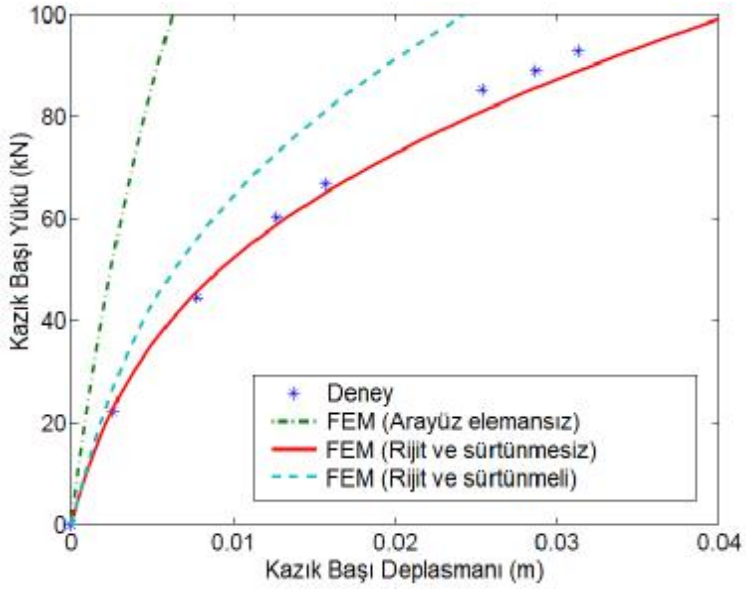
2.3.3. Ramachandran (2005)

Ramachandran (2005), dinamik yanal yük etkisindeki tekil bir kazığın davranışını incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemine dayanan üç boyutlu ABAQUS programını kullanmıştır. Sonlu elemanlar modelinin simetrik olmasından dolayı modelin yalnızca yarısı dikkate alınmış ve tekil bir kazığın analizi için üretilen ağ Şekil 2.332de gösterilmiştir.



Şekil 2.33. Tekil kazığın üç boyutlu sonlu elemanlar modeli (Ramachandran, 2005)

Zeminin nonliner davranışını iyi bir şekilde yansıtabilmek için aşırı konsolide kilden oluşan zemin Mohr-Coulomb malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Modelde yer alan kazık eleman ise lineer elastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, yanal dinamik yük etkisindeki tekil bir kazığın zemin ile arasındaki etkileşimi incelemek için üç farklı ara yüz elemanı tanımlanmış ve sonlu elemanlar yönteminden elde edilen analiz sonuçları bu amaçla gerçekleştirilmiş deneysel bir çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kazık ve kil zemin arasına birinci durumda, ara yüz eleman tanımlanmamış ve bu durum için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, ara yüz eleman olmaksızın kazık davranışı incelenmiştir. İkinci durumda rijit ve sürtünmesiz, üçüncü durumda ise rijit ve sürtünmeli bir ara yüz eleman tanımlanmıştır.



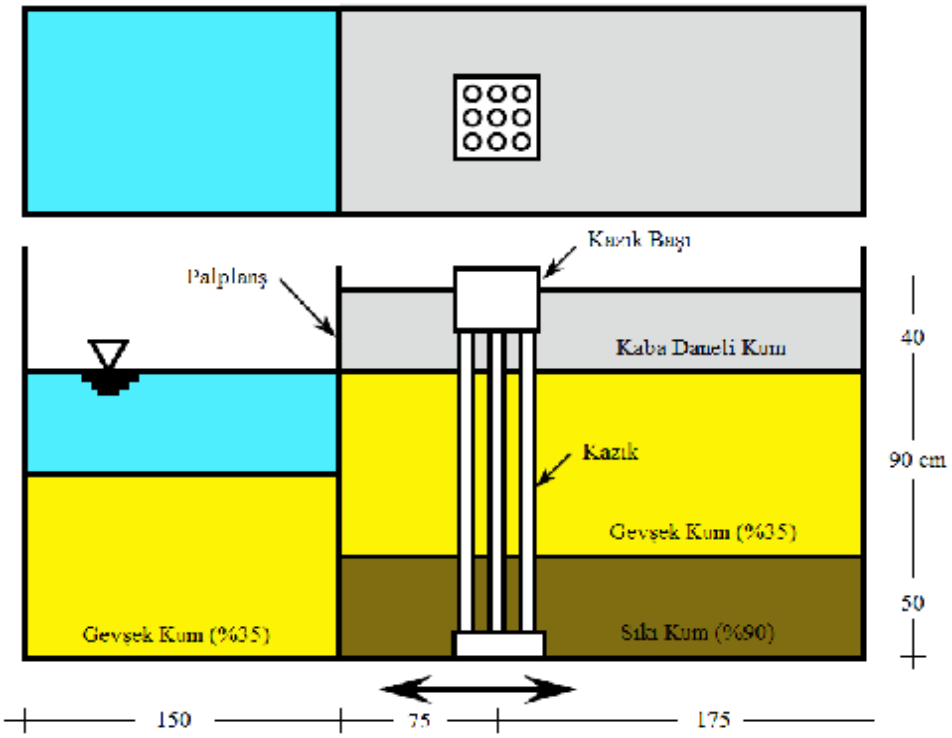
Şekil 2.34. Tekil bir kazığın farklı ara yüzler için davranışı (Ramachandran, 2005)

Sonlu elemanlar yönteminin sonuçları incelendiğinde, ikinci durumda yani kazık ile zemin arasında rijit ve sürtünmesiz ara yüz elemanın tanımlandığı durumda elde edilen sonuçların deneysel çalışmanın sonuçlarıyla oldukça uyumlu

olduğu belirtilmiştir. Ara yüz elemanın tanımlanmadığı durumda elde edilen uyumun zayıf, rijit ve sürtünmeli ara yüz elemanın tanımlandığı durumda ise nispeten daha iyi bir uyumun olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.34).

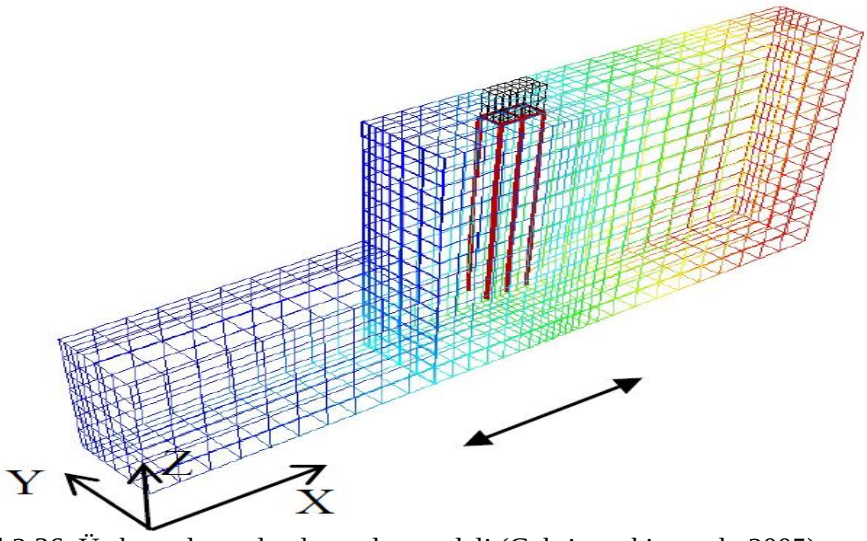
2.3.4. Cubrinovski ve ark (2005)

Cubrinovski ve ark (2005), doygun kum zemin koşullarında yer alan yanal yayılı yüke maruz kazıkların davranışını incelemek için sarsma tablası deneyleri ve üç boyutlu sayısal analizler (Diana-J3) gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, deney ve sayısal çalışma sonuçlarını karşılaştırarak üç boyutlu sayısal çözümün doğruluğunu ve yeterliliğini değerlendirmeyi hedeflemişlerdir. Sarsma tablası deneyi için hazırlanan düzenek Şekil 2.35'de gösterilmiştir.



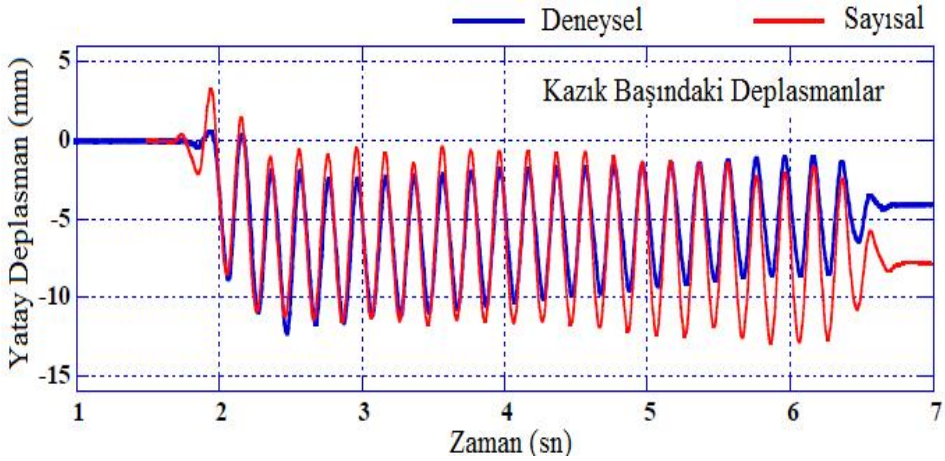
Şekil 2.35. Sarsma tablası deney düzeneği (Cubrinovski ve ark, 2005)

Paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş 9 adet kazık 3x3 yerleşim düzenine ve 2.5D kazıklar arası mesafeye sahip olup, kazıkların her biri 145cm boyunda ve 5.08cm çapındadır. Kazık uçları deney kasasının tabanına sabitlenirken, kazık başlarına ise 21.6kg ağırlığında rijit bir kütle yerleştirilmiştir. Zemin profili, kaba daneli kum, gevşek kum (%35) ve sıkı kum (%90) olmak üzere üç tabakadan oluşmaktadır. Ayrıca, 6mm kalınlığındaki rijit bir plaka (palplanş) yanal yönde harekete serbest olacak şekilde deney kasasına yerleştirilmiştir. Maksimum ivme değerinin 430cm/sn^2, frekansının ise 5 Hz olduğu bir hareket, sarsma tablasının yatay hareketi olarak belirlenmiştir. Deney sırasında, zeminin ve kazıkların davranışını ölçebilmek için gerekli çok sayıda ivmeölçerler ve deplasman ölçerler kullanılmıştır. Analizlerde, kum zeminin davranışının iyi bir şekilde temsil edebilmesi için Stress-Density zemin modeli kullanılırken, kazıkların ve palplanşın davranışı elastik sınır içerisinde kaldığı için bu elemanlara lineer elastik malzeme modeli atanmıştır. Sonlu elemanlar modelinin simetrik olmasından dolayı modelin yalnızca yarısı dikkate alınmış ve 3x3 yerleşim düzenine sahip kazıkların analizi için üretilen ağ Şekil 2.36'da gösterilmiştir.



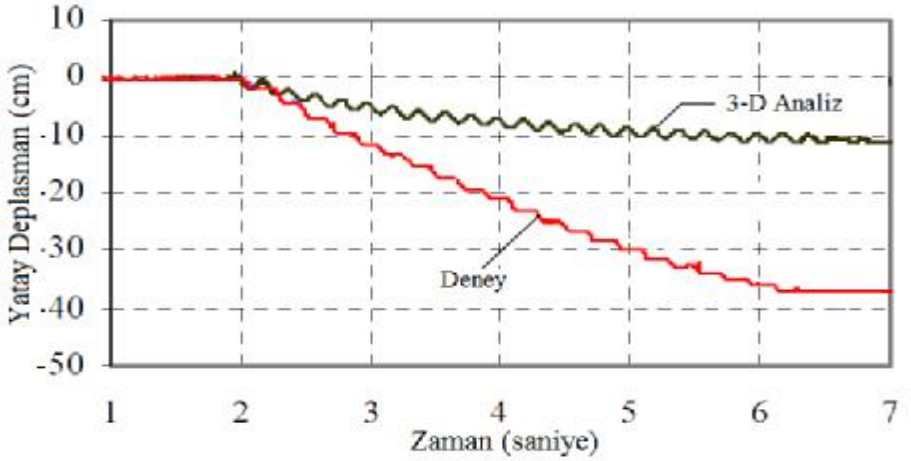
Şekil 2.36. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli (Cubrinovski ve ark, 2005)

Sarsma tablası deneyi ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçları incelendiğinde, kazık başlarında yer alan kütlenin maksimum yatay hareketi deneysel çalışma sonucunda 12.3mm olarak bulunurken, sayısal çalışma sonucunda ise bu değer 11.4mm olarak bulunmuştur. Deneysel çalışma ile sayısal çalışma arasındaki bu uyumun sarsma işleminin yaklaşık dördüncü saniyesine kadar devam ettiği fakat sarsma işleminin sonuna doğru azaldığı belirtilmiştir (Şekil 2.37).

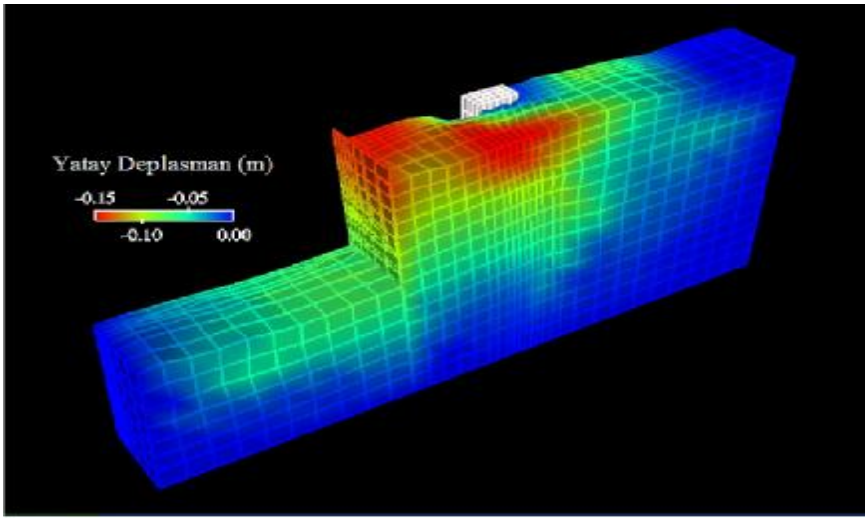


Şekil 2.37. Kazık başında oluşan yatay deplasmanlar (Cubrinovski ve ark, 2005)

Palplanş elemanda oluşan maksimum yatay deplasman deneysel çalışma sonucunda 38cm olarak bulunurken, sayısal çalışma (sonlu elemanlar yöntemi) sonucunda ise bu değer yaklaşık 12cm olarak bulunmuştur. Kazık davranışını değerlendirmede elde edilen uyumun palplanş eleman için geçerli olmadığı belirtilmiştir (Şekil 2.38). Ayrıca, analiz sonucunda deforme olmuş üç boyutlu sonlu elemanlar ağı Şekil 2.39'da gösterilmiştir.



Şekil 2.38. Palplanş başında oluşan yatay deplasmanlar (Cubrinovski ve ark, 2005)



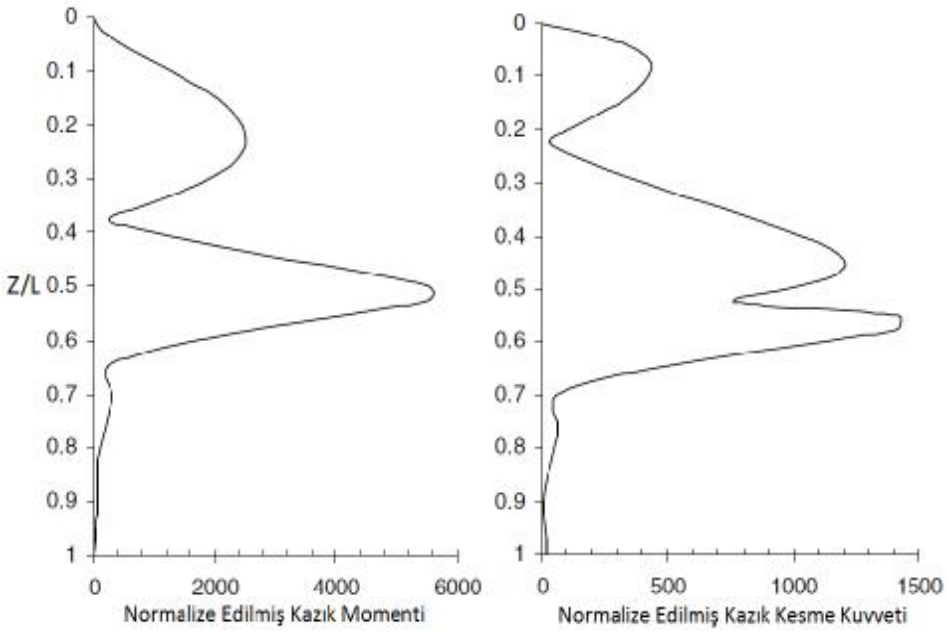
Şekil 2.39. Deforme olmuş sonlu elemanlar ağı (Cubrinovski ve ark, 2005)

2.3.5. Irshad ve Akhtar (2006)

Irshad ve Akhtar (2006), kazıkların zeminle olan kinematik etkileşimini incelemek için farklı rijitlikteki iki tabakadan oluşan zemine gömülü tekil bir uç kazığın davranışını sonlu elemanlar yöntemine dayanan SAP2000 programı ile analiz etmişlerdir. Farklı rijitlikteki tabakalara gömülü kazıklarda oluşan eğilme momentlerinde kinematik etkileşimin rolü büyük olduğundan, eşit kalınlıktaki

(10m) bu iki tabaka arasındaki rijitlik farkı yaklaşık 9 kattır ve alt tabaka üst tabakadan daha rijitttir. Analizlerde kullanılan kazığın çapı 0.5m, boyu ise 20m olup uç kazığı olarak çalışabilmesi için kazık ucunun düşey yöndeki hareketi engellenmiştir. Kazık kütlesi, kazık boyunca her bir metrede tanımlanmış olan düğümlerde toplanmış ve bu düğümlere zeminin davranışını temsil etmesi amacıyla yaylar ve sönümleyiciler atanmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi analiz sonuçlarına göre, kazık-zemin dinamik analizinde, kinematik etkileşiminin etkisini dikkate almanın son derece önemli olduğu belirtilmiştir. Çünkü özellikle büyük rijitlik farkına sahip zemin tabakaları arasında oluşan momentler ve kesme kuvvetlerinin kazıklarda ciddi zararlara sebep olabileceği ve bu durumun üstyapının davranışını da değiştirebileceği ifade edilmiştir.

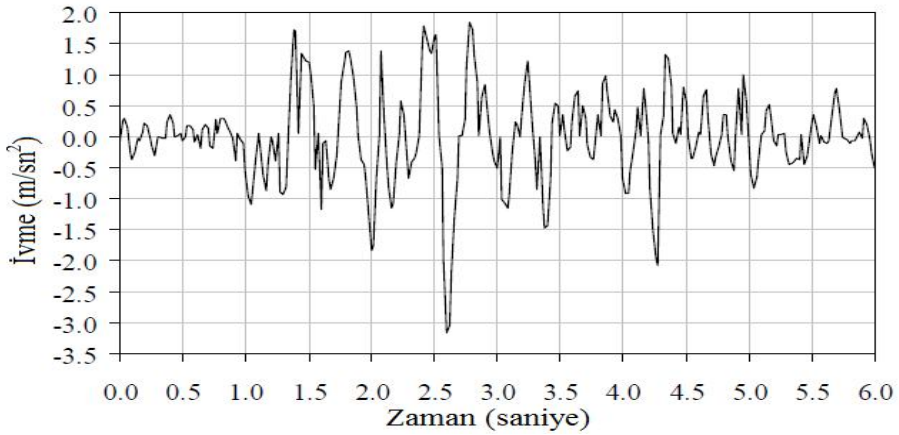


Şekil 2.40. Kazıkta oluşan moment ve kesme kuvveti (Irshad ve Akhtar, 2006)

Kazıkta oluşan maksimum momentlerin ve kesme kuvvetlerinin farklı rijitlikteki tabakaların ara yüzeyinde (Z/L=0.5) ortaya çıktığı Şekil 2.40'da gösterilmiştir. Buna ek olarak, rijitliğin düşük olduğu tabakada oluşan momentlerin ve kesme kuvvetlerinin, rijit tabakada oluşan değerlerden daha büyük olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.40).

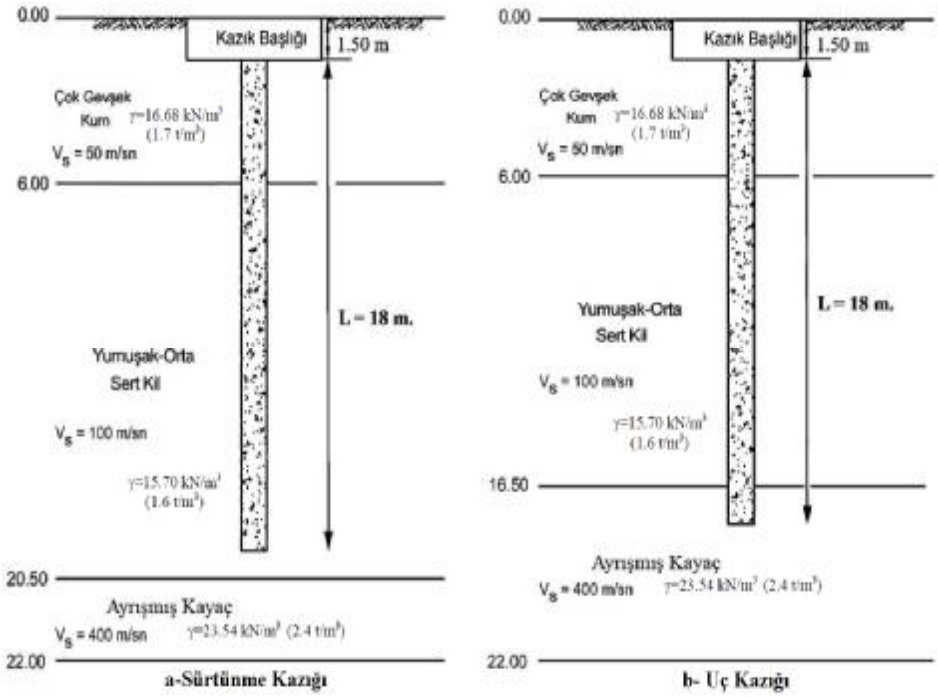
2.3.6. Ordu ve Özkan (2006)

Ordu ve Özkan (2006), dinamik yük etkisindeki kazıkların davranışını sonlu elemanlar yöntemine dayanan LUSAS programını kullanarak incelemişlerdir. Bu amaçla, farklı kayma modülüne sahip zemin tabakalarının nonlineer davranışı üzerine analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, tüm zemin tabakaları için Drucker-Prager elasto-plastik zemin modeli kullanılırken, yapısal elemanlar için ise liner elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Zemin-kazık ara yüzeyini modellemede kullanılan ince kalınlıklı ara elemanların doğrusal olmayan analizlerde çözümü olanaksızlaştırdığından, kazık ile zemin arasında herhangi bir ara yüz elemanı tanımlanmadığı belirtilmiştir. Ayrıca, dinamik hareket olarak San Fernando depremine ait bir yer hareketi kullanılmıştır (Şekil 2.41).



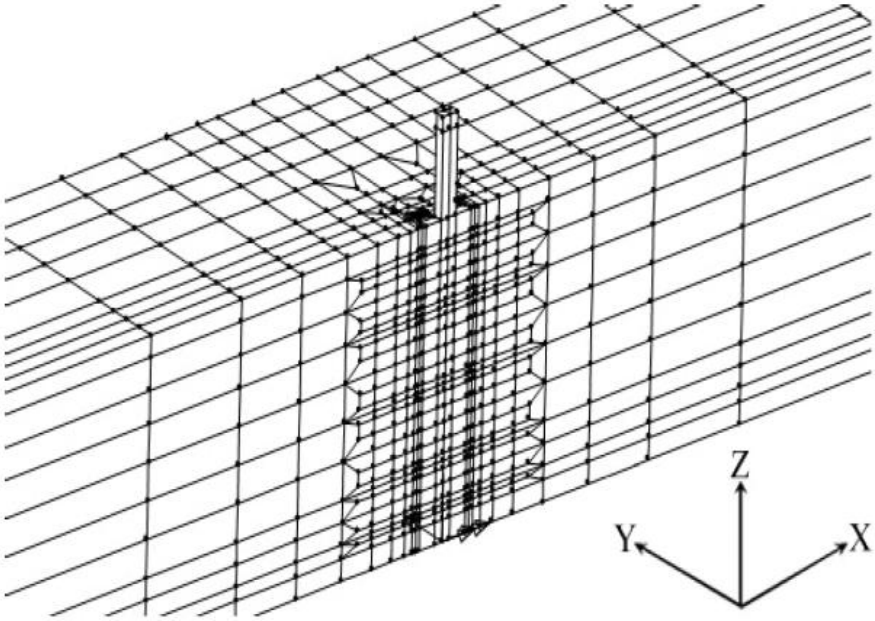
Şekil 2.41. San Fernando depremine ait yer hareketi (Ordu ve Özkan, 2006)

Analizlerde, Şekil 2.42'de görüldüğü gibi 2 farklı zemin profili kullanılmıştır. Sürtünme kazığını temsil etmesi amacıyla ilk durumdaki (a) zemin profili seçilirken, ikinci durumdaki (b) profil yardımıyla da uç kazığı modellenmiştir. Temel zemini üç tabakadan oluşmaktadır. Sürtünme kazıklarında kullanılan zemin profili, yüzeyde 6.0m kalınlıkta çok gevşek kum, bu tabakanın altında 14.5m kalınlıkta yumuşak-orta sert kil tabakası ve tabanda 1.5m kalınlığında ayrışmış kayaç tabakasından oluşurken, uç kazıklarının kullanıldığı zemin profilinde, yüzeyde 6.0m kalınlıkta çok gevşek kum, bu tabakanın altında 12.5m kalınlıkta yumuşak-orta sert kil tabakası ve tabanda 3.5m kalınlığında ayrışmış kayaç yer almaktadır. Sürtünme kazığının uzunluğu, çok gevşek kum tabakasında 3.5m olup, yumuşak orta-sert kil içerisinde 14.5m'dir. Uç kazığının uzunluğu, çok gevşek kum tabakasında 3.5m, yumuşak orta-sert kil içerisinde 12.5m ve ayrışmış kayaca 2.0m girecek şekilde soketlenmiştir.



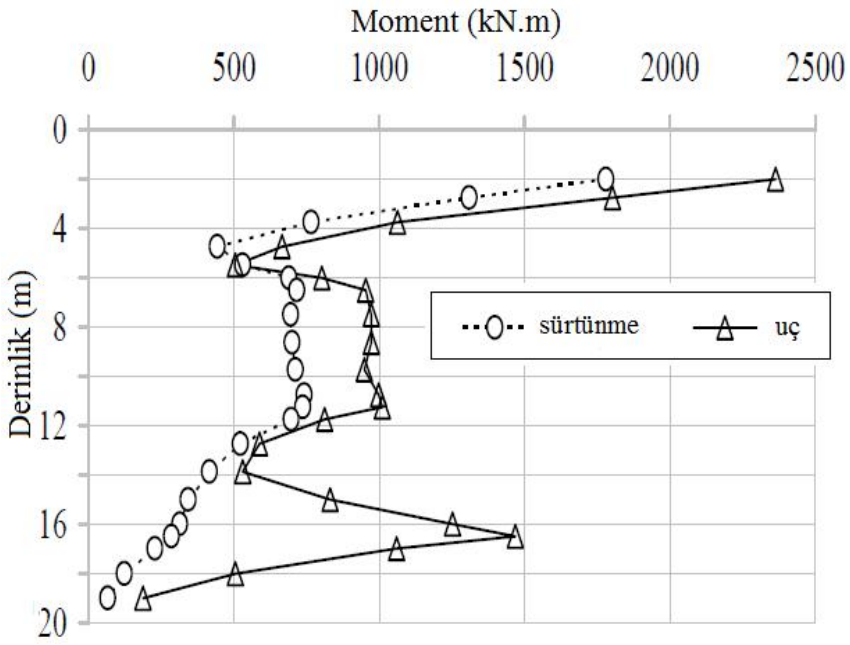
Şekil 2.42. Analizlerde kullanılan zemin kazık sistemi (Ordu ve Özkan, 2006)

Sonlu elemanlar modelinin simetrik olmasından dolayı modelin yalnızca yarısı dikkate alınmıştır (Şekil 2.43).

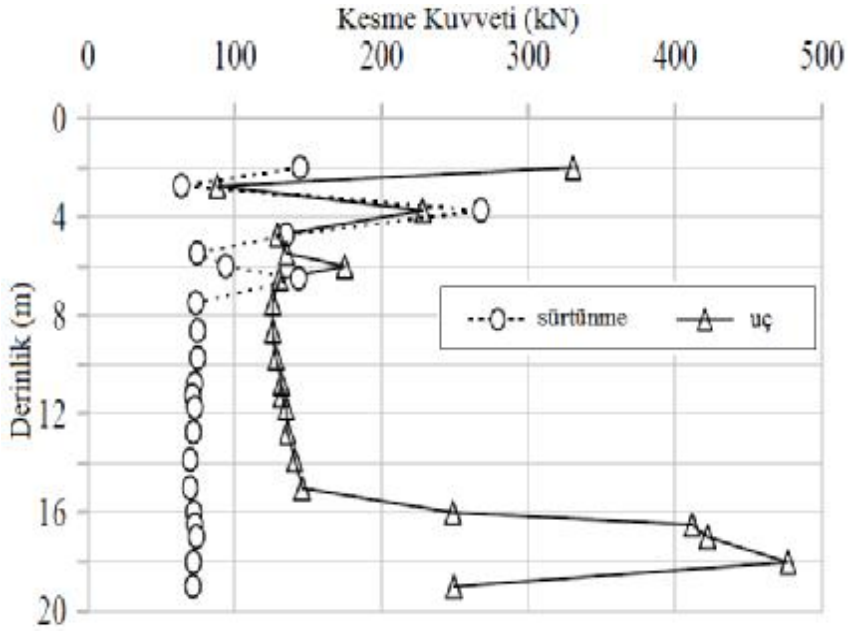


Şekil 2.43. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli (Ordu ve Özkan, 2006)

Sonlu elemanlar ağı, kazık etrafında daha sık ve sınırlara yaklaştıkça daha seyrek oluşturulmuştur. Model sınırları, yayılan deprem dalgalarının zemin bölgesinin sınırlarından yansıyıp geri dönmelerinin engellenebilmesi için, y ve z doğrultularında eşit alınırken, x doğrultusunda kazığın her iki yanında 200m uzatılmıştır. Analiz sonuçları kazıklarda oluşan eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri Şekil 2.44 ve Şekil 2.45'de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, zemin şartlarının kazıkların davranışında önemli bir etkisinin olduğu gözlenmiştir.



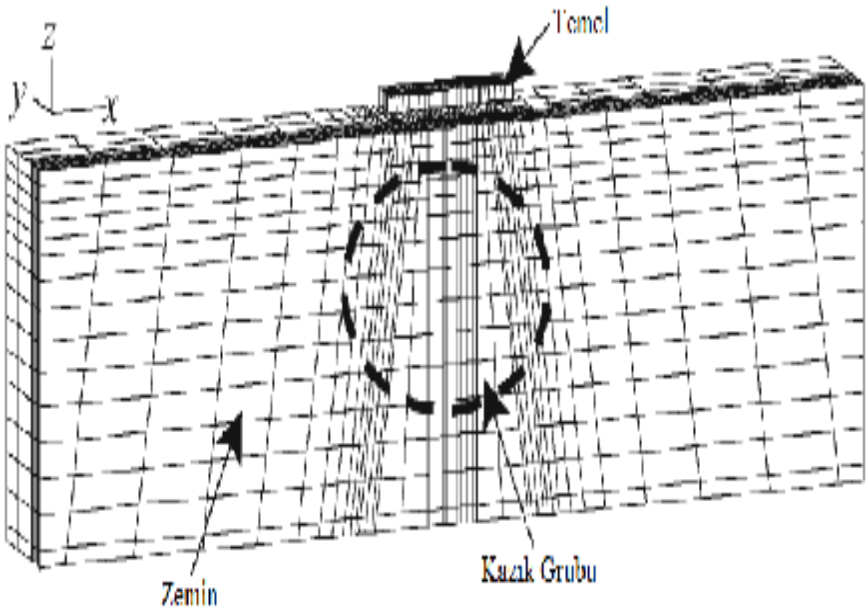
Şekil 2.44. Kazık boyunca elde edilen eğilme momentleri (Ordu ve Özkan, 2006)



Şekil 2.45. Kazık boyunca elde edilen kesme kuvvetleri (Ordu ve Özkan, 2006)

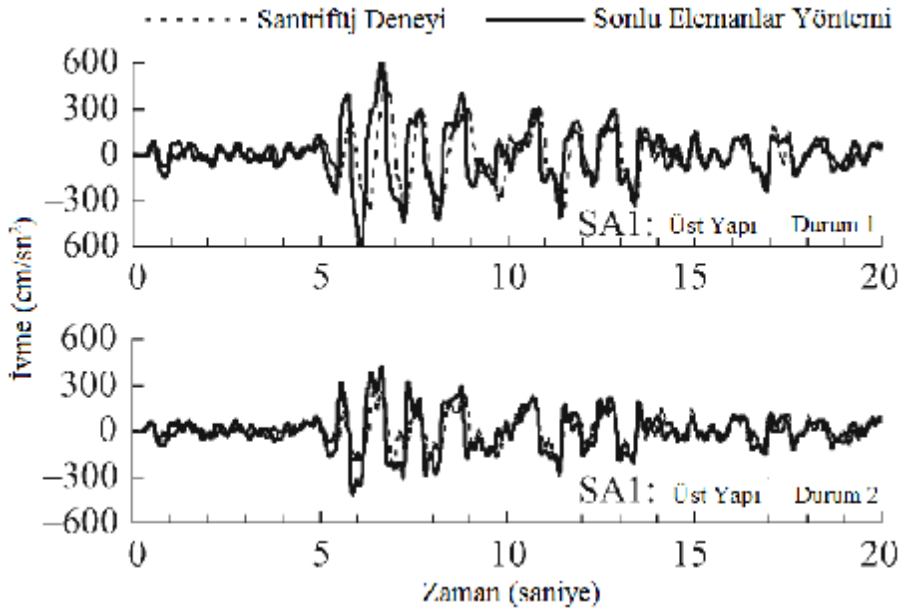
2.3. 7. Zhang ve ark (2008)

Zhang ve ark (2008), detaylı olarak Bölüm 2.2.5'te incelenen santrifüj deneyinden elde ettikleri sonuçları sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmak için DGPILE-3D programını kullanmışlardır. Bu programda, ikinci durum (merkezde bulunan 4 adet kazık düşey doğrultuda, kenarlarda bulunan 4 adet kazık ise düşey doğrultu ile 10° açı yapacak şekilde olan yerleşim) için oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli Şekil 2.46'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar ağı, yapısal elemanların etrafında daha sık ve sınırlara yaklaştıkça daha seyrek olarak oluşturulmuştur.



Şekil 2.46. İkinci durum için sonlu elemanlar modeli (Zhang ve ark, 2008)

Şekil 2.47'te görüldüğü üzere, üst yapıda elde edilen ivme değerlerinin sonlu elemanlar yönteminden elde edilen ivme değerleriyle oldukça uyumlu olduğu belirtilmiştir. Bu uyum kazıklarda oluşan eğilme momentlerinde de gözlenmiştir.

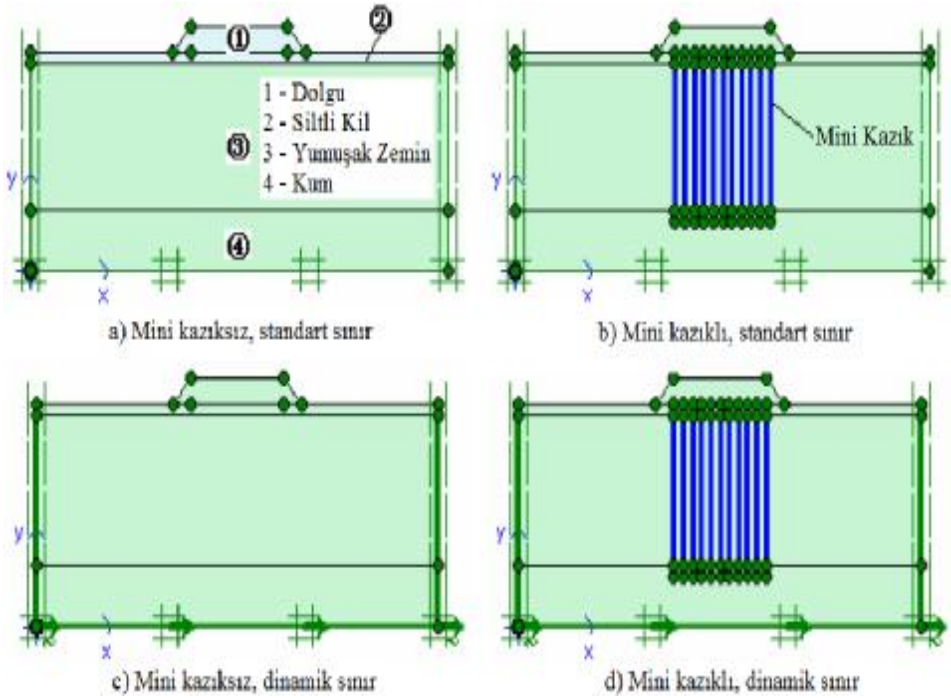


Şekil 2.47. Ölçülen ve hesaplanan ivme değerleri (Zhang ve ark, 2008)

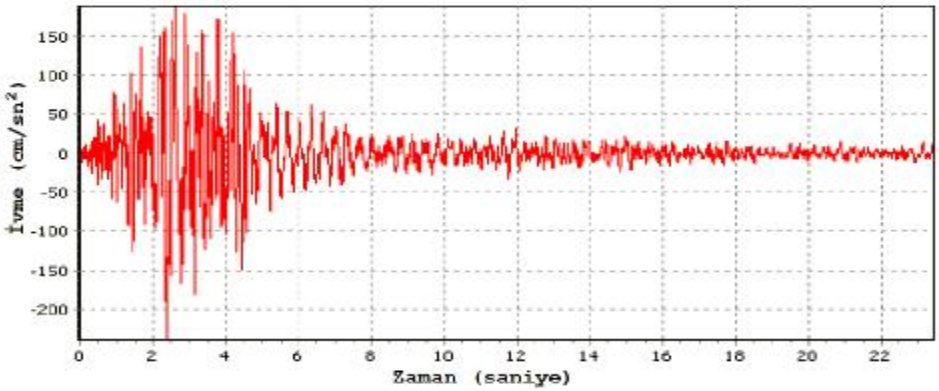
2.3.8. Zhaoyu ve ark (2009)

Zhaoyu ve ark (2009), statik ve dinamik yük etkisindeki mini kazıkların davranışını incelemek için sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D programını kullanmışlardır. Bu amaçla üzerinde dolgu bulunan ve üç farklı tabakadan oluşan zemin mini kazıklı ve mini kazıksız olarak modellenerek, statik ve dinamik yük etkisine maruz bırakılmıştır. Her iki durum için de dolguda meydana gelen deplasmanlar ölçülerek mini kazıkların zemin iyileştirmedeki katkısı belirlenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan mini kazıkların her biri 0.2m çapa ve 14m boya sahip olup malzeme modeli olarak lineer elastik, zemin için ise Mohr-Coulomb malzeme modeli seçilmiştir. Ayrıca, mini kazıklar ile zemin arasına etkileşimi modellemek için ara yüz eleman tanımlanmıştır. Statik yük etkisinde gerçekleştirilen analizler için standart sınır koşulları tanımlanırken, dinamik yük etkisinde gerçekleştirilen analizler için dinamik sınırlar, kaynaktan yayılan dalgaların sınırlara çarpıp tekrar yansımasını önleyen sınırlar,

tanımlanmıştır (Şekil 2.48). Analizlerde statik yük olarak dolgunun kendi ağırlığı kullanılırken, dinamik yük olarak bir deprem kaydı kullanılmıştır (Şekil 2.49).

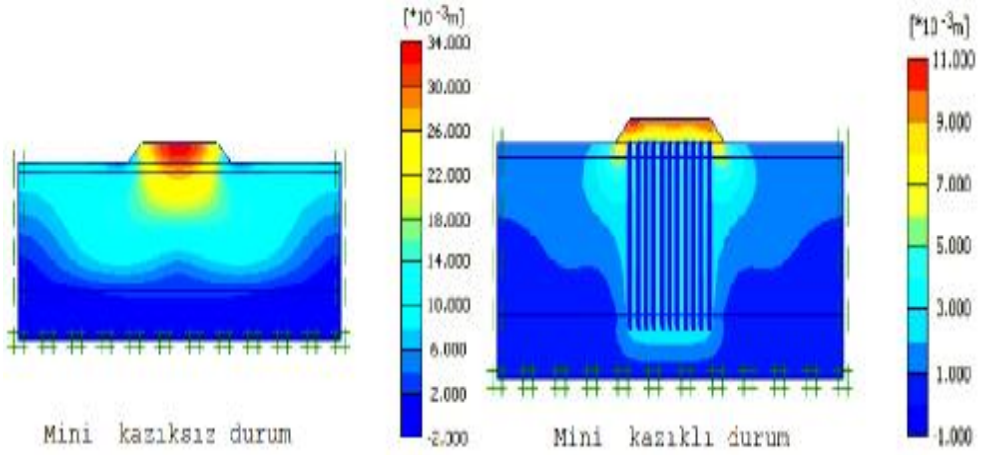


Şekil 2.48. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan modeller (Zhaoyu ve ark, 2009)



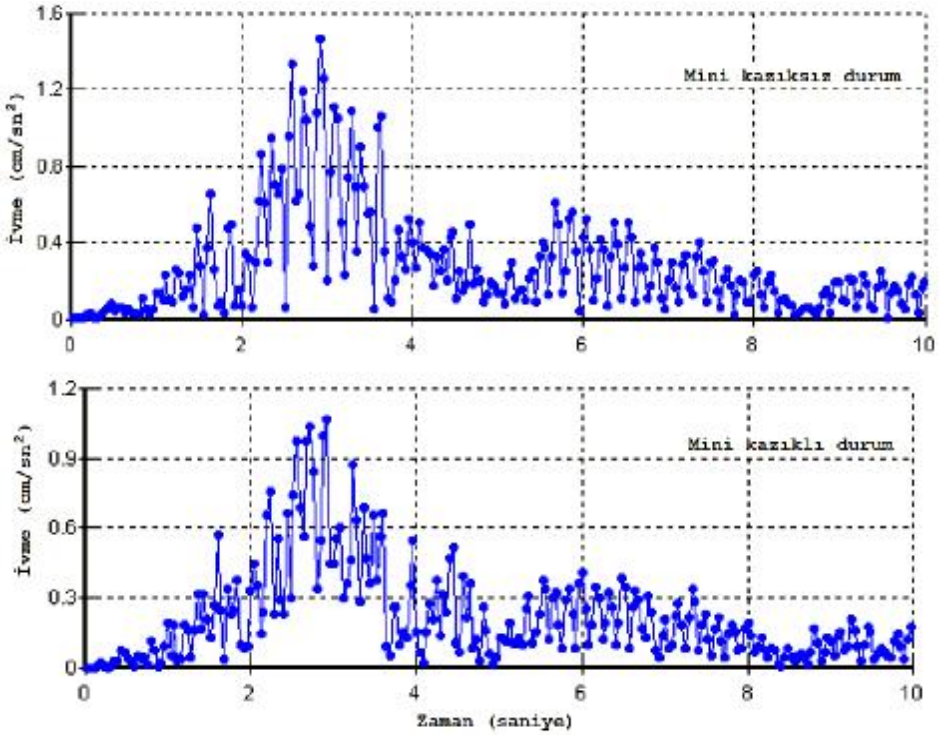
Şekil 2.49. Analizlerde kullanılan deprem kaydı (Zhaoyu ve ark, 2009)

Statik yükleme koşulları için sonlu elemanlar analiz sonuçları incelendiğinde, mini kazıksız durumda dolguda meydana gelen maksimum deplasman 3.324cm olarak hesaplanırken, mini kazıklı durumda ise bu değerin 1.035cm'ye düştüğü görülmüştür (Şekil 2.50). Mini kazıkların statik yükleme koşullarında zeminde oluşabilecek deplasmanları ciddi derecede azalttığı belirtilmiştir



Şekil 2.50. Statik yükleme için dolguda oluşan deplasmanlar (Zhaoyu ve ark, 2009)

Dinamik yükleme koşulları için sonuçlar incelendiğinde, dolgunun orta noktasında ölçülen ivme-zaman grafiğine göre, mini kazıksız durumda ölçülen maksimum ivme değeri 1.466 m/sn^2 olarak belirlenirken, mini kazıklı durumda ise bu değer 1.065 m/sn^2 olarak belirlenmiştir (Şekil 2.51). Sonuç olarak, hem statik hem de dinamik yükleme koşullarında mini kazıkların zemin iyileştirmede ciddi katkı sağladığı belirtilmiştir.



Şekil 2.51. Dinamik yükleme için dolguda oluşan ivmeler (Zhaoyu ve ark, 2009)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Genel

Zeminlerin mekanik davranışlarının doğru bir şekilde ortaya koyulabilmesi için farklı malzeme modelleri geliştirilmiştir. Bu malzeme modelleri, ihtiyaç duydukları girdi parametrelerine göre basit ya da karmaşık model olarak ifade edilebilmektedir. Basit malzeme modeli olarak adlandırılan modelde, ilgili zemine ait gerilme-deformasyon davranışı yalnızca iki girdi parametresi (Young modülü ve Poisson oranı) sayesinde elde edilebilirken, karmaşık model olarak ifade edilenler için daha fazla girdi parametresine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu modeller ile elde edilen sonuçların basit modeller ile elde edilenlere göre daha gerçekçi olduğu unutulmamalıdır. Geoteknik problemlerde doğru çözüm üretebilmek için, ilgili zemine uygun malzeme modeli seçimi ve bu modele ait parametrelerin doğru bir şekilde elde edilmesi oldukça önemlidir (Brinkgreve ve ark, 2010).

Bu bölümde, ilk olarak çalışmada incelenen zeminin özelliklerinden ve bu zemin için seçilen malzeme modellerinden bahsedilmiş, daha sonra sonlu elemanlar yöntemi ve dinamik analiz konusuna değinilmiştir.

3.2. Zemin Özellikleri ve Modelleri

Brinkgreve ve ark (2010), kum zeminin rölatif sıkılık değerinden faydalanarak aynı zeminin endeks ve mukavemet özelliklerinin hesaplanabildiği bazı eşitlikler geliştirmişlerdir. Farklı sıkılıktaki kum zeminlere ait deney dataları kullanılarak elde edilen bu eşitliklerin, zemin hakkında yeterli miktarda bilgi sahibi olunamadığı durumlarda oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, laboratuvar ortamında deney yapabilme imkanının olmadığı ve girdi parametrelerinin fazla olduğu karmaşık bir zemin modelinin kullanılmasının söz konusu olduğu durumlarda, yine bu eşitliklerden faydalanmanın son derece yararlı

olduğu belirtilmiştir. Bu bölümde, bahsedilen bu eşitlikler kullanılarak çalışmada incelenen kum zeminin endeks ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir.

Kum zeminin endeks özellikleri arasında bulunan doygun olmayan ve doygun durumdaki birim hacim ağırlıkları için önerilen eşitlikler sırasıyla;

$$\gamma_{unsat} = 15+4.0\times RD/100 \quad (3.1.)$$

$$\gamma_{sat} = 19+1.6\times RD/100 \quad (3.2.)$$

olarak verilmiştir. Burada; γ_{unsat} (kN/m^3), kum zeminin doygun olmayan birim hacim ağırlığını, γ_{sat} (kN/m^3), doygun birim hacim ağırlığını ve RD (%) ise rölatif sıkılığını ifade etmektedir. Buna ek olarak, kum zeminin mukavemet özellikleri için önerilen eşitlikler aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

$$E_{50}^{ref} = 60000\times RD/100 \quad (3.3.)$$

$$E_{eod}^{ref} = 60000\times RD/100 \quad (3.4.)$$

$$E_{ur}^{ref} = 180000\times RD/100 \quad (3.5.)$$

$$G_0^{ref} = 60000+68000\times RD/100 \quad (3.6.)$$

$$m = 0.7 - RD/320 \quad (3.7.)$$

Burada; E_{50}^{ref} (kN/m^2), referans rijitlik modülünü, E_{eod}^{ref} (kN/m^2), referans tanjant modülünü, E_{ur}^{ref} (kN/m^2), referans boşaltma/tekrar yükleme modülünü ve G_0^{ref} (kN/m^2) ise kayma modülünü ifade etmektedir. Bu değerler normal şartlarda üç eksenli basınç deneyi ile ödometre deneyinden elde edilebilmektedir. Poisson oranı (ν), kum zeminin tüm sıkılık oranları için 0.2 olarak kabul edilmiştir. Karmaşık modellerde ihtiyaç duyulan gerilme seviyesine bağlı rijitlik oranı (m) için yukarıda verilen eşitlik önerilirken, eşik kayma gerilmesi ($\gamma_{0.7}$) değeri için elde edilen eşitlik aşağıda verilmiştir. Ayrıca, bu eşitliklerin drenajlı koşullar için kullanılması gerektiği vurgulanmıştır.

$$\gamma_{0.7} = (2 - RD/100)´ 10^{-4} \quad (3.8.)$$

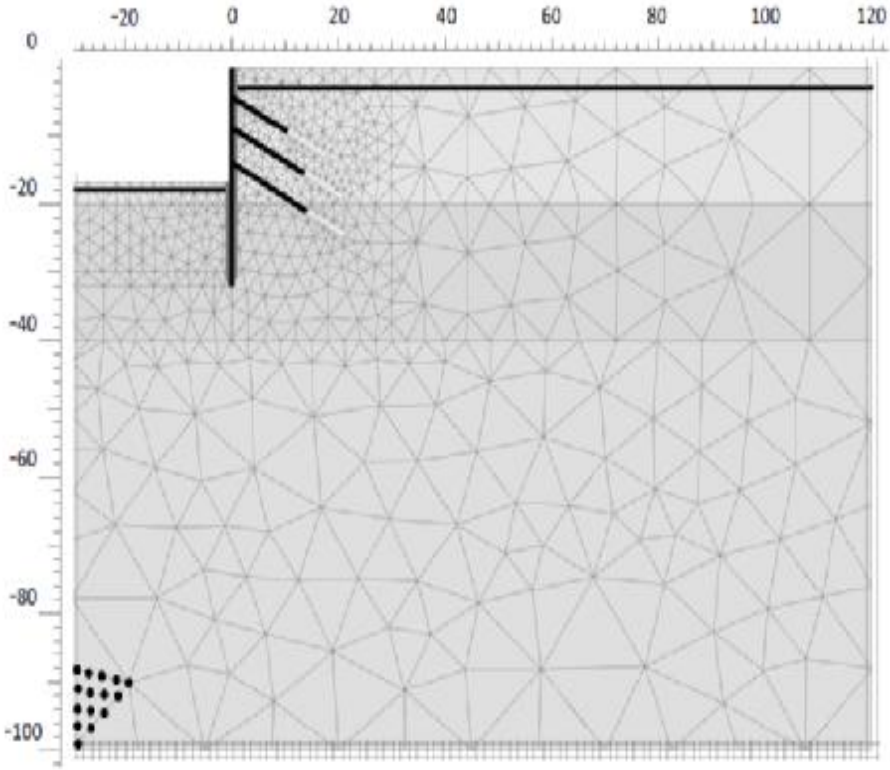
Kum zeminlerin en önemli mukavemet parametreleri arasında yer alan içsel sürtünme açısı (φ), genleşim açısı (ψ) ve göçme oranı (R_f) değerleri için önerilen eşitlikler sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$f = 28+12.5\times RD/100 \quad (3.9.)$$

$$y = - 2+12.5´ RD/100 \quad (3.10.)$$

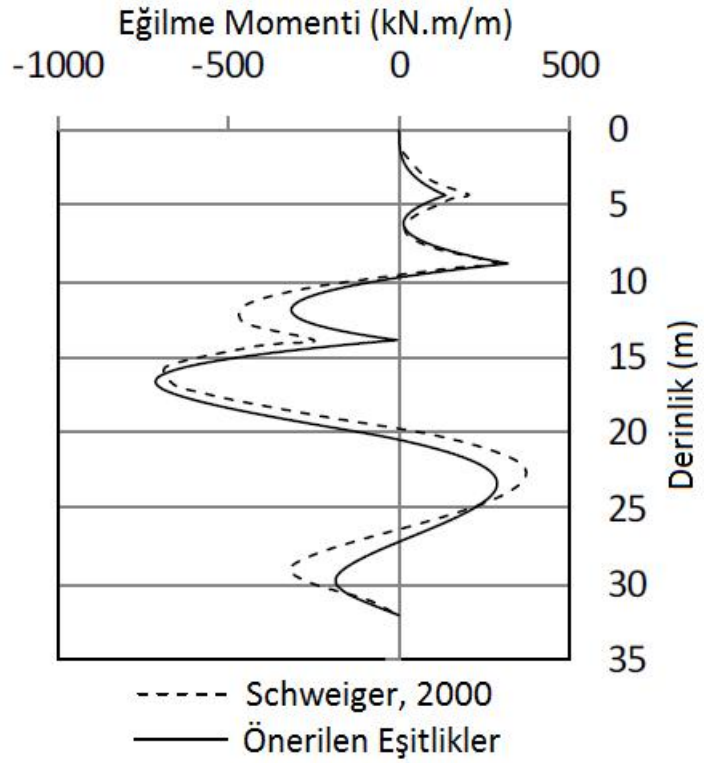
$$R_f = 1 - RD/800 \quad (3.11.)$$

Bu eşitliklerin geçerliliğinin belirlenmesi amacıyla, farklı sıkılıktaki (RD = %50, %80, %100) üç tabakadan oluşan kum zemine gömülü üç sıra ankraj ile stabilitesi sağlanmış bir istinat yapısı Plaxis 2D ile modellenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Plaxis 2D'de oluşturulan sonlu elemanlar ağı (Brinkgreve ve ark, 2010)

Modelde yer alan üç farklı sıkılıktaki kum zemin için yukarıda bahsedilen eşitlikler kullanılmıştır. Bu yöntem ile elde edilen sonuçlar, aynı problemin incelendiği, Schweiger (2000) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, duvarda oluşan eğilme momentlerinin her iki yöntemde de benzer dağılım gösterdiği ve maksimum eğilme momenti (yaklaşık olarak 735 kN.m/m) değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu belirtilmiştir (Şekil 3.2). Son olarak, kum zeminler için geliştirilen bu eşitliklerin oldukça iyi sonuçlar vermesinin detaylı zemin araştırmasını terk etmek anlamına gelmemesi gerektiği ifade edilmiştir.



Şekil 3.2. Duvarda oluşan eğilme momentleri (Brinkgreve ve ark., 2010)

Bu bölümde, ilk olarak kum bir zemine ait endeks ve mukavemet parametrelerinin nasıl elde edileceğinden bahsedilmiştir. Bu kısımda ise, ilgili zemine uygun malzeme modelleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu amaçla, Lineer Elastik Model (LE), Mohr-Coulomb Model (MC) ve Hardening Soil Model zemin modelleri incelenmiştir.

3.2.1. Lineer Elastik Model (LE)

Lineer Elastik Model (LE), malzemenin izotropik ve elastik davrandığı kabulünün yapıldığı Hooke yasasına dayanmaktadır. Bu modelde iki önemli parametre ön plana çıkmaktadır. Bunlar sırasıyla, Young modülü ve Poisson oranıdır. Bu model, zeminlerin davranışını incelemek için yeterli olmamasına rağmen, davranışı elastik sınırlar içerisinde kalan beton, çelik ve sağlam kaya

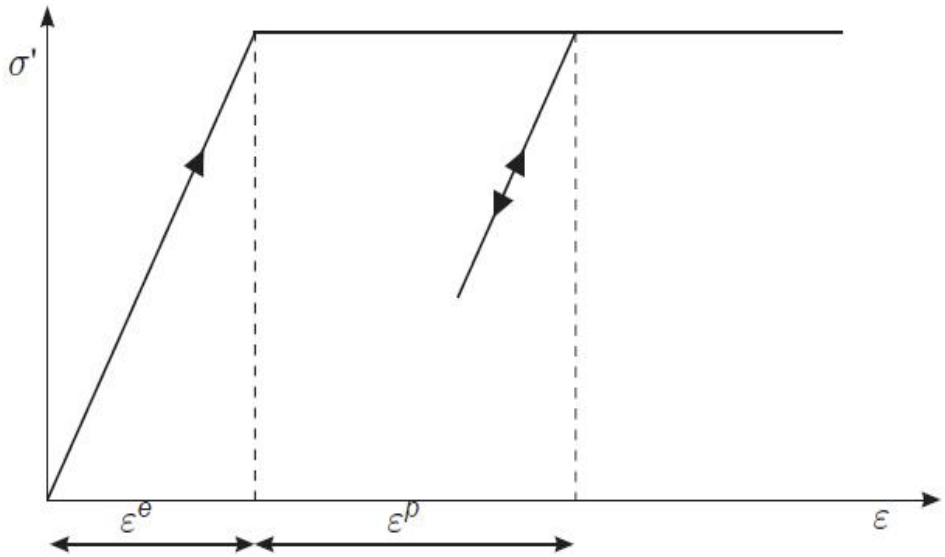
formasyonları gibi malzemeler için sıkça kullanılabilmektedir. Zeminlerin büyük ölçüde doğrusal ve elastik olmayan davranışlarından dolayı, bu modelin zeminlerin önemli özelliklerini ortaya koymakta yetersiz kaldığı bilinmektedir (Plaxis Material Models Manual, 2015)

3.2.2. Mohr-Coulomb Model (MC)

Zeminlerin gerilme deformasyon davranışını lineer elastik-tam plastik olarak modelleyen bu malzeme modeli basit bir model olmasına rağmen oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modelin lineer elastik bölümü Hooke yasasına dayanırken, tam plastik bölümü ise Mohr-Coulomb yenilme kriterine dayanmaktadır.

Bir malzemenin plastik davranış göstermesi, geri dönüştürülemez deformasyonların ortaya çıkması anlamına gelmektedir. Plastik davranışı belirlemek için ise gerilme ve deformasyonun bir fonksiyonu olan akma fonksiyonu (f) dikkate alınmaktadır. Plastik akma ise f=0 şartlarında ortaya çıkmaktadır ve bu şartlar genellikle asal gerilme uzayında bir yüzey olarak ifade edilmektedir. Bu akma yüzeyi içerisinde yer alan ve gerilme durumları için temsil edilen noktalarda, malzemenin davranışı tamamen elastik ve bütün deformasyonlar geri dönüştürülebilirdir. Lineer elastik-tam plastik davranış gösteren bir malzemenin deformasyonu elastik ve plastik deformasyon olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır (Plaxis Material Models Manual, 2015).

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}^{e} + \mathbf{e}^{p} \tag{3.12.}$$



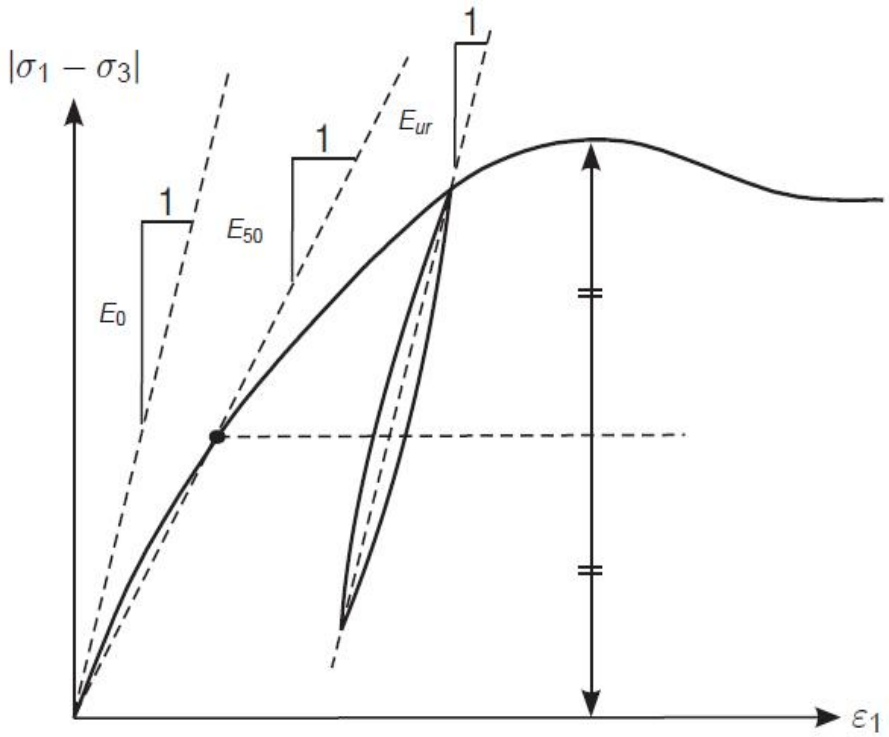
Şekil 3.3. Elastik-tam plastik model (Plaxis Material Models Manual, 2015)

Bu modelde, lineer elastik malzeme modelinin girdi parametreleri olan Young modülü ve Poisson oranı değerlerine ek olarak, birer plastik davranış parametreleri olan kohezyon, içsel sürtünme açısı ve genleşim açısı değerlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak, Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmak istendiğinde, geleneksel deneylerden elde edilebilen 5 adet girdi parametresi vardır. Bu parametrelerden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

3.2.2.1. Young Modülü (E)

Farklı zeminler belirli bir yük etkisinde farklı davranış gösterdiklerinden, hesaplamalarda kullanılan rijitlik modülü değerlerinin özenle seçilmesi gerekmektedir. Young modülü, Lineer Elastik ve Mohr-Coulomb zemin modellerinde temel rijitlik modülü olarak kullanılmaktadır. Buna ek olarak, bazı alternatif rijitlik modülleri de bulunmaktadır. Bu rijitlik modüllerinden ilki, üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıç eğiminden hesaplanan ve E_0 ile gösterilen başlangıç rijitlik modülüyken diğeri deviatorik gerilmenin ($|\sigma_1 - \sigma_3|$) maksimum değerinin %50'sine karşılık

gelen ve E_{50} ile gösterilen sekant modülüdür. Çok aşırı konsolide kil zeminler ve bazı kayaçlarda elastik davranış aralığı büyük olduğundan E_0 modülünün kullanılması daha gerçekçi olurken, kum ve normal konsolide kil zeminlerde yükleme başladıktan hemen sonra doğrusal olmayan bir gerilme-deformasyon ilişkisi gözlenmektedir. Bu nedenle, bu tip zeminler için E_{50} sekant modülünün kullanılması daha gerçekçi olmaktadır. Ayrıca, büyük miktarda kazı işleminin gerçekleştirildiği tünel veya derin kazı gibi problemlerde, zeminde şişme meydana gelmesi söz konusu olduğundan, E_{ur} boşaltma/tekrar yükleme modülünü dikkate almanın daha doğru bir yaklaşım olduğu kabul edilmektedir (Plaxis Material Models Manual, 2015).



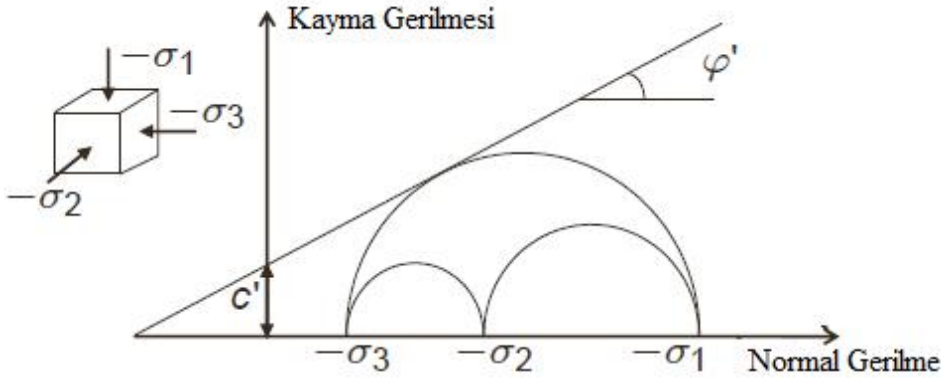
Şekil 3.4. E_0, E_{50} ve E_{ur} modülleri (Plaxis Material Models Manual, 2015)

3.2.2.2. Poisson Oranı (ν)

Elastik malzemenin diğer bir parametresi olan Poisson oranı'nın seçimi, başlangıç gerilme durumunun "Gravity Loading" seçeneği ile oluşturulduğu problemlerde (yer yüzeyinin şevli olduğu veya yer altı su seviyesinin yer yüzeyine paralel olmadığı durumlar için) oldukça basit bir yaklaşım ile elde edilmektedir. Bu tip yükleme durumunda sükunetteki toprak basıncı katsayısı K_0 değeri $K_0=\sigma_h/\sigma_v$ eşitliğine dayanarak gerçekçi bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Bu nedenle, hem lineer elastik hem de Mohr-Coulomb zemin modellerinde tek boyutlu sıkışma (ödometre) problemleri için $K_0=\sigma_h/\sigma_v=\nu/(1-\nu)$ eşitliği kullanılmaktadır. Dolayısıyla, K_0 katsayısının değerinden hareketle K_0 katsayısı ile eşleşen bir Poisson oranı değeri tanımlanmaktadır. Başlangıç gerilme durumunun "K_0 Procedure" seçeneği ile oluşturulduğu problemlerde (yer yüzeyinin düzgün olduğu veya yer altı su seviyesinin yer yüzeyine paralel olduğu durumlar için) ise, Poisson oranı değeri tasarımcı tarafından belirlenmektedir. Bu tür problemlerde, basınç etkisinde Poisson oranı genellikle 0.3 ile 0.4 aralığında seçilirken, çekme etkisinde ise 0.15 ile 0.25 aralığında seçilmektedir. Ayrıca, kum zemin koşullarında bu değer 0.2 ile 0.4 aralığında seçilebilmektedir (Plaxis Material Models Manual, 2015).

3.2.2.3. Kohezyon (c)

Kohezyon, gerilme boyutuna sahip olup Mohr-Coulomb zemin modelinin plastik davranış parametrelerinden birisidir. Bu parametre ince daneli (silt, kil) kendini tutabilen zeminlerin mukavemet değerini temsil ettiğinden, kaba daneli kendini tutamayan zeminlerde (çakıl, kum) c=0 değerine sahiptir. Ayrıca, bu parametre Mohr-Coulomb zemin modelinde zeminin efektif kohezyon (c') değerini modellemek için efektif içsel sürtünme açısı (φ') değerinin bir kombinasyonu ile birlikte kullanılmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Mukavemet parametreleri (Plaxis Material Models Manual, 2015)

Mohr-Coulomb zemin modelinde, kohezyonsuz kum zemin ile gerçekleştirilen analizlerde efektif kohezyon değerinin (c′=0) sıfır alınması, hesaplamalarda bazı karmaşıklıklara neden olabilmektedir. Kum zemin tabakasının zemin yüzeyine kadar uzandığı durumunlarda ise bu sorun ile daha fazla karşılaşılmaktadır. Bu tür bir sorun ile karşılaşmamak için efektif kohezyon değerinin (c′>0.2 kPa) şeklinde çok küçük bir değer olarak girilmesi tavsiye edilmektedir. Ancak, kum zeminlerde efektif kohezyon değerinin pozitif bir değer alınması bu zeminlerin az da olsa bir çekme mukavemetine sahip olması anlamına gelmektedir. Bu durum ise gerçekçi bir yaklaşım değildir. Bu yüzden, çekme mukavemetini azaltmak için kullanılan “Tension cut-off” seçeneğine sıfır girilerek, kum zeminlerin çekme mukavemeti ortadan kaldırılabilmektedir (Plaxis Material Models Manual, 2015).

3.2.2.4. İçsel Sürtünme Açısı (φ)

İçsel sürtünme açısı derece boyutuna sahip olup, Mohr-Coulomb zemin modelinin plastik davranış parametrelerinden bir diğeridir. Bu kaba daneli zeminlerin (çakıl, kum) mukavemet değerini temsil etmektedir. Bu parametrenin çok büyük bir değere sahip olması (genellikle sıkı kum şartlarında karşılaşılan bir durum) hesaplamalarda ciddi bilgisayar gücüne ihtiyaç duyulması anlamına

gelmektedir. Ayrıca, bu parametrenin çok büyük değere sahip olması birim deformasyon yumuşaması olarak adlandırılan zemin davranışını ortaya çıkarabilmektedir. Bu ise çok büyük içsel sürtünme açısının büyük deformasyonlar altında sürdürülebilir olmadığı anlamına gelmektedir. Bu yüzden, içsel sürtünme açısının silt ve kil türü zeminlerde 20° ile 30° aralığında, çakıl ve kum türü zeminlerde ise 30° ile 40° aralığında olduğu problemlerde Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanılması önerilmemektedir (Plaxis Material Models Manual, 2015).

3.2.2.5. Genleşim Açısı (ψ)

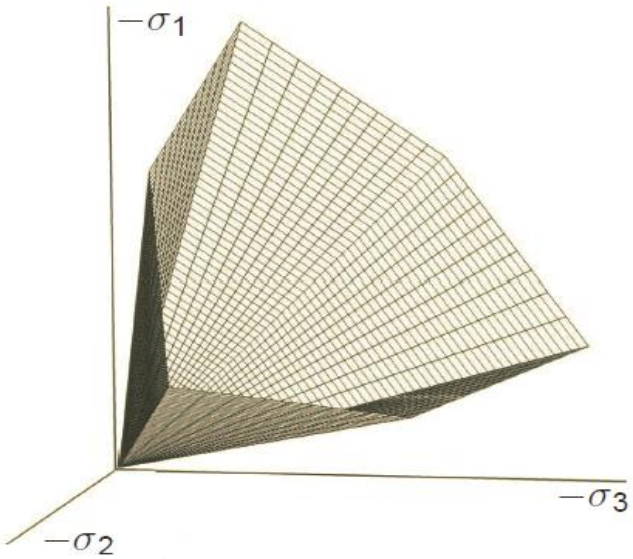
Genleşim açısı derece boyutuna sahip olup, Mohr-Coulomb zemin modelinin plastik davranış parametrelerinden sonuncusudur. Kil zeminlerde bu açı çok küçük bir değere ($\psi \approx 0$) sahiptir. Kum zeminlerde ise genleşim açısı hem rölatif sıkılığa hem de içsel sürtünme açısına bağlıdır ve genellikle içsel sürtünme açısından daha küçük bir değere sahiptir. Bu değer yaklaşık olarak kum zeminin içsel sürtünme açısının 30° eksiğine ($\psi \approx \varphi$-30°) eşittir. İçsel sürtünme açısının 30°'den küçük olduğu kum zeminlerde ise bu değer sıfır olarak alınmaktadır. Genleşim açısının pozitif bir değere sahip olması, drenajlı davranış durumunda zeminde kayma deformasyonları oluştuğu sürece hacimsel değişiminde devam edeceği anlamına gelmektedir. Fakat bu yaklaşım gerçekçi değildir. Çünkü zeminlerin kritik duruma ulaşması ile birlikte sabit gerilme altında oluşan sürekli deformasyonlar hacimsel değişim olmaksızın meydana gelmektedir. Drenajsız davranış durumunda ise, pozitif genleşim açısı hacimsel değişimin sınırlandırıldığı durumda çekme gözeneklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum ise, zemin dayanımının normal değerinden daha fazla hesaplanacağı anlamına gelmektedir (Plaxis Material Models Manual, 2015).

3.2.3. Hardening Soil Model (HS)

Hardening Soil Model, gelişmiş bir zemin modeli olup, bu model sayesinde farklı türdeki zeminlerin davranışlarının modellenebilmesi mümkündür (Schanz,

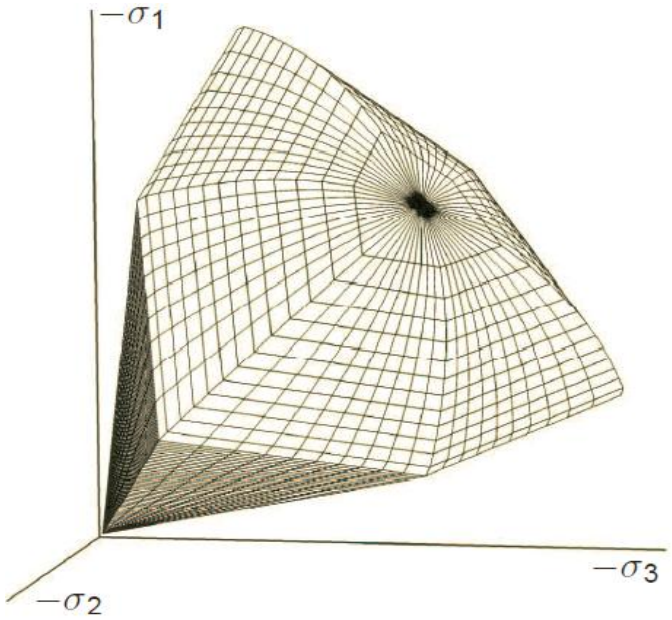
1999). Mohr-Coulomb zemin modelinin tam plastik davranışının modellenebilmesi için gerekli olan kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (φ) ve genleşim açısı (ψ) parametrelerine bu modelde de ihtiyaç duyulurken, zemin rijitliğini ifade eden referans rijitlik modülü (E_{50}^{ref}), referans tanjant modülü (E_{eod}^{ref}) ve referans boşaltma/tekrar yükleme modülü (E_{ur}^{ref}) parametreleri ile bunlara ek olarak boşaltma/tekrar yükleme poisson oranı (v_{ur}), referans çevre basıncı (p^{ref}), sükûnet basınç katsayısı (K_0), göçme oranı (R_f) ve çekme gerilmesi ($\sigma_{tension}$) gibi bazı gelişmiş parametrelere de ihtiyaç duyulmaktadır (Plaxis Material Models Manual, 2015).

Lineer Elastik-Tam Plastik (Mohr-Coulomb) zemin modelinde, akma yüzeyi asal gerilme uzayında sabittir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Mohr-Coulomb akma yüzeyi (Plaxis Material Models Manual, 2015)

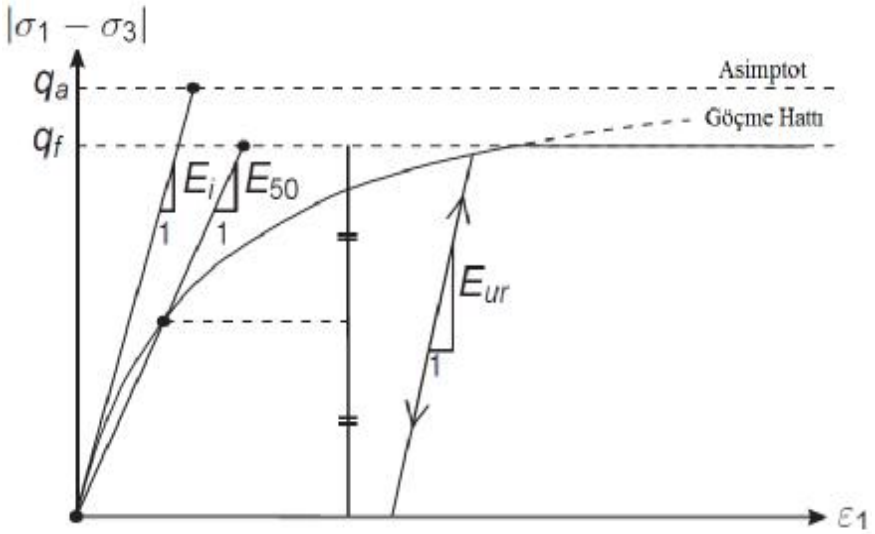
Buna karşın Hardening Soil zemin modelinde ise akma yüzeyi asal gerilme uzayında sabit değildir ve bu yüzey plastik deformasyonlardan dolayı genişleyebilmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Hardening Soil akma yüzeyi (Plaxis Material Models Manual, 2015)

Zeminlerin davranışı, Mohr-Coulomb zemin modelinde sabit bir Young modülü değeri kullanılarak incelenmektedir. Fakat gerçekte bu değer zemin içerisindeki gerilme seviyesine bağlı olduğundan, bütün gerilme seviyeleri için tek bir Young modülü değerinin kullanılması gerçekçi bir yaklaşım olarak görülmemektedir. Ayrıca, zemin içerisindeki gerilme seviyelerini doğru tahmin etmek ve bu gerilme seviyelerine ait uygun rijitlik değerlerini elde etmek oldukça önemli ve zor bir işlemdir. Hardening soil model sayesinde bu zor işleme ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunun yerine, deviatorik gerilmenin ($|\sigma_1 - \sigma_3|$) maksimum değerinin %50'sine karşılık gelen ve E_{50} ile gösterilen sekant modülü kullanılmaktadır (Plaxis Material Models Manual, 2015).

Bu modele ait eşitlikler, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen düşey deformasyon (ε_1) ile deviatorik gerilme ($|\sigma_1 - \sigma_3|$) arasındaki hiperbolik ilişkiye dayanmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Gerilme-deformasyon ilişkisi (Plaxis Material Models Manual, 2015)

Bu hiperbolün denklemi;

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \times \frac{q}{1-(q/q_a)} \qquad (q < q_f \text{ için}) \qquad (3.13.)$$

$$E_i = \frac{2 \times E_{50}}{2-R_f} \qquad (3.14.)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; q_a, kayma mukavemetinin asimptot kaldığı değerdir. E_i parametresi ise, başlangıç rijitlik modülü olup, ilk yükleme sırasındaki gerilmeye bağlı rijitlik modülü E_{50} (sekant modülü) ile ilişkilidir.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \cdot \left(\frac{c \times \cos\varphi - \sigma_3' \times \sin\varphi}{c \times \cos\varphi + p^{ref} \times \sin\varphi}\right)^m \qquad (3.15.)$$

Burada; E_{50}^{ref}, referans çevre basıncı (p^{ref}) değerine karşılık gelen referans rijitlik modülüdür. Rijitlik modülü, üç eksenli basınç deneyindeki çevre basıncı değerine (σ'_3) bağlıdır. Bu asal gerilmenin işareti basınç olması nedeniyle negatiftir. Gerilme seviyesi ise üs değeri "m" ile kontrol edilmektedir. Farklı araştırmacılar bu değer için 0.5<m<1.0 aralığında değerler önermişlerdir. Göçme anındaki deviatorik gerilme (q_f) ve deviatorik gerilmenin asimptot kaldığı (q_a) değeri modelde aşağıdaki bağıntılar ile tanımlanmaktadır.

$$q_f = (c \times \cot\varphi - \varphi'_3) \times \frac{2 \times \sin\sigma}{1 - \sin\sigma} \tag{3.16.}$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \tag{3.17.}$$

q_f değeri, c ve φ değerleri kullanılarak Mohr-Coulomb göçme kriterinden hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, $q=q_f$ olduğunda Mohr-Coulomb zemin modeline göre göçme meydana gelmekte ve tam plastik akma oluşmaktadır. Bu iki değer arasındaki oran ise göçme oranı (R_f) olarak tanımlanmakta olup, bu oranın 1'den küçük olduğu belirtilmektedir. Modelde, boşaltma/tekrar yükleme rijitliği için ise aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır (Plaxis Material Models Manual, 2015).

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \cdot \left(\frac{c \times \cos\varphi - \sigma'_3 \times \sin\varphi}{c \times \cos\varphi + p^{ref} \times \sin\varphi}\right)^m \tag{3.18.}$$

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Dinamik Analiz

Sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik analiz yapmak istendiğinde, dikkate alınması gereken bazı kavramlar bulunmaktadır. Aşağıda başlıklar halinde verilen bu kavramlardan bu bölümde kısaca bahsedilmiştir.

- Dinamik davranış formülasyonu
- Dalga hızları
- Kritik zaman adımı
- Model sınırları
- Sönümleyici sınırlar (Viskoz sınırlar)

3.3.1. Dinamik Davranış Formülasyonu

Dinamik yük etkisi altındaki bir hacmin zamana bağlı hareketi için önerilen eşitlik;

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = F \qquad (3.19.)$$

şeklindedir. Burada, M, kütle matrisini, C, sönüm matrisini, K, rijitlik matrisini, F ise yük vektörünü ifade etmektedir. Ayrıca, $\ddot{u}$,ivme vektörünü, $\dot{u}$, hız vektörünü ve u ise deplasman vektörünü temsil etmekte olup, bu ifadeler zamana bağlı olarak değişebilmektedir.

Kütle matrisi, modelde yer alan (zemin, su veya yapısal elaman) gibi malzemelerin hepsinin kütlesinin hesaba katılmasıyla oluşturulurken, hesaplamalar toplanmış kütle yaklaşımına göre gerçekleştirilmektedir (Plaxis Scientific Manual, 2016).

Sönüm matrisi, bir malzemenin sönümünü temsil etmektedir. En basit şekilde açıklanmak istenirse, titreşime maruz bırakılan bir malzemede bazı etkenlerden (sürtünme, plastisite ve viskozite) dolayı enerji kayıpları ortaya çıkmaktadır. Üç farklı mekanizmaya sahip bu kayıplara sönüm adı verilmektedir.

Histerik sönüm, titreşimin frekansından bağımsız olan bu sönüm mekanizması, malzemedeki sürtünme kayıplarından ve malzemenin nonlineer gerilme deformasyon ilişkisinden dolayı oluşmaktadır.

Radyasyon sönüm, zemin ilgili problemlerde karşılaşılan bu sönüm mekanizmasında, enerji zemin içerisinde dalgalar şeklinde yayılarak sönümlenmektedir.

Viskoz sönüm, enerji kayıpları hız ile orantılı olup titreşimin frekansına bağlıdır. Zemin içerindeki boşluklardan akan sıvının viskozitesi sebebiyle oluşmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde yukarıda belirtilen sönüm mekanizmalarının tüm özelliklerini modelleyebilmek son derece güç bir işlemdir. Çünkü sönüm matrisini belirleyebilmek için gerekli ve deneylerden elde edilmesi oldukça zor olan ekstra parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu zor durumu aşmak için kullanılan en yaygın yaklaşım Rayleigh sönümüdür. Bu yöntemde, sönüm matrisi kütle ve rijitlik matrislerinin birer fonksiyonu olarak ifade edilmektedir.

$$C = \alpha_R \times M + \beta_R \times K \qquad (3.20.)$$

Burada; α_R ve β_R, Rayleigh katsayıları olarak tanımlanmakta ve bu parametrelerin seçimi kütlenin, rijitliğin ve hareketin frekansının etkisine bağlıdır. Çünkü kütle matrisinin (M) katkısı daha fazla ise (örneğin; α_R=0.01 ve β_R=0.001) hareketin daha düşük frekanslarda sönümlendiği, rijitlik matrisinin (K) katkısı daha fazla ise (örneğin; α_R=0.001 ve β_R=0.01) hareketin daha yüksek frekanslarda sönümlendiği kabul edilmektedir (Ertuğrul, 2006).

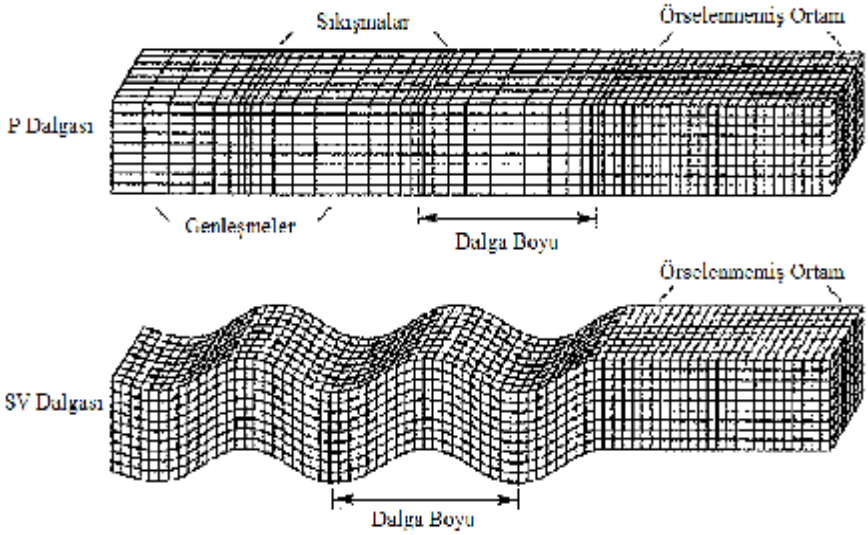
3.3.2. Dalga Hızları

Zemine bir dinamik yük (deprem gibi) etkidiğinde, cisim ve yüzey dalgaları olmak üzere bazı sismik dalgalar ortaya çıkmaktadır. P ve S dalgaları olmak üzere iki türü olan cisim dalgalarının hızları geçtikleri malzemenin rijitliğine dayalı olarak değişmektedir. Zemin türü malzemeler sıkışmaya karşı rijit

olduklarından dolayı P dalgası en hızlı hareket eden dalgadır. Bu yüzden belirli bir yüzeye önce P dalgası ulaşmaktadır.

P dalgası; birincil dalga, boyuna dalga ve basınç dalgası olarak da adlandırılmaktadır. Geçtiği tabakada sıkışma ve genişleme deformasyonuna neden olmaktadır. Malzemedeki partikül hareketi ile dalganın doğrultusu paralel olmakla birlikte, ses dalgası gibi katı ve sıvı ortamda ilerleyebilmektedir.

S dalgası; ikincil dalga; kayma dalgası olarak da adlandırılmaktadır. Geçtiği tabakada kayma deformasyonuna neden olmaktadır. Partikül hareketinin doğrultusu, S dalgasını SH ve SV olmak üzere iki bileşene ayırmak için kullanılmaktadır (Kramer, 2003).



Şekil 3.9. Cisim dalgalarının oluşturdukları deformasyon (Kramer, 2003)

Yüzey dalgaları, cisim dalgaları ile yüzey tabakalarının etkileşimi sonucu ortaya çıkan dalgalardır. Yüzey boyunca hareket ederler, büyüklükleri derinlik artıkça azalmaktadır. Mühendislik açısından en önemli yüzey dalgaları, Rayleigh ve Love dalgalarıdır.

Rayleigh dalgası, P dalgası, SV dalgası ve yüzey tabakalarının etkileşimi sonucu oluşmaktadır. Deformasyonlar, yatay ve düşey doğrultuda partikül hareketini kapsamaktadır. Göle atılan taşın ürettiği dalgaya benzetilmektedir.

Love Dalgası, SH dalgası ile yumuşak yüzey tabakalarının etkileşimi sonucu oluşmaktadır. Partikül hareketinin düşey bileşenine sahip değildir (Kramer, 2003).

Sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik analiz gerçekleştirilmek istendiğinde, ilgili malzemenin cisim dalga hızlarının (V_p ve V_s) bilinmesi gerekmektedir. Malzemenin rijitlik modülünden faydalanarak elde edilen bu parametreler aşağıda verilen eşitlikler sayesinde kolayca hesaplanabilmektedir (Plaxis Scientific Manual, 2016).

$$V_P = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}} \tag{3.21.}$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\upsilon)\times E}{(1+\upsilon)\times(1-2\times\upsilon)} \tag{3.22.}$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \tag{3.23.}$$

Burada; V_P, basınç dalga hızını, E, Young modülünü, ν, Poisson oranını, γ, malzemenin birim hacim ağırlığını, g, yer çekimi ivmesini ve E_{eod} ise tanjant modülünü ifade etmektedir.

Kayma dalga hızı (V_S) ise kayma modülü (G) yardımıyla hesaplamaktadır (Plaxis Scientific Manual, 2016).

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{3.24.}$$

$$G = \frac{E}{2\times(1+\upsilon)} \tag{3.25.}$$

3.3.3. Kritik Zaman Adımı

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan dinamik analizlerde, hesaplama sürecinin doğruluğu ve tutarlılığı için önemli olan diğer bir faktör ise zaman entegrasyonu (uyum) kavramıdır. Bu kavramın açık ve kapalı entegrasyon olmak üzere iki yaygın yaklaşımı bulunmaktadır. Açık entegrasyonun basit bir formülasyona sahip olması avantaj olarak kabul edilirken, hesaplama sürecinin çok güçlü olmaması ve kritik zaman adımına ciddi kısıtlamalar getirmesi dezavantaj olarak görülmektedir. Kapalı entegrasyon ise daha güvenilir bir hesaplama süreci ile daha doğru çözümler üretirken, bu yaklaşımın daha karmaşık bir formülasyona sahip olduğu kabul edilmektedir (Plaxis Scientific Manual, 2016).

Kapalı entegrasyon, açık entegrasyona göre daha üstün bir yaklaşımken, hesaplamalarda kullanılan zaman adımının bazı kısıtlamalara tabi olduğu da aşikârdır. Eğer zaman adımı çok büyük olursa, çözüm önemli sapmalar göstermekte ve elde edilen sonuçlar pek sağlıklı olmamaktadır. Kritik zaman adımı denilen bu zaman adımı maksimum frekansa ve sonlu elemanlar ağının sıkılığına bağlıdır ve genellikle aşağıdaki ifade ile belirlenmektedir.

$$\Delta t_{critical} = \frac{B}{\alpha\times\sqrt{\frac{(1-\upsilon)\times E}{\rho\times(1+\upsilon)\times(1-2\times\upsilon)}}\times\sqrt{1+\frac{B^4}{4\times S^2}-\frac{B^2}{2\times S}\left[1+\frac{1-2\times\upsilon}{4}\times\frac{2\times S}{B^2}\right]}}$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan B ve S ifadeleri sonlu elemanın en büyük boyutunu ve sonlu elemanın yüzey alanını göstermektedir. Birinci kök ifadesi ise Eşitlik (3.21.)'de verilen basınç dalga hızını temsil etmektedir. (α) katsayısı, eleman tipine bağlı olup, 6 düğümlü eleman için ($\alpha=1/6\sqrt{c_6}$; $c_6\approx0.051282$), 15 düğümlü eleman için ise ($\alpha=1/19\sqrt{c_{15}}$; $c_{15}\approx0.0049479$) şeklinde önerilmiştir. Yukarıdaki eşitlikte yer alan diğer belirleyici parametreler ise ν, Poisson oranı ve I_e, ortalama eleman boyudur. Bir sonlu eleman modelinde, kritik zaman adımı tüm elemanlar için minimum (Δt) değerine eşittir. Bu zaman adımı bir dalganın tek bir adım süresince bir elemanın minimum boyundan daha büyük mesafelere hareket etmediğinden emin olmak için seçilmektedir (Plaxis Scientific Manual, 2016).

3.3.4. Model Sınırları

Statik deformasyon analizlerinde, sonlu eleman modelinin sınır koşulları öntanımlı deplasmanlar tanımlanarak oluşturulmaktadır. Bu sayede, model sınırları ya tamamen serbest olarak tanımlanabilmekte ya da bir veya iki yönde tutulu olarak tanımlanabilmektedir. Ayrıca, modellenen yapının deformasyon davranışının model sınırlarından etkilenmesi için özellikle modelin düşey sınırları yapay sınır olarak oluşturulmaktadır. Diğer bir ifadeyle, bu düşey sınırlar modellenen yapının oldukça uzağında kurulmaktadır.

Dinamik deformasyon analizlerinde ise, model sınırları statik deformasyon analizlerindeki sınırlardan çok daha uzağa kurulmaktadır. Çünkü gerilme dalgalarının sınırlardan tekrar yansıyarak hesaplamalarda hatalara sebebiyet verdiği bilinmektedir. Fakat model sınırlarını modellenen yapıdan çok uzakta oluşturmanın sonlu eleman ihtiyacını arttırdığı ve bunun sonucunda ise çok daha fazla hesaplama süresine ve ek hafızaya gerek duyulduğu aşikârdır. Sonuçlarda hatalara sebep olan bu yansımaları önlemek için, model sınırlarında özel önlemler (özel sınırlar) almak gerekmektedir. Bu önlemler; yarı sonsuz elemanların kullanımı (sınır elemanları), model sınırlarındaki elemanların malzeme özelliklerinin uyarlanması (düşük rijitlik, yüksek viskozite) ve viskoz sınırların kullanımı (sönümleyiciler) şeklinde

olup, bahsedilen bu önlemlerin probleme bağlı olarak avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır (Plaxis Scientific Manual, 2016). Burada viskoz sınırların kullanımı (sönümleyiciler) konusuna değinilmiştir.

3.3.4.1. Viskoz Sınırlar (Sönümleyiciler)

Viskoz sınırlar kullanıldığında, modelin sınırlarını belirli bir yönde tutmak yerine, model sınırlarına sönümleyiciler tanımlanmaktadır. Bu sönümleyiciler sayesinde, model sınırlarına çarpan gerilme dalgaları geri yansıma olmaksızın sönümlenmektedir. X yönünde tanımlanan bir sönümleyici tarafından sönümlenen normal ve kayma gerilmeleri için aşağıdaki ifadeler verilmiştir.

$$\sigma_n = -C_1 \times \rho \times V_P \times \dot{u}_x \tag{3.26.}$$

$$\tau = -C_2 \times \rho \times V_S \times \dot{u}_y \tag{3.27.}$$

Burada; ρ, malzemenin yoğunluğunu, V_p ve V_s parametreleri ise sırasıyla basınç ve kayma dalga hızlarını ifade etmektedir. C_1 ve C_2 değerleri sönümün etkisini arttırmak için tanımlanan sönümleme katsayılarıdır. Literatürdeki çalışmalara göre, bu katsayılar için sırasıyla 1 ve 0.25 değerlerini kullanmanın model sınırlarındaki basınç ve kayma gerilme dalgalarının sönümü için oldukça makul bir yaklaşım olduğu belirtilmiştir (Plaxis Scientific Manual, 2016).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Genel

Sonlu elemanlar yöntemi, Geoteknik Mühendisliği problemlerine çözüm üretebilmek için sıklıkla başvurulan yöntemlerden birisidir. İki veya üç boyutlu olarak modellemelerin yapılabildiği bu yöntem sayesinde, laboratuvar ortamında kurulması oldukça zor olan deney düzenekleri, bilgisayar ortamında kolay bir şekilde modellenip analiz edilebilmektedir. Bu bölümde, dinamik yük etkisindeki tekil bir kazığın davranışı sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis bilgisayar yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla, farklı sıkılıktaki kum zemin koşullarında yer alan ve dinamik yük etkisindeki tekil bir kazık bilgisayar ortamında modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir.

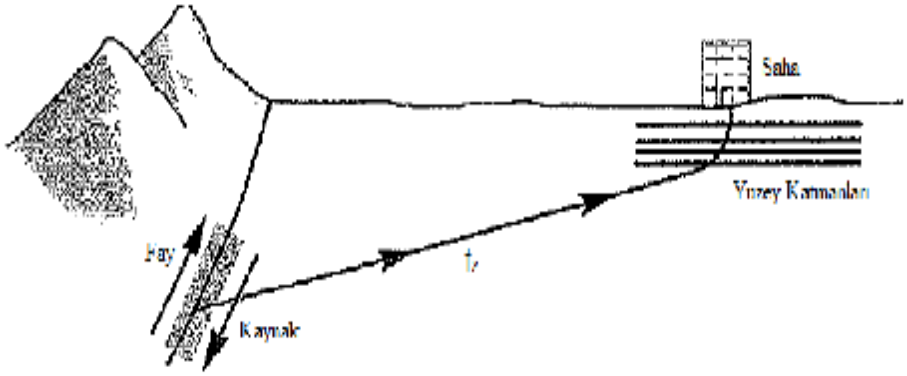
Plaxis programının dinamik analiz modülünün ürettiği sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için ilk olarak çalışmada kullanılan zeminin bir boyutlu yer tepki analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, zeminlerin bir boyutlu yer tepki analizini belirlemek amacıyla Hashash ve ark (2015) tarafından geliştirilen Deepsoil bilgisayar yazılımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Plaxis programının ürettiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4.2. Bir Boyutlu Yer Tepki Analizi

Zemin yüzeyi altında bir fay yırtıldığı zaman, cisim dalgaları kaynaktan tüm yönlere dağılırlar. Farklı birimlerin sınırlarına eriştiklerinde ise yansır ve kırılırlar. Sığ derinlikteki birimlerin dalga iletme hızları daha derinde bulunanlarınkinden genellikle daha düşük olduğundan, yatay katman sınırına çarpan eğimli dalgalar genellikle daha düşey bir konuma doğru kırılırlar. Dalganın zemin yüzeyine ulaşana kadar birçok kez yansıması, çoğu zaman onun düşeye yakın yönde kırılmasına neden olur (Şekil 4.1).

Bir boyutlu yer tepki analizleri, tüm sınırların yatay olduğu ve zeminin tepkisine egemen olarak ana kayadan düşey yönde yayılan SH (kayma dalgasının

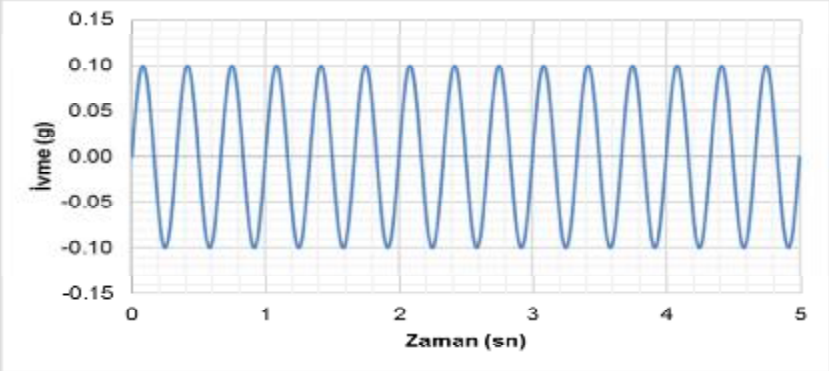
düşey bileşeni) dalgalarının neden olduğu varsayımına dayanmaktadır (Kramer, 2003).



Şekil 4.1. Zemin yüzeyine yakın kesimde düşey dalga yayılması (Kramer, 2003)

Bir boyutlu yer tepki analizlerinde zemin ve ana kaya yüzeylerinin yatay yönde sonsuz uzanımlı olduğu kabul edilmektedir. Bu varsayıma dayalı yöntemlerle elde edilen zemin tepkilerinin birçok deprem sırasında ölçülmüş tepki ile makul bir uyum sergilediği belirtilmiştir (Kramer, 2003).

Deepsoil ve Plaxis bilgisayar yazılımları ile gerçekleştirilen bir boyutlu yer tepki analizlerinde, maksimum genliğin 0.1g ve frekansın 3 Hz olduğu sinüzoidal bir yer hareketi 5 saniye boyunca zemin tabanına etki ettirilmiştir (Şekil 4.2). Bu süre zarfında, maksimum ivme değerine ulaşılmıştır. Dolayısıyla, analiz süresi daha fazla uzatılmamıştır.



Şekil 4.2. Analizlerde kullanılan sinüzoidal yer hareketi

Tabanında rijit bir ana kayanın olduğu kum zemin profili 8m derinliğe sahiptir ve bu derinlik boyunca zemin profilinde başka herhangi bir tabaka bulunmamaktadır. Deepsoil programında kullanılan kum zemine ait parametreler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deepsoil programında kullanılan kum zemin özellikleri

Parametre	Kum Zemin
Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (kN/m^3)	18.0
Kayma Dalga Hızı, V_s (m/sn)	104.4
Young Modülü, E (kN/m^2)	48000
Sönüm Oranı, ξ (%)	5.0

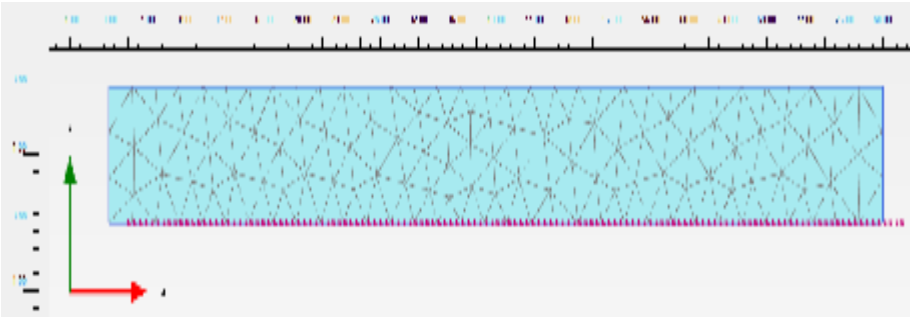
Plaxis programında gerçekleştirilen yer tepki analizi için model, düşey yönde 8m, yatay yönde ise 80m olacak şekilde oluşturulmuştur. Yatay yöndeki 80m genişlik seçilmeden önce, farklı yatay genişlikler (50m, 60m, 70m, 80m, 90m ve 100m) kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda, yatay genişliğin 80m'den daha büyük olduğu durumlarda model sınırlarının etkisi gözlenmemiştir. Dolayısıyla modelin yatay genişliği 80m olarak belirlenmiştir. Yatay yönde modelin bu kadar büyük oluşturulmasının sebebi dinamik analizlerde model sınırlarının etkisinden kaçınmaktır. Ayrıca modelin düşey sınırlarında

kaynaktan gelen dalgaların sönümlenmesi için viskoz sınırlar tanımlanmıştır. Plaxis analizlerinde lineer elastik–tam plastik (MC) malzeme modeli kullanılırken, bu modelin gerektirdiği parametreler aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.2. Plaxis programında kullanılan kum zemin özellikleri

Parametre	Kum Zemin
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (kN/m^3)	20.0
Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (kN/m^3)	18.0
Young Modülü, E (kN/m^2)	48000
İçsel sürtünme açısı, φ (°)	38
Kohezyon, c (kN/m^2)	0.1
Sönüm Oranı, ξ (%)	5.0
Poisson Oranı, ν	0.2

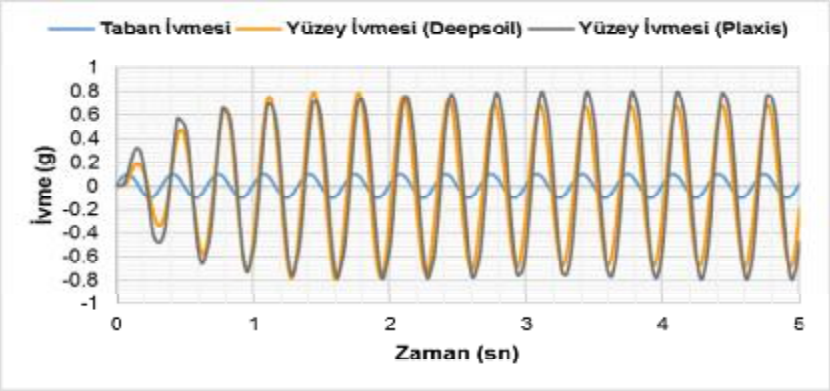
Analizlerde, ağ sıkılığının etkisinden kaçınabilmek için sonlu elemanlar ağı "çok sıkı" şekilde oluşturulmuştur (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Plaxis sonlu elemanlar ağı

Deepsoil ve Plaxis programlarından elde edilen analiz sonuçları incelendiğinde, zemin yüzeyinde hesaplanan maksimum ivme değerinin zemin tabanındaki maksimum ivme değerinden yaklaşık 8 kat daha fazla olduğu her iki programda da gözlenmiştir (Şekil 4.4). Zemin yüzeyinde elde edilen maksimum

ivme değeri, Deepsoil programında yaklaşık 0.79g olarak hesaplanırken, Plaxis programında ise bu değer yaklaşık 0.80g olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. Deepsoil ve Plaxis yer tepki analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Yukarıdaki şekilden anlaşıldığı üzere, Deepsoil ve Plaxis programlarının zemin davranışını benzer şekilde ortaya koydukları ve bunun sonucunda ise Plaxis programının dinamik analiz modülünün ürettiği çözümün yeterince iyi olduğu gözlenmiştir.

4.3. İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi

Bu çalışma boyunca sonlu elemanlar yöntemine dayalı iki boyutlu Plaxis bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu program sayesinde dinamik yük etkisindeki tekil bir kazığın davranışı incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde;

- zemin sıkılığının etkisi,
- dinamik yükün frekansının ve genliğinin etkisi,
- kazık başlığının etkisi,
- kazık rijitliğinin etkisi,
- kazık sünekliğinin etkisi,

gibi kazıkların dinamik davranışında etkili olan parametreler farklı malzeme modelleri (Mohr-Coulomb ve Hardening Soil) kullanılarak incelenmiş ve sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur. İlk olarak, iki farklı sıkılıktaki kum zemin sonlu elemanlar modelinde herhangi bir yapısal eleman olmaksızın modellenmiş ve zemin sıkılığının kaynaktan gelen dalganın genliğine ve zemin yüzeyinde oluşan deplasmanlara etkisi incelenmiştir.

4.3.1. Zemin Sıkılığının Etkisinin İncelenmesi

Analizlerde gevşek koşullar için %30 rölatif sıkılığa, sıkı koşullar içinse %80 rölatif sıkılığa sahip kum zemin dikkate alınmıştır (Çizelge 4.3). Analizler kuru zemin koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan model, sınır etkisinden kaçınmak amacıyla düşey yönde 8m, yatay yönde ise 80m olacak şekilde oluşturulmuştur. Ayrıca modelin düşey sınırlarında kaynaktan gelen dalgaların sönümlenmesi için viskoz sınırlar tanımlanmıştır.

Analizlerde kullanılan sinüzoidal yer hareketinin maksimum genliği 0.1g, frekansı ise gevşek koşullar için 2.12 Hz, sıkı koşullar için 3.26 Hz olarak belirlenmiştir. Bu frekans değerleri her iki zemin sıkılığının kendi rezonans frekansları olup, bu sinüzoidal yer hareketi 5 saniye boyunca zemin tabanına etki ettirilmiştir. Analizlerin rezonans frekansında gerçekleştirilmesinin sebebi, zeminde oluşan maksimum deplasmanların ve gerilmelerin, yer hareketinin frekansı ile zeminin doğal frekansının ($w/w_n=1$) aynı olduğu durumda yani rezonans durumunda ortaya çıkmasındandır. Zeminlerin doğal frekansı, zeminin kayma dalga hızının tabaka kalınlığının 4 katına bölünmesi ile elde edilmektedir.

$$w_n = \frac{V_s}{4 \times H} \tag{4.1.}$$

Burada; V_s, zeminin kayma dalga hızını, H ise zeminin tabaka kalınlığını göstermektedir.

Çizelge 4.3. Farklı rölatif sıkılıktaki zeminlerin sınıflandırılması (Coduto, 2006)

Rölatif Sıkılık	Sınıflama
0-15	Çok gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta Sıkı
65-85	Sıkı
85-100	Çok sıkı

Analizlerde iki farklı malzeme modeli kullanılmış olup gevşek (%30) ve sıkı kum (%80) zemin koşullarına ait zemin parametreleri Bölüm 3.2'de detaylı olarak incelen eşitliklerden faydalanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Mohr-Coulomb zemin modeli parametreleri

Parametre	Gevşek (%30)	Sıkı (%80)
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (kN/m^3)	19.0	20.0
Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (kN/m^3)	16.0	18.0
Young Modülü, E (kN/m^2)	18000	48000
İçsel sürtünme açısı, φ (°)	32	38
Dilatasyon açısıs, ψ (°)	2	8
Kohezyon, c (kN/m^2)	0.1	0.1
Sönüm Oranı, ξ (%)	5.0	5.0
Poisson Oranı, ν	0.2	0.2

Çizelge 4.5. Hardening Soil zemin modeli parametreleri

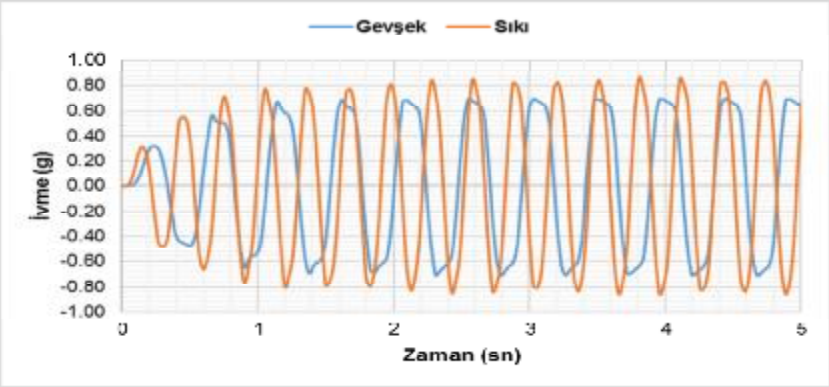
Parametre	Gevşek (%30)	Sıkı (%80)
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (kN/m^3)	19.0	20.0
Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (kN/m^3)	16.0	18.0
Sekant modülü, E_{50} (kN/m^2)	18000	48000
Tanjant modülü, E_{eod} (kN/m^2)	18000	48000
Boşaltma/tekrar yükleme modülü, E_{ur} (kN/m^2)	54000	144000
Kayma modülü, G_{ref} (kN/m^2)	80400	114400
İçsel sürtünme açısı, φ (°)	32	38
Dilatasyon açısı, ψ (°)	2	8
Kohezyon, c (kN/m^2)	0.1	0.1
Sönüm Oranı, ξ (%)	5.0	5.0
Poisson Oranı, ν	0.2	0.2
Eşik kayma gerilmesi, $\gamma_{0.7}$ (kN/m^2)	0.00017	0.00012
Rijitlik oranı, m	0.60	0.45
Göçme oranı, R_f	0.9625	0.9000

Şekil 4.5'te zemin sıkılığının etkisini incelemek için oluşturulan sonlu elemanlar modeli ve düşey sınırlarda tanımlanan viskoz sınırlar gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Sonlu elemanlar modeli ve viskoz sınırlar (sönümleyici sınırlar)

Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanıldığı analiz sonuçlarına göre, zemin sıkılığının yer hareketi üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Zemin yüzeyindeki (40.0 8.0 noktasında) maksimum ivme değeri gevşek koşullarda yaklaşık 0.70g iken, sıkı koşullarda ise bu değer yaklaşık 0.87g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman grafiği–(MC)

Zemin yüzeyindeki maksimum deplasman değeri gevşek koşullarda yaklaşık 12.5cm iken, sıkı koşullarda bu değer yaklaşık 7.2cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Zemin yüzeyinde elde edilen deplasman-zaman grafiği–(MC)

Rezonans frekanslarındaki maksimum genlik değerinin sıkı koşullarda daha fazla olmasına rağmen oluşan deplasmanların gevşek koşullarındakinin yaklaşık yarısı kadar olması, zemin sıkılığının dinamik davranış için önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

Hardening Soil zemin modelinin kullanıldığı analiz sonuçlarında ise, zemin yüzeyindeki (40.0 8.0 noktasında) maksimum ivme değeri gevşek koşullarda yaklaşık 0.47g iken, sıkı koşullarda ise bu değer yaklaşık 0.52g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.8). Her iki model için elde edilen zemin davranışı genel olarak benzerlik gösterse de hesaplanan genlik değerlerinde farklılık bulunmaktadır.



Şekil 4.8. Zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman grafiği–(HS)

Zemin yüzeyindeki maksimum deplasman değeri gevşek koşullarda yaklaşık 10.4cm iken, sıkı koşullarda bu değer yaklaşık 6.5cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.9). Mohr-Coulomb zemin modelinde olduğu gibi, sıkı koşullarda elde edilen maksimum deplasmanlar gevşek koşullardan daha azdır.



Şekil 4.9. Zemin yüzeyinde elde edilen deplasman-zaman grafiği–(HS)

Sonuç olarak, zemin sıkılığı arttıkça kaynaktan gelen dalgaların genliği zemin yüzeyine ulaşana dek artsa da, buna karşılık zemin yüzeyinde oluşan deplasmanlar ciddi derecede azaltmaktadır.

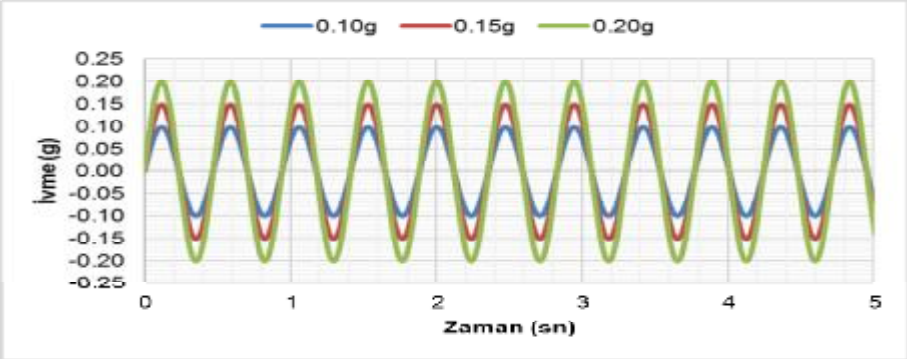
Bölüm 2.2.5'te detaylı olarak sunulan deneysel bir çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, Zhang ve ark. (2008), zemin sıkılığının yer hareketi üzerindeki etkisini incelemek için herhangi bir yapısal eleman olmadan, gevşek (%27) ve sıkı (%73) kum zemin koşullarında sarsma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Farklı derinliklerdeki ivmeölçerlerden elde ettikleri sonuçlara göre, sıkı kumda oluşan maksimum ivme değerinin gevşek kumda oluşan maksimum ivme değerinden daha büyük olduğunu gözlemişlerdir. Bunun sonucunda, zemin sıkılığının yer hareketi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

4.3.2. Dinamik Yükün Frekansının ve Genliğinin Etkisinin İncelenmesi

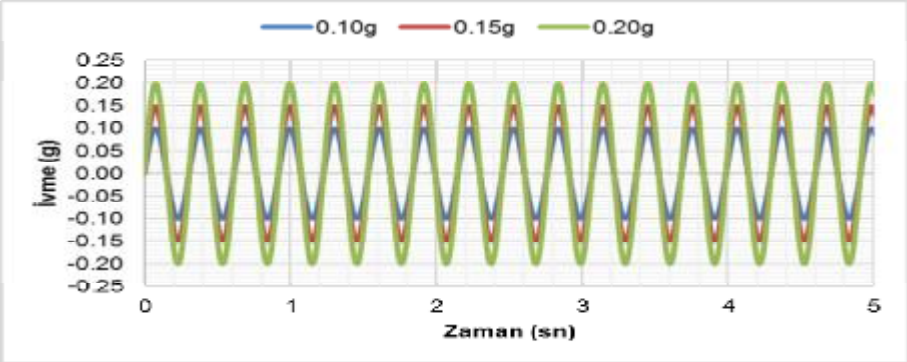
4.3.2.1. Dinamik Yükün Genliğinin Etkisi

Dinamik yükün genliğinin tekil bir kazıkta oluşan deplasmanlara ve ivme değerlerine olan etkisini incelemek için farklı genliklerdeki sinüzoidal bir yer hareketi kullanılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde üç farklı genlikteki (0.10g, 0.15g ve 0.20g) yer hareketi, gevşek (%30) ve sıkı (%80) koşullar için her

birinin kendi rezonans frekanslarında (gevşek için 2.12 Hz, sıkı için 3.26 Hz) olmak üzere 5 saniye boyunca zemin tabanına etki ettirilmiştir.



Şekil 4.10. Gevşek kum zemin için rezonans frekansındaki sinüzoidal yer hareketi



Şekil 4.11. Sıkı kum zemin için rezonans frekansındaki sinüzoidal yer hareketi

İki boyutlu sonlu elemanlar modeli, problemin uygunluğu açısından eksenel simetrik olarak oluşturulmuş ve analizlerde kullanılan kazık elemanın özellikleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

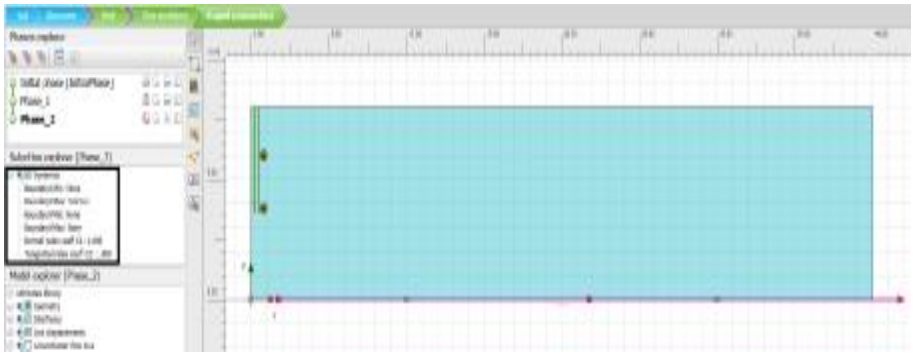
Çizelge 4.6. Kazık elemanın malzeme parametreleri

Parametre	Kazık Eleman
Malzeme modeli	Lineer Elastik
Beton birim hacim ağırlık, γ_b (kN/m^3)	24.0
Young Modülü, E (MPa)	30000
Poisson oranı, ν	0.2
Sönüm Oranı, ξ (%)	5.0

Kazık boy/çap oranının 10 ve kazık çapının 0.4m olarak belirlendiği analizlerde, model sınırları düşeyde 8m yatayda ise 40m olarak oluşturulmuştur. Model sınırları oluşturulurken bir seri analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçların düşey sınırlardan etkilenmediği 40m'lik yatay uzunluk seçilmiştir. Ayrıca, eksenel simetrik modelde kazık elemanın uzak olduğu düşey sınıra viskoz sınır tanımlanmıştır.

Kazık ile zemin arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde modelleyebilmek için beton kazık ve kum zemin arasındaki etkileşim için sonlu elemanlar programının kılavuzunda önerilen ve kum zeminin sıkılığına göre 1.0 ile 0.8 aralığında değişebilen ara yüz eleman, gevşek koşullar için 0.85, sıkı koşullar için 0.95 olarak tanımlanmıştır.

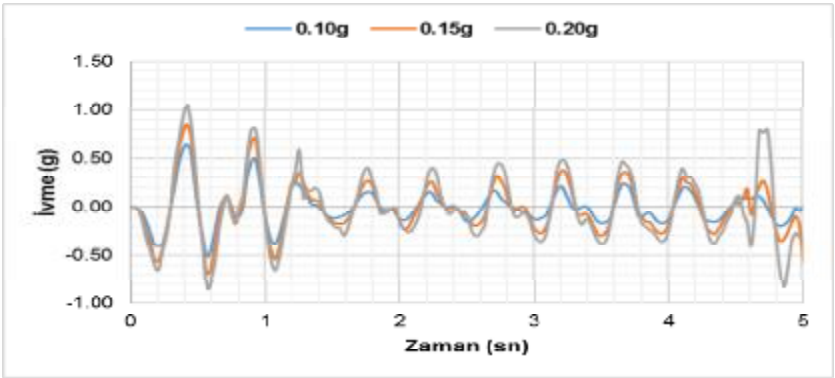
Sonlu elemanlar analizinin hesaplama kısmı 3 aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada başlangıç koşulları oluşturulurken, ikinci aşamada kazık eleman ile ara yüz eleman tanımlanmış olup bu aşamalar plastik analizdir. Üçüncü ve son aşamada ise yer hareketi zemin tabanına etki ettirilmiştir. Bu aşama ise hesaplamanın dinamik analiz kısmıdır.



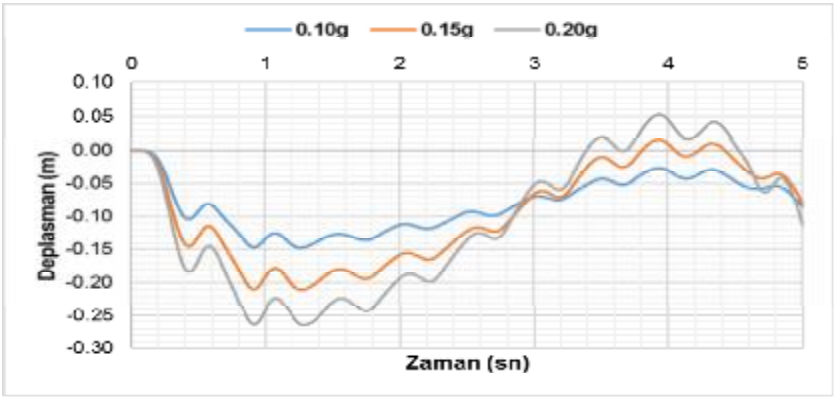
Şekil 4.12. Kazık eleman ve eksenel simetrik sonlu elemanlar modeli

Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanıldığı gevşek kum zemin koşullarında gerçekleştirilen analiz sonuçları incelendiğinde, zemin tabanına etki ettirilen yer hareketinin genliğinin, kazık başında oluşan ivmelenmeye ve deplasmanlara önemli derecede etkisi olduğu gözlenmiştir.

Yer hareketinin maksimum genliğinin 0.10g, 0.15g ve 0.20g olduğu durumlar için kazık başlarında oluşan maksimum ivme değerleri sırasıyla yaklaşık 0.65g, 0.85g ve 1.05g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.13). Aynı şekilde, yer hareketinin maksimum genliğinin 0.10g, 0.15g ve 0.20g olduğu durumlar için kazık başlarında oluşan maksimum düşey deplasmanlar sırasıyla yaklaşık 15cm, 20cm, ve 25cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.14).

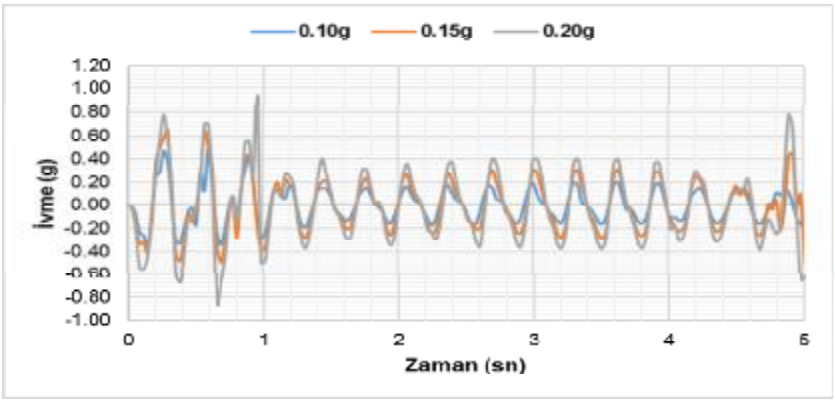


Şekil 4.13. Gevşek koşullar için kazık başındaki ivme-zaman grafiği–(MC)

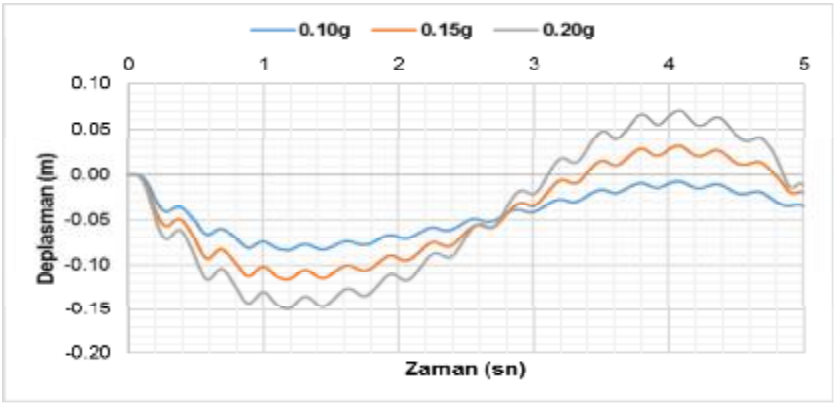


Şekil 4.14. Gevşek koşullar için kazık başındaki deplasman-zaman grafiği–(MC)

Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanıldığı sıkı kum zemin koşullarında gerçekleştirilen analiz sonuçları incelendiğinde, yer hareketinin maksimum genliğinin 0.10g, 0.15g ve 0.20g olduğu durumlar için kazık başlarında oluşan maksimum ivme değerleri sırasıyla yaklaşık 0.50g, 0.65g ve 0.93g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.15). Aynı şekilde yer hareketinin maksimum genliğinin 0.10g, 0.15g ve 0.20g olduğu durumlar için kazık başlarında oluşan maksimum düşey deplasmanlar ise sırasıyla yaklaşık 8.3cm, 11.6cm, ve 14,8cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.15. Sıkı koşullar için kazık başındaki ivme-zaman grafiği–(MC)



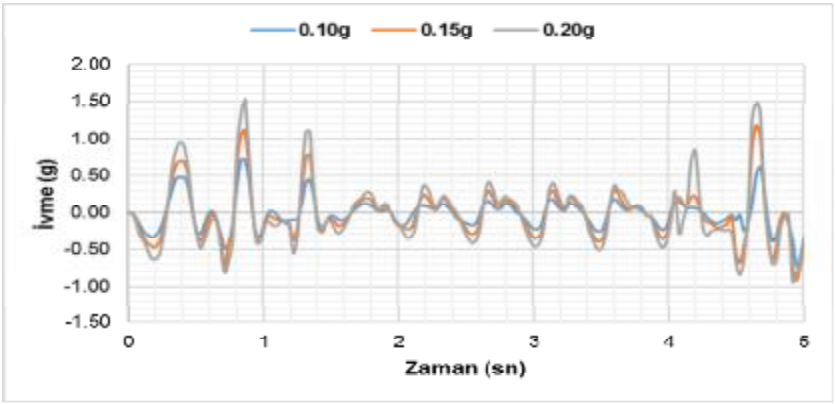
Şekil 4.16. Sıkı koşullar için kazık başındaki deplasman-zaman grafiği–(MC)

Sonuç olarak, Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalarda, sıkı koşullarda kazık başında oluşan düşey deplasmanların gevşek koşullar ile kıyaslandığında önemli derecede daha düşük olduğu gözlenmiştir.

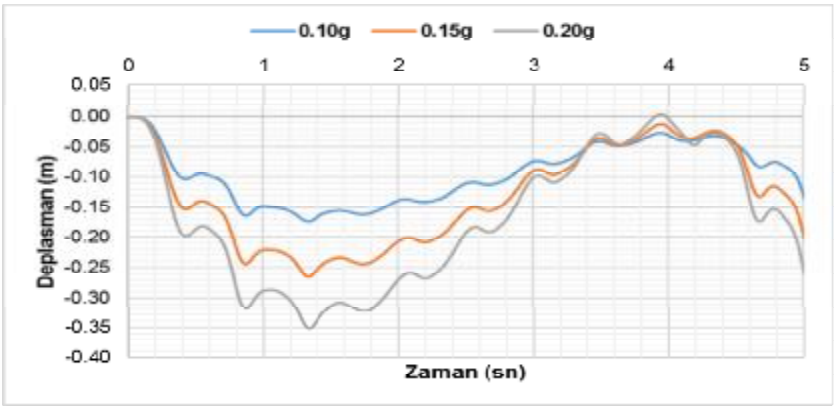
Kazık elemanda oluşan deplasmanlar Hardening Soil zemin modeli ile de incelenmiştir. Bu zemin modelinin kullanıldığı gevşek kum zemin koşullarında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, rezonans frekans durumunda yer hareketinin genliğinin artmasıyla kazık başında meydana gelen ivmelenmeler ve buna bağlı olarak da deplasmanlar artmaktadır.

Yer hareketinin maksimum genliğinin 0.10g, 0.15g ve 0.20g olduğu durumlar için kazık başlarında oluşan maksimum ivme değerleri sırasıyla yaklaşık 0.71g, 1.18g ve 1.51g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.17). Aynı şekilde, yer hareketinin maksimum genliğinin 0.10g, 0.15g ve 0.20g olduğu durumlar için kazık başlarında oluşan maksimum düşey deplasmanlar sırasıyla yaklaşık 17.5cm, 26.4cm, ve 35.1cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.18).

Gevşek kum zemin koşullarında ve yer hareketinin farklı genlikleri için gerçekleştirilen analizlerde, Hardening soil zemin model ile hesaplanan kazık başındaki maksimum ivme değerleri, Mohr-Coulomb zemin modeli ile hesaplanan maksimum ivme değerlerinden daha büyüktür ve bunun sonucunda elde edilen deplasman değerleri bu modelde daha fazladır.



Şekil 4.17. Gevşek koşullar için kazık başındaki ivme-zaman grafiği–(HS)

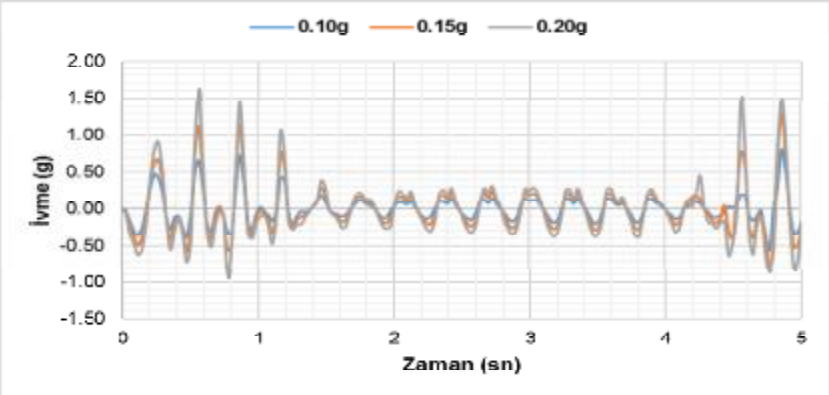


Şekil 4.18. Gevşek koşullar için kazık başındaki deplasman-zaman grafiği–(HS)

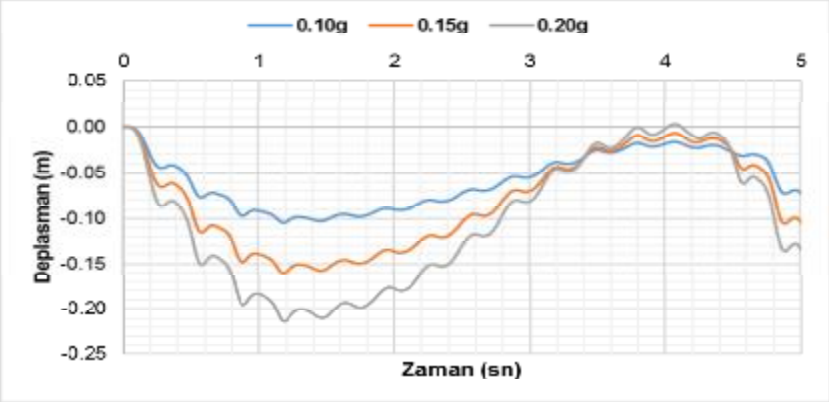
Hardening Soil malzeme modelinin kullanıldığı sıkı kum zemin koşullarında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, rezonans frekans durumunda, yer hareketinin genliğinin artmasıyla kazık başında meydana gelen ivmelenmeler ve buna bağlı olarak da deplasmanlar artmaktadır.

Yer hareketinin maksimum genliğinin 0.10g, 0.15g ve 0.20g olduğu durumlar için kazık başlarında oluşan maksimum ivme değerleri sırasıyla yaklaşık 0.80g, 1.30g ve 1.62g olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.19). Aynı şekilde, yer hareketinin maksimum genliğinin 0.10g, 0.15g ve 0.20g olduğu durumlar için

kazık başlarında oluşan maksimum düşey deplasmanlar sırasıyla yaklaşık 10.5cm, 15.7cm, ve 20.9cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.20).



Şekil 4.19. Sıkı koşullar için kazık başındaki ivme-zaman grafiği–(HS)



Şekil 4.20. Sıkı koşullar için kazık başındaki deplasman-zaman grafiği–(HS)

Hardening Soil zemin modeli kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalarda, sıkı koşullarda kazık başında oluşan düşey deplasmanların gevşek koşullar ile kıyaslandığında önemli derecede daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak, yer hareketinin genliğinin kazık davranışı üzerindeki etkisinin incelendiği bu bölümde, rezonans frekans durumunda yer hareketinin genliğinin artması ile kazık başında elde edilen hem maksimum ivme değerinin

hem de düşey deplasmanın arttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak, zemin sıkılığının kazıkta oluşan deplasmanları azaltmada olumlu bir etkisi olduğu hem Mohr-Coulomb zemin modeli ile hem de Hardening Soil zemin modeli gerçekleştirilen analizlerde görülmüştür.

4.3.2.2. Dinamik Yükün Frekansının Etkisi

Dinamik yükün frekansının tekil bir kazıkta oluşan düşey deplasmanlara etkisini incelemek için, farklı "w/w_n" oranlarına sahip sinüzoidal bir yer hareketi kullanılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde beş farklı w/w_n (0.50, 0.75, 1, 1.25 ve 1.5) oranlarına sahip yer hareketinin maksimum genliği 0.1g olup, hem gevşek (%30) hem de sıkı (%80) kum zemin koşulları için 5 saniye boyunca zemin tabanına etki ettirilmiştir.

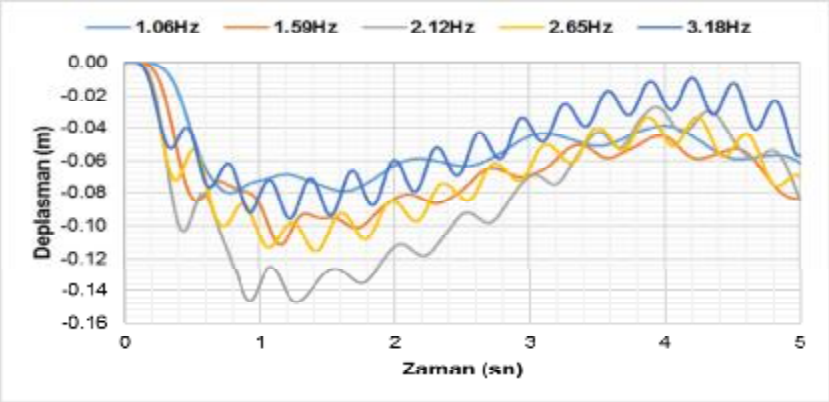
Çizelge 4.7. Farklı "w/w_n" oranları için yer hareketinin frekansları

Genlik	w/w_n	Gevşek kum için dinamik yükün frekansları	Sıkı kum için dinamik yükün frekansları
0.1g	0.50	1.06	1.63
0.1g	0.75	1.59	2.45
0.1g	1.00 (rezonans)	2.12	3.26
0.1g	1.25	2.65	4.08
0.1g	1.50	3.18	4.89

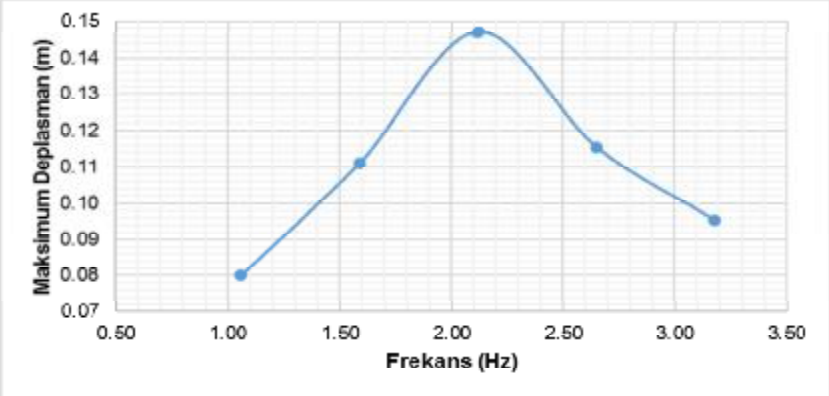
Yukarıdaki verilen çizelge, gevşek ve sıkı kum zemin koşullarında farklı "w/w_n" oranları için hesaplanan ve zemin tabanına etki ettirilen sinüzoidal yer hareketinin frekanslarını göstermektedir. Bu frekans değerleri kullanılarak bir dizi analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur.

Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanıldığı ve gevşek kum zemin koşulları için gerçekleştirilen analizlere göre, kazık başında oluşan en büyük düşey

deplasmanların yer hareketinin frekansının zeminin doğal frekansına eşit olduğu yani rezonans frekans durumunda ortaya çıktığı gözlenmiştir (Şekil 4.21-22).

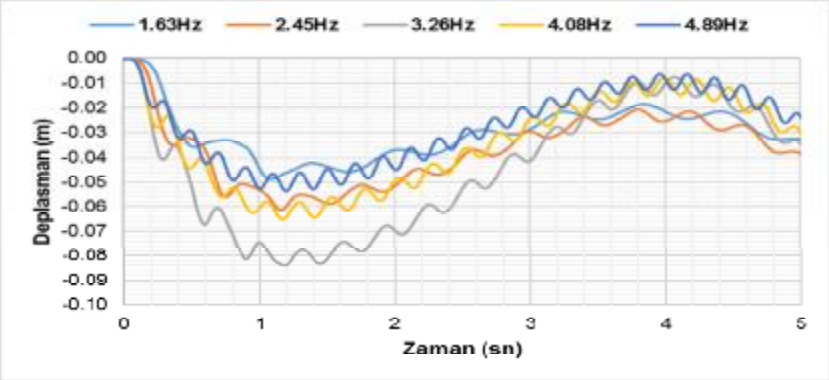


Şekil 4.21. Gevşek koşullarda farklı frekanslar için düşey deplasmanlar–(MC)

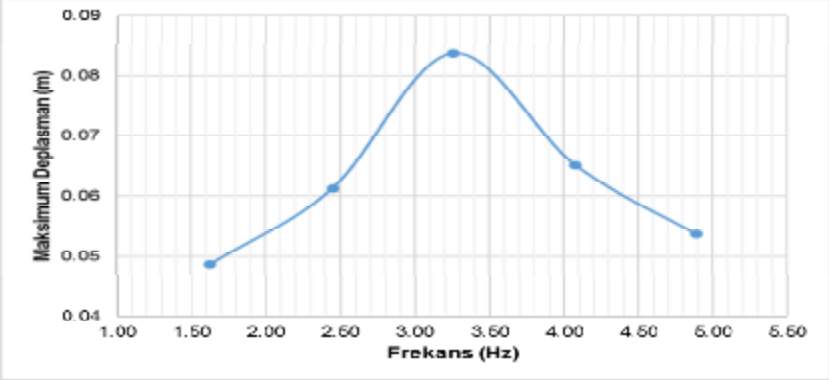


Şekil 4.22. Gevşek koşullarda farklı frekanslar için maksimum deplasmanlar–(MC)

Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanıldığı ve sıkı kum zemin koşulları için gerçekleştirilen analizlere göre, kazık başında oluşan en büyük düşey deplasmanların yer hareketinin frekansının zeminin doğal frekansına eşit olduğu yani rezonans frekans durumunda ortaya çıktığı gözlenmiştir (Şekil 4.23-24).

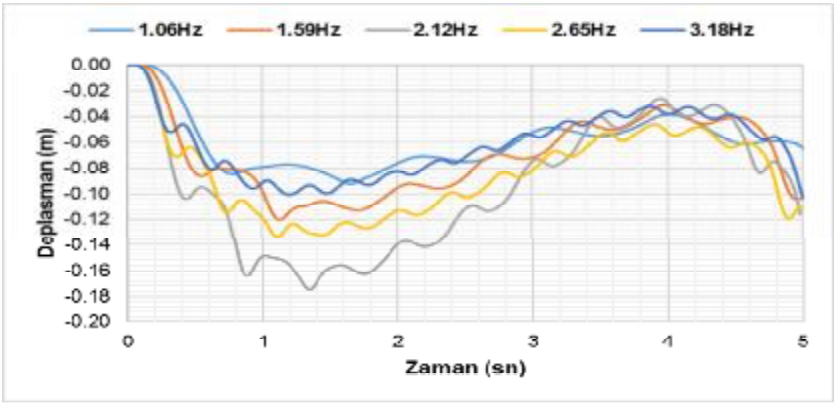


Şekil 4.23. Sıkı koşullarda farklı frekanslar için düşey deplasmanlar–(MC)

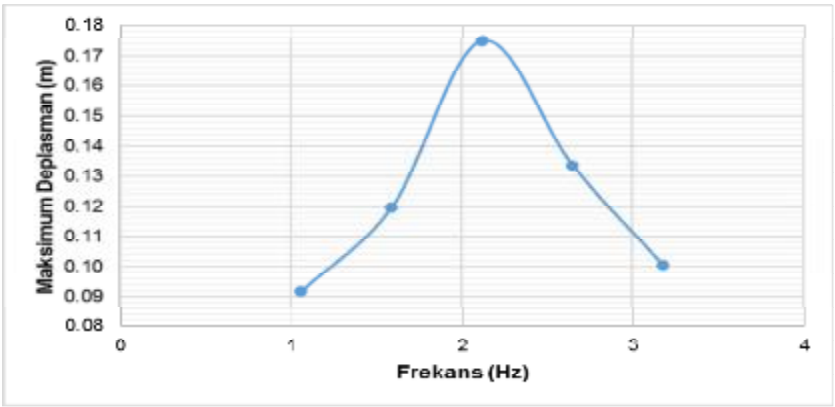


Şekil 4.24. Sıkı koşullarda farklı frekanslar için maksimum deplasmanlar–(MC)

Hardening Soil zemin modelinin kullanıldığı ve gevşek kum zemin koşulları için gerçekleştirilen analizlere göre, kazık başında oluşan en büyük düşey deplasmanların yer hareketinin frekansının zeminin doğal frekansına eşit olduğu yani rezonans frekans durumunda ortaya çıktığı gözlenmiştir (Şekil 4.25-26).

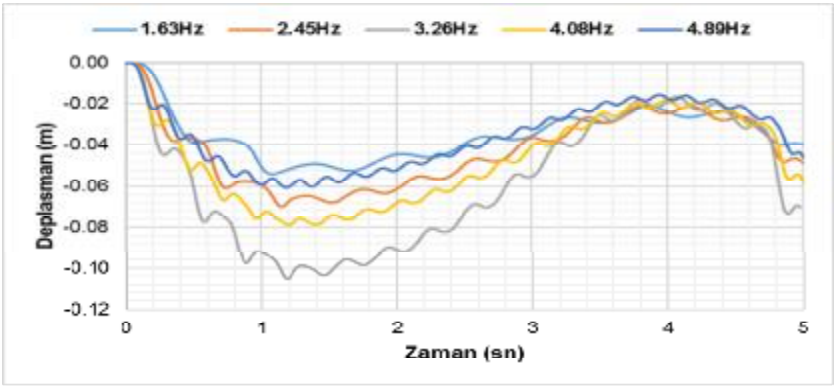


Şekil 4.25. Gevşek koşullarda farklı frekanslar için düşey deplasmanlar–(HS)

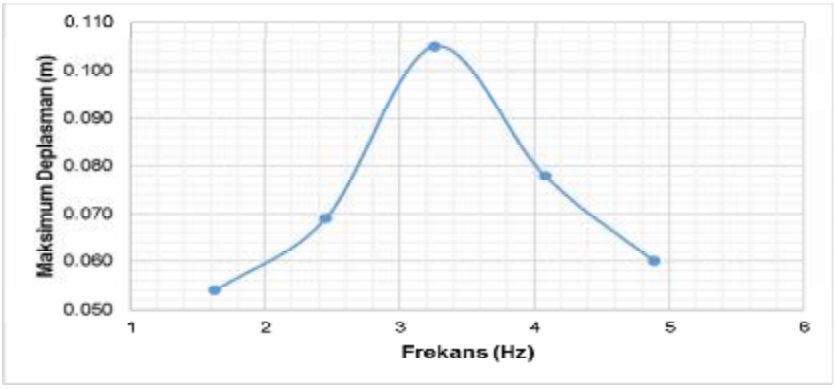


Şekil 4.26. Gevşek koşullarda farklı frekanslar için maksimum deplasmanlar–(HS)

Hardening soil zemin modelinin kullanıldığı ve sıkı kum zemin koşulları için gerçekleştirilen analizlere göre, kazık başında oluşan en büyük düşey deplasmanların yer hareketinin frekansının zeminin doğal frekansına eşit olduğu yani rezonans frekans durumunda ortaya çıktığı gözlenmiştir (Şekil 4.27-28).



Şekil 4.27. Sıkı koşullarda farklı frekanslar için düşey deplasmanlar–(HS)



Şekil 4.28. Sıkı koşullarda farklı frekanslar için maksimum deplasmanlar–(HS)

Analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yer hareketinin frekansının zeminin doğal frekansından büyük ya da küçük olması durumlarında kazık başında oluşan deplasmanların artmadığı aksine azaldığı sonucuna varılmıştır. Bunun sonucunda, dinamik davranışta en kritik durumun rezonans frekans durumu olduğu ve dinamik yüke maruz kalması beklenen tekil bir kazığın tasarımını, bu durumu dikkate alarak gerçekleştirmenin daha doğru bir yaklaşım olacağı önerilmektedir.

4.3.3. Kazık Başlığının Etkisinin İncelenmesi

Dinamik yük etkisindeki tekil bir kazığın başlık ile birlikte üretilmesinin, kazıkta meydana gelen düşey yöndeki deplasmanlara olan etkisini incelemek amacıyla, hem gevşek hem de sıkı kum zemin koşulları için bir dizi sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.29). Analizlerde kullanılan yer hareketinin frekansı, her iki zemin sıkılığı için de kendi rezonans frekans değerleri olup, maksimum genliği 0.1g olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu yer hareketi 5 saniye boyunca zemin tabanına etki ettirilmiştir.



Şekil 4.29. Kazık başlığının etkisi için oluşturulan sonlu elemanlar modeli

Kazık başlığının malzeme özellikleri kazık elemanın malzeme özellikleri ile aynı olup, modelin eksenel simetrik olmasından dolayı kazık başlığı 0.5m yarı çapa ve 0.2m kalınlığa sahiptir.

Analizler, hem Mohr-Coulomb zemin modeliyle hem de Hardening Soil zemin modeliyle gerçekleştirilmiş olup, analizlerde gevşek ve sıkı kum zemin koşulları dikkate alınmıştır. Her iki model için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, genel olarak kazık başlığının düşey yönde meydana gelen deplasmanları azalttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla, kazık başlığının dinamik yük etkisindeki tekil bir kazıkta oluşan düşey deplasmanları azaltmada önemli bir etken olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.30. Mohr-Coulomb zemin modeli ve gevşek kum zemin koşulları

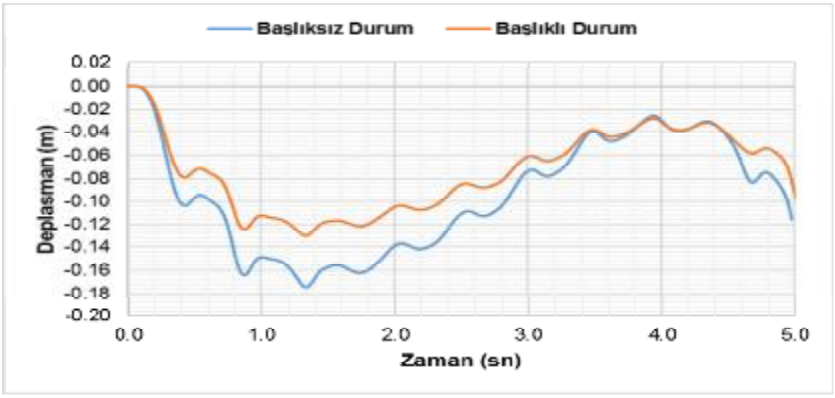


Şekil 4.31. Mohr-Coulomb zemin modeli ve sıkı kum zemin koşulları

Mohr-Coulomb zemin modeli için elde edilen grafikler incelendiğinde, gevşek kum zemin koşullarında kazık başlığı olmaksızın elde edilen maksimum düşey deplasman yaklaşık 15cm iken, kazığın başlıklı olması durumunda bu değer yaklaşık 11cm'ye kadar düşmektedir (Şekil 4.30). Sıkı kum koşullarında ve başlaksız durumda maksimum düşey deplasman yaklaşık 8.3cm iken, başlıklı durumda bu değer yaklaşık 6.5cm'ye kadar düşmektedir (Şekil 4.31).

Hardening Soil zemin modeli için elde edilen grafikler incelendiğinde, gevşek kum zemin koşullarında kazık başlığı olmaksızın elde edilen maksimum düşey deplasman yaklaşık 17.5cm iken, kazık başlıklı olması durumunda bu değer yaklaşık 13cm'ye kadar düşmektedir (Şekil 4.32). Sıkı kum koşullarında ve

başlıksız durumda maksimum düşey deplasman yaklaşık 10.5cm iken, başlıklı durumda bu değer yaklaşık 8cm'ye kadar düşmektedir (Şekil 4.33).



Şekil 4.32. Hardening Soil zemin modeli ve gevşek kum zemin koşulları



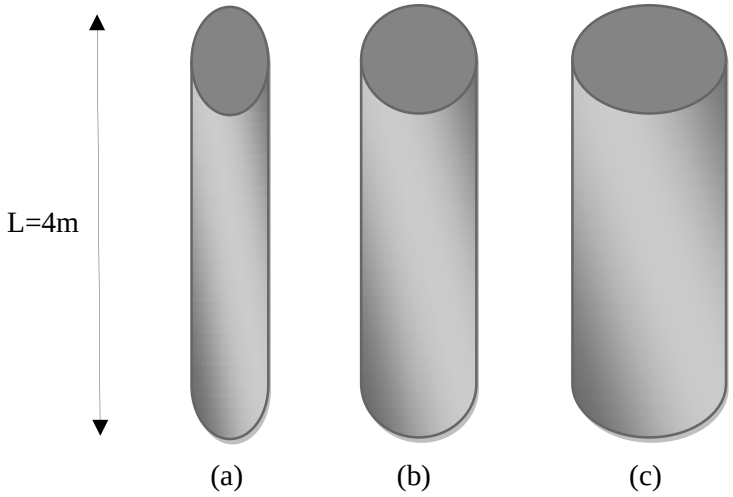
Şekil 4.33. Hardening Soil zemin modeli ve sıkı kum zemin koşulları

Bölüm 2.2.7'de detaylı olarak sunulan deneysel bir çalışmada, Ünsever (2015), 3x1 yerleşim düzenine sahip eksenel yük etkisindeki kazık grubunun radyeli ve radyesiz durumdaki davranışını incelemek için bir dizi sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Her iki durum için gerçekleştirilen sarsma işlemi sonucunda, radyeli durumda elde edilen oturma değerleri radyesiz durumdan neredeyse yarısı kadar daha düşüktür. Bunun sonucunda, radyenin kazıklarda meydana gelen oturmaları ciddi şekilde azalttığı ifade edilmiştir.

4.3.4. Kazık Rijitliğinin Etkisinin İncelenmesi

Bir malzemenin geometrik boyutları, o malzemenin sünekliğini veya rijitliğini belirleyen önemli parametrelerden birisidir. Bu bölümde, kazık rijitliğinin etkisini incelemek için gerçekleştirilen analizlerde kazık boyu sabit tutulurken (L=4m), kazık çapı için 3 farklı değer (B=0.4m, 0.5m ve 0.6m) dikkate alınmıştır. Bu sayede, kazık boyunun kazık çapına oranı azaltılmış ve kazık eleman sadece geometrik boyutlar değiştirilerek daha rijit bir malzeme haline getirilmiştir.

Sonlu elemanlar analizi, hem gevşek kum zemin koşullarında hem de sıkı kum zemin koşullarında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan sinüzoidal yer hareketinin maksimum ivme değeri 0.1g iken, yer hareketinin frekansı için her iki zemin koşulunun kendi rezonans frekansları kullanılmış ve bu yer hareketi zemin tabanına 5 saniye boyunca etki ettirilmiştir.

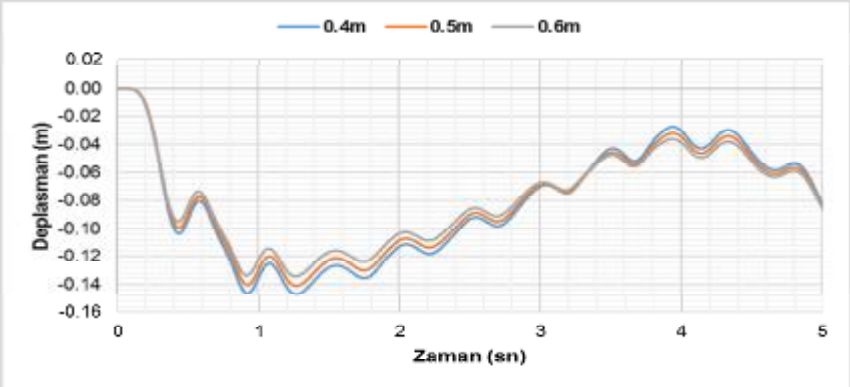


Şekil 4.34. Farklı çapa sahip kazıklar (a) B=0.4m; (b) B=0.5m; (c) B=0.6m

Kazık başında oluşan düşey deplasmanlar Mohr-Coulomb zemin modeli ve Hardening Soil zemin modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analiz sonuçları incelendiğinde, gevşek ve sıkı kum zemin koşulları etkisinde, kazık

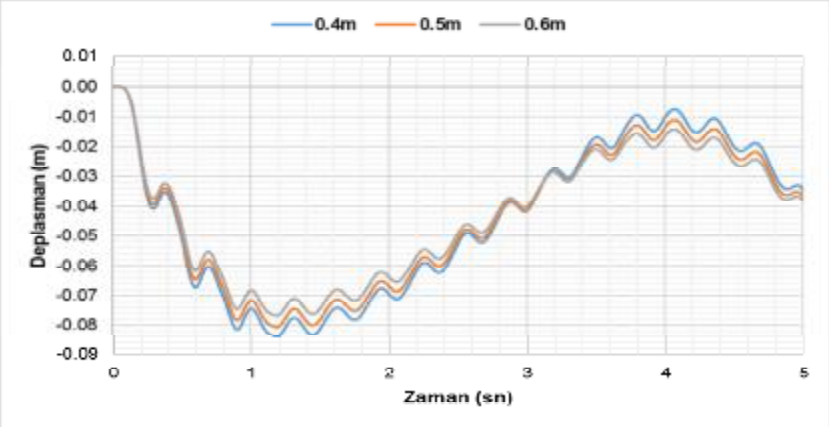
rijitliğini arttırmanın (kazık boyu sabit kazık çapının artırılması) kazık başında oluşan düşey deplasmanları azaltmada önemli bir etken olduğu gözlenmiştir.

Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanıldığı analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gevşek kum zemin koşullarında, kazık rijitliğinin artması sonucu kazık başında oluşan düşey deplasmanların azaldığı gözlenmiştir. Kazık çapının 0.4m olduğu durumda kazık başında hesaplanan maksimum düşey deplasman yaklaşık 15cm iken, kazık çapının 0.5m olduğu durumda bu değer yaklaşık 14cm ve kazık çapının 0.6m olduğu durumda ise bu değer yaklaşık 13.4cm'dir (Şekil 4.35).



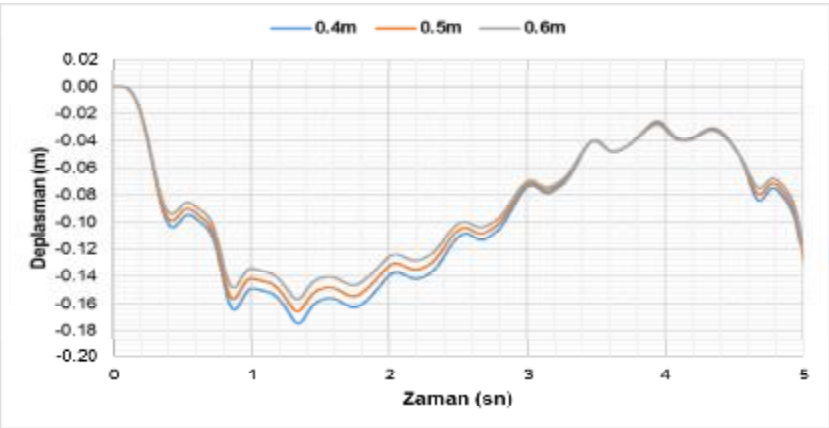
Şekil 4.35. Kazık çapının gevşek kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(MC)

Sıkı kum zemin koşullarında da benzer davranış gözlenmiş olup, kazık çapının 0.4m olduğu durumda kazık başında hesaplanan maksimum düşey deplasman yaklaşık 8.3cm iken, kazık çapının 0.5m olduğu durumda bu değer yaklaşık 8cm ve kazık çapının 0.6m olduğu durumda ise bu değer yaklaşık 7.6cm'dir (Şekil 4.36).



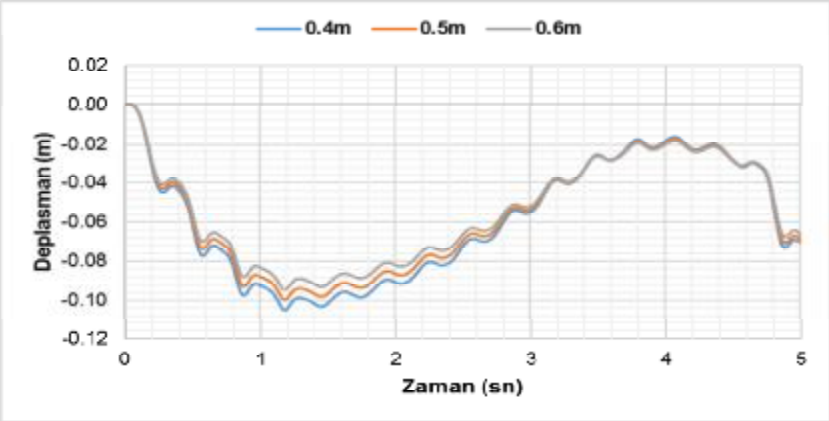
Şekil 4.36. Kazık çapının sıkı kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(MC)

Hardening Soil zemin modelinin kullanıldığı analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gevşek kum zemin koşullarında, kazık rijitliğinin artması sonucu kazık başında oluşan düşey deplasmanların azaldığı gözlenmiştir. Kazık çapının 0.4m olduğu durumda kazık başında hesaplanan maksimum düşey deplasman yaklaşık 17.5cm iken, kazık çapının 0.5m olduğu durumda bu değer yaklaşık 16.5cm ve kazık çapının 0.6m olduğu durumda ise bu değer yaklaşık 15.6cm'dir (Şekil 4.37).



Şekil 4.37. Kazık çapının gevşek kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(HS)

Sıkı kum zemin koşullarında da benzer davranış gözlenmiş olup, kazık çapının 0.4m olduğu durumda kazık başında hesaplanan maksimum düşey deplasman yaklaşık 10.5cm iken, kazık çapının 0.5m olduğu durumda bu değer yaklaşık 9.9cm ve kazık çapının 0.6m olduğu durumda ise bu değer yaklaşık 9.4cm'dir (Şekil 4.38).



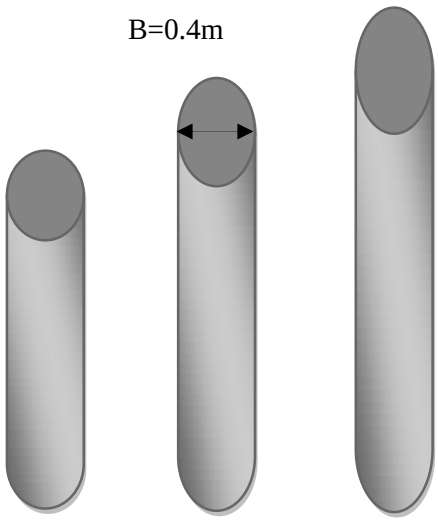
Şekil 4.38. Kazık çapının sıkı kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(HS)

Sonuç olarak, kazık rijitliğinin artmasının (kazık boyunun sabit, kazık çapının artması durumu) kazık başında oluşan düşey deplasmanları azalttığı gözlenmiştir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus, kazık çapının arttırılması sonucunda kazık ile zemin arasındaki temas yüzeyin de artıyor olmasıdır. Dolayısıyla, kazık rijitliğinin artması sonucu azalan düşey deplasmaların, kazık rijitliğinden mi yoksa kazık ile zemin arasındaki temas yüzeyinin artmasından dolayı mı kaynaklandığı belirsizlik teşkil etmektedir. Bu yüzden, kazık rijitliğinin etkisini doğru bir şekilde inceleyebilmek için, kazık boyunca oluşan moment değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat sonlu elemanlar analizinde kullanılan kazık eleman için hacimsel bir model oluşturulmuş ve bu modele beton malzeme özellikleri atanmıştır. Dolayısıyla, bu şartlarda kazık boyunca oluşan moment değerleri elde edilememiştir.

4.3.5. Kazık Sünekliğinin Etkisinin İncelenmesi

Bir malzemenin geometrik boyutları, o malzemenin sünekliğini veya rijitliğini belirleyen önemli parametrelerden birisidir. Bu bölümde, kazık sünekliğinin etkisini incelemek için gerçekleştirilen analizlerde kazık çapı sabit tutulurken (B=0.4m), kazık boyu için 3 farklı değer (B=4m, 5m ve 6m) dikkate alınmıştır. Bu sayede, kazık boyunun kazık çapına oranı artırılmış ve kazık eleman sadece geometrik boyutlar değiştirilerek daha sünek bir malzeme haline getirilmiştir.

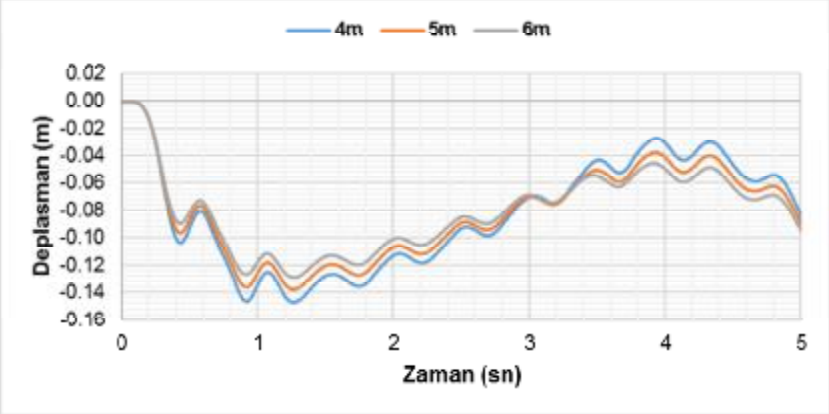
Sonlu elemanlar analizi, hem gevşek kum zemin koşullarında hem de sıkı kum zemin koşullarında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan sinüzoidal yer hareketinin maksimum ivme değeri 0.1g iken, yer hareketinin frekansı için her iki zemin koşulunun kendi rezonans frekansları kullanılmış ve bu yer hareketi zemin tabanına 5 saniye boyunca etki ettirilmiştir. Kazık başında oluşan düşey deplasmanlar Mohr-Coulomb zemin modeli ve Hardening Soil zemin modeli kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.39. Farklı boya sahip kazıklar (a) L=4m; (b) L=5m; (c) L=6m

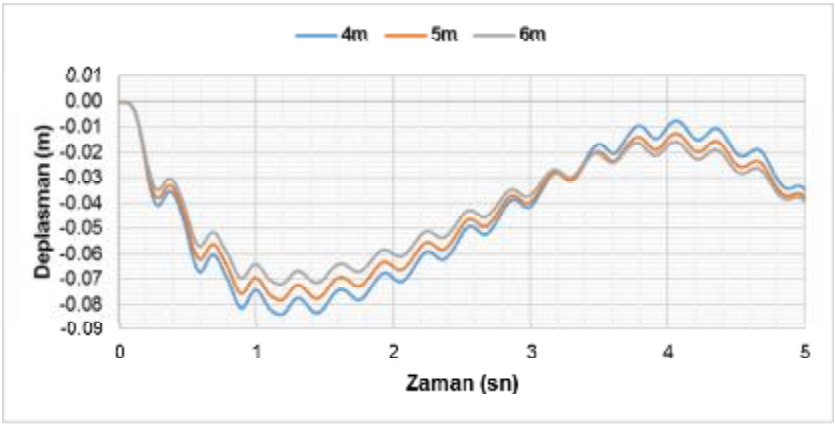
Sonlu elemanalar analiz sonuçları incelendiğinde, gevşek ve sıkı kum zemin koşulları etkisinde, kazık sünekliğini arttırmanın (kazık çapı sabit kazık boyunun artırılması) kazık başında oluşan düşey deplasmanları azaltmada önemli bir etken olduğu gözlenmiştir.

Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanıldığı sonlu elemanlar analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gevşek kum zemin koşullarında, kazık sünekliğinin artması sonucu kazık başında oluşan düşey deplasmanların azaldığı gözlenmiştir. Kazık boyunun 4m olduğu durumda kazık başında hesaplanan maksimum düşey deplasman yaklaşık 15cm iken, kazık boyunun 5m olduğu durumda bu değer yaklaşık 13.8cm ve kazık boyunun 6m olduğu durumda ise bu değer yaklaşık 12.8cm'dir (Şekil 4.40).



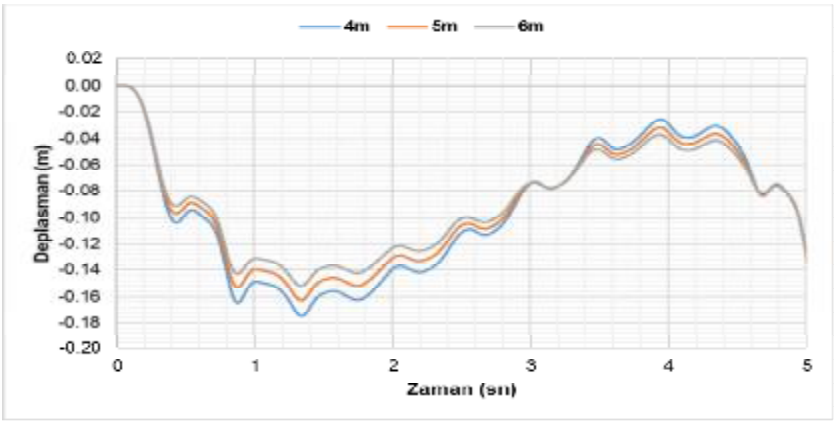
Şekil 4.40. Kazık boyunun gevşek kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(MC)

Sıkı kum zemin koşullarında da benzer davranış gözlenmiş olup, kazık boyunun 4m olduğu durumda kazık başında hesaplanan maksimum düşey deplasman yaklaşık 8.3cm iken, kazık boyunun 5m olduğu durumda bu değer yaklaşık 7.8cm ve kazık boyunun 6m olduğu durumda ise bu değer yaklaşık 7.2cm'dir (Şekil 4.41).



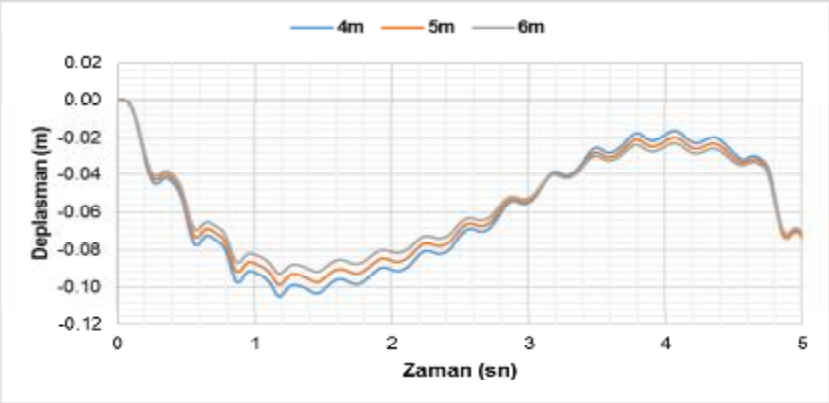
Şekil 4.41. Kazık boyunun sıkı kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(MC)

Hardening Soil zemin modelinin kullanıldığı analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gevşek kum zemin koşullarında, kazık sünekliğinin artması sonucu kazık başında oluşan düşey deplasmanların azaldığı gözlenmiştir. Kazık boyunun 4m olduğu durumda kazık başında hesaplanan maksimum düşey deplasman yaklaşık 17.5cm iken, kazık boyunun 5m olduğu durumda bu değer yaklaşık 16.3cm ve kazık boyunun 6m olduğu durumda ise bu değer yaklaşık 15.2cm'dir (Şekil 4.42).



Şekil 4.42. Kazık boyunun gevşek kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(HS)

Sıkı kum zemin koşullarında da benzer davranış gözlenmiş olup, kazık boyunun 4m olduğu durumda kazık başında hesaplanan maksimum düşey deplasman yaklaşık 10.5cm iken, kazık boyunun 5m olduğu durumda bu değer yaklaşık 9.8cm ve kazık boyunun 6m olduğu durumda ise bu değer yaklaşık 9.2cm'dir (Şekil 4.43).



Şekil 4.43. Kazık boyunun sıkı kum zeminde düşey deplasmana etkisi–(HS)

Sonuç olarak, kazık sünekliğinin artmasının (kazık çapının sabit, kazık boyunun artması durumu) kazık başında oluşan düşey deplasmanları azalttığı gözlenmiştir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus, kazık boyunun arttırılması sonucunda kazık daha narin bir eleman haline getirilmektedir. Bu yüzden, kazık sünekliğinin etkisini doğru bir şekilde inceleyebilmek için, kazık boyunca oluşan moment değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat sonlu elemanlar analizinde kullanılan kazık eleman için hacimsel bir model oluşturulmuş ve bu modele beton malzeme özellikleri atanmıştır. Dolayısıyla, bu şartlarda kazık boyunca oluşan moment değerleri elde edilememiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Genel

Bu çalışmada, tekil bir kazığın dinamik yük etkisindeki davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde, sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Bu programın dinamik analiz modülünün ürettiği sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için ilk olarak çalışmaya konu olan kum zeminin bir boyutlu yer tepki analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, zeminlerin bir boyutlu yer tepki analizini belirlemek amacıyla Hashash ve ark (2015) tarafından geliştirilen Deepsoil bilgisayar yazılımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Plaxis programının ürettiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Analizlerde kullanılan dinamik yük, modelde yer alan kum zeminin tabanına 5 saniye boyunca etki ettirilen ve maksimum genliği 0.1g olan sinüzoidal bir yer hareketidir. Ayrıca zemin sıkılığının etkisini incelemek maksadıyla analizlerde iki farklı sıkılıktaki (%30 ve %80) kum zemin dikkate alınmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminde oluşturulan ağın sıkılığı, sonuçları etkileyen önemli parametrelerden olup bu durumun etkisinden kaçınmak için bütün analizlerde “çok sıkı” ağ modeli kullanılmıştır. Buna ek olarak, dinamik analizlerde dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli parametre ise model sınırlarıdır ve bu durumun etkisinden kaçınmak için farklı genişlikte modeller kurulmuş, model sınırlarının etkisinin gözlenmediği sınırlar dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kaynaktan gelen dalganın (dinamik yükün) sönümlenmesi için model sınırlarının gerekli bölümlerine viskoz sınırlar tanımlanmıştır.

Analizlerde, tekil bir kazığın başında oluşan düşey deplasmanlar farklı parametreler etkisinde detaylı olarak incelenmiştir. Bu parametreler sırasıyla,

- zemin sıkılığının etkisi,
- dinamik yükün frekansının ve genliğinin etkisi,
- kazık başı kütlesinin etkisi,
- kazık rijitliğinin etkisi
- kazık sünekliğinin etkisi

şeklindedir. Bu parametreler, hem Mohr-Coulomb zemin modeli hem de Hardening Soil zemin modeli kullanılarak incelenmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonlu elemanlar sonuçları aşağıda sunulmuştur.

5.2. Sonuçlar

Plaxis programının dinamik analiz modülü ile yapılan analiz sonuçlarının doğruluğunu kontrol etmek için, kum zeminin bir boyutlu yer tepki analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, zeminlerin bir boyutlu yer tepki analizini belirlemek amacıyla Hashash ve ark (2015) tarafından geliştirilen Deepsoil bilgisayar yazılımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Plaxis programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deepsoil ve Plaxis programlarından elde edilen analiz sonuçlarının uyumlu olduğu, zemin yüzeyinde hesaplanan maksimum ivme değerinin zemin tabanındaki maksimum ivme değerinden yaklaşık 8 kat daha fazla olduğu her iki programda da gözlenmiştir. Zemin yüzeyinde elde edilen maksimum ivme değeri, Deepsoil programında yaklaşık 0.79g olarak hesaplanırken, Plaxis programında ise bu değer yaklaşık 0.80g olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, Deepsoil ve Plaxis programlarının zemin davranışını benzer şekilde ortaya koydukları ve Plaxis programının dinamik analiz modülünün ürettiği çözümün güvenilir olduğu gözlenmiştir.

Kum zeminin sıkılığının etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde, her iki zemin sıkılığı için zeminlerin kendi rezonans frekansları ile aynı frekansa sahip bir yer hareketi kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, kum zemin

için sıkılığın artmasının deplasmanları azaltma da olumlu bir etkisi olduğu, hem Mohr-Coulomb zemin modeli ile hem de Hardening Soil zemin modeli ile gözlenmiştir. Sonuç olarak, zemin sıkılığı arttıkça kaynaktan gelen dalgaların genliği zemin yüzeyine ulaşana dek artsa da buna karşılık zemin yüzeyinde oluşan deplasmanlar ciddi derecede azalmaktadır.

Dinamik yükün genliğinin tekil bir kazıkta oluşan deplasmanlara ve ivme değerlerine olan etkisini incelemek amacıyla analizlerde farklı genliklere sahip sinüzoidal bir yer hareketi kullanılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde, üç farklı genlikteki (0.10g, 0.20g ve 0.30g) yer hareketi, gevşek ve sıkı koşullar için her birinin kendi rezonans frekanslarında zemin tabanına etki ettirilmiştir. Sonuç olarak, gevşek ve sıkı zemin koşulları için rezonans frekans durumunda, yer hareketinin genliğinin artması ile kazık başında elde edilen hem maksimum ivme değerinin hem de düşey deplasmanın arttığı her iki zemin modelinde de gözlenmiştir.

Dinamik yükün frekansının tekil bir kazıkta oluşan düşey deplasmanlara etkisini incelemek için, farklı "w/w_n" oranlarına (0.5, 0.75, 1, 1.25 ve 1.5) sahip sinüzoidal bir yer hareketi kullanılmıştır. Bu yer hareketinin maksimum genliği 0.1g olup, gevşek ve sıkı kum zemin koşulları için analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, dinamik davranışta rezonans frekans durumunun üzerinde durulması gereken çok önemli bir nokta olduğu ve kazıkta oluşan maksimum deplasmanların her iki zemin modelinde de bu frekans değerinde ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Dinamik yük etkisindeki tekil bir kazığın başında yer alan kütlenin, kazıkta meydana gelen düşey deplasmanlara olan etkisini incelemek amacıyla hem gevşek hem de sıkı kum zemin koşulları için bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan yer hareketinin frekansı, her iki zemin sıkılığı için de kendi rezonans frekans değerleri olup, maksimum genliği 0.1g olarak belirlenmiştir. Her iki model için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, genel olarak kazık başında yer alan kütlenin düşey yönde meydana gelen deplasmanları azalttığı gözlenmiştir.

Dolayısıyla, kazık başı kütlesinin dinamik yük etkisindeki tekil bir kazıkta oluşan düşey deplasmanları azaltmada önemli bir etken olduğu düşünülmektedir.

Kazık rijitliğinin etkisini incelemek için gerçekleştirilen analizlerde kazık boyu sabit tutulurken (L=4m), kazık çapı için 3 farklı değer (B=0.4m, 0.5m ve 0.6m) dikkate alınmıştır. Bu sayede, kazık boyunun kazık çapına oranı azaltılmış ve kazık eleman sadece geometrik boyutlar değiştirilerek daha rijit bir malzeme haline getirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi hem gevşek kum zemin koşullarında hem de sıkı kum zemin koşullarında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan sinüzoidal yer hareketinin maksimum ivme değeri 0.1g iken, yer hareketinin frekansı için her iki zemin koşulunun kendi rezonans frekansları kullanılmıştır. Sonuç olarak, kazık rijitliğinin artmasının (kazık boyunun sabit, kazık çapının artması durumu) kazık başında oluşan düşey deplasmanları azalttığı gözlenmiştir.

Kazık sünekliğinin etkisini incelemek için gerçekleştirilen analizlerde kazık çapı sabit tutulurken (B=0.4m), kazık boyu için 3 farklı değer (B=4m, 5m ve 6m) dikkate alınmıştır. Bu sayede, kazık boyunun kazık çapına oranı artırılmış ve kazık eleman sadece geometrik boyutlar değiştirilerek daha sünek bir malzeme haline getirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi, hem gevşek kum zemin koşullarında hem de sıkı kum zemin koşullarında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan sinüzoidal yer hareketinin maksimum ivme değeri 0.1g iken, yer hareketinin frekansı için her iki zemin koşulunun kendi rezonans frekansları kullanılmıştır. Sonuç olarak, kazık sünekliğinin artmasının (kazık çapının sabit, kazık boyunun artması durumu) kazık başında oluşan düşey deplasmanları azalttığı gözlenmiştir.

Kazık rijitliğinin ve sünekliğinin etkisinin incelendiği iki parametre göz önüne alındığında, kazık rijitliğinin artması sonucu kazık başında oluşan maksimum düşey deplasmanın yaklaşık %10 mertebesinde azaldığı her iki zemin modeli ve sıkılığı için de gözlenirken, kazık sünekliğinin artması sonucu kazık başında oluşan maksimum düşey deplasmanın yaklaşık %14 mertebesinde azaldığı gözlenmiştir.

5.3. Öneriler

Bu çalışmada, dinamik yük etkisindeki tekil bir kazığın davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Aynı modelin laboratuvar ortamında kurularak sarsma tablası deneyleri yapılabilir ve elde edilen sonuçlar sayısal analizler ile karşılaştırılabilir. Ayrıca, Geoteknik Mühendisliğinde kazıklar genellikle grup halinde tasarlandıkları için, dinamik yük etkisindeki grup kazıkların davranışının hem sayısal hem de deneysel olarak incelenebilir.

Bu çalışma kapsamında araştırılan tüm parametreler, üç boyutlu sonlu elemanlar programı kullanılarak incelenebilir. Ayrıca, iki boyutlu sonlu elemanlar programı ile elde edilemeyen kazık boyunca oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri, üç boyutlu sonlu elemanlar programı kullanılarak hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

Aydınoğlu, M.N., 2011. Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Dinamik Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi için Uygulamaya Yönelik Bir Hesap Yöntemi. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 1-13.

Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., and Engin, H.K., 2010. Validation of Empirical Formulas to Derive Model Parameters for Sands. Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Norway, 137-142.

Brinkgreve, R.B.J., Kappert, M.H., and Bonnier, P.G., 2007. Hysteretic Damping in a Small-Strain Stiffness Model. Numerical Models in Geomechanics, London, 737-742.

Coduto, D.P., 1999. Geotechnical Engineering: Principles and Practices. Prentice-Hall, United States, 759p.

Cubrinovski, M., Sugita, H., Tokimatsu, K., Sato, M., Ishihara, K., Tsukamoto, Y., and Kamata, T., 2005. 3-D Numerical Simulation of Shake-Table Tests on Piles Subjected to Lateral Spreading. University of Canterbury, New Zealand, 1-8.

Ertuğrul, Ö.L., 2006. A Finite Element Modeling Study on the Seismic Response of Cantilever Retaining Walls. Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Ankara, 107p.

Finn, W.D.L., and Fujita, N., 2002. Piles in Liquefiable Soils: Seismic Analysis and Design Issues. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Netherlands, 22:731-742.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D., 2015. Deepsoil 6.0, User Manual, 125p.

Hutchinson, T.C., Chai, Y.C., and Boulanger, R.W., 2005. Simulation of Full-Scale Cyclic Lateral Load Tests on Piles. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, United States, 131(9):1172-1175.

Irshad, A., and Akhtar, N.K., 2006. Kinematic Seismic Response of Piles-Importance and Modeling. Geo Congress, United States, 1-6.

Kagawa, T., Sato, M., Minowa, C., Abe, A., and Tazoh, T., 2004. Centrifuge Simulations of Large-Scale Shaking Table Tests: Case Studies. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, United States, 130(7):663-672.

Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, United States, 653p.

Meymand, P.J., Riemer, M.F., and Seed, R.B., 2000. Large Scale Shaking Table Tests of Seismic Soil-Pile Interaction in Soft Clay. Proceedings of The Twelfth World Conference On Earthquake Engineering, New Zealand, 1-8.

Novak, M., 1991. Piles Under Dynamic Loads. Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Canada, 2433-2456.

Ordu, E., ve Özkan M.T., 2006. Kazıklı Temellerin Deprem Performanslarının Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. İtü dergisi/d Mühendislik, İstanbul, 5(2):27-34.

Plaxis, 2015. Material Models Manual. (Edited by Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., and Swolfs, W.M.), Delft University of Technology & Plaxis bv, Netherlands, 216p.

Plaxis, 2016. Scientific Manual. (Edited by Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., and Swolfs, W.M.), Delft University of Technology & Plaxis bv, Netherlands, 66p.

Plaxis, 2016. Tutorial Manual. (Edited by Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., and Swolfs, W.M.), Delft University of Technology & Plaxis bv, Netherlands, 200p.

Prakash, S., and Sharma, H.D., 1990. Pile Foundations in Engineering Practice. John Wiley & Sons, United States, 721p.

Ramachandran, J., 2005. Analysis of Pile Foundations under Seismic Loading. CBE Institute: Final Report, United States, 1-32.

Schanz, T., Vermeer, P.A., and Bonnier, P.G., 1999. The Hardening Soil Model: Formulation and Verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Netherlands, 281-296.

Siyahi, B., Çetin, K.Ö., ve Bilge, T., 2015. Geoteknik Deprem Mühendisliği Açısından Zemin-Temel-Yapı Etkileşimine Kritik Bakış. Türkiye Mühendislik Haberleri, Ankara, 484:41-50.

Song, E., and Wu, S., 2009. Seismic Analysis of Rigid Pile Composite Ground. Advances in Ground Improvement, United States, 188:189-197.

Su, D., and Li, X.S., 2006. Effect of Shaking Intensity on Seismic Response of Single-Pile Foundation in Liquefiable Soil. GeoShanghai International Conference, China, 379-386.

Tamura, S., Suzuki, Y., Tsuchiya, T., Fujii, S., and Kagawa, T., 2000. Dynamic Response and Failure Mechanisms of a Pile Foundation During Soil Liquefaction by Shaking Table Test with a Large Scale Laminar Shear Box. Proceedings of The Twelfth World Conference On Earthquake Engineering, New Zealand, 1-7.

Thavaraj, T., 2000. Seismic Analysis of Pile Foundations for Bridges. Doctoral Dissertation, University of British Columbia, Canada, 399p.

Ünsever, Y.S., 2015. An Experimental Study on Static and Dynamic Behaviour of Model Pile Foundations. Doktora Tezi, Middle East Technical University, Ankara, 253p.

Zhang, F., Okawa, K., and Kimura, M., 2008. Centrifuge Model Test on Dynamic Behavior of Group-Pile Foundation with Inclined Piles and Its Numerical Simulation. Frontiers of Architecture and Civil Engineering, China, 2(3):233-241.

Zhaoyu, W., Guoxiong, M., Guojun, C., and Xinbao, Y., 2009. Dynamic Finite Element Analysis of Micropile Foundation in Subgrade. GeoHunan International Conference, Hunan, 139-144.

ÖZGEÇMİŞ

1. Adı Soyadı: MUSTAFA TOLUN

2. Doğum Tarihi: 30.12.1987

3. Unvanı: Araştırma Görevlisi

4. Yabancı Dil: İngilizce, İyi

5. Araştırma Alanları: Zemin Mekaniği, Zemin dinamiği, Temel Mühendisliği

6. Eğitim Bilgileri

Derece	Alan	Üniversite	Yıl
Lisans	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ	MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ	2011
Yüksek Lisans	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ	ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ	---
Lisans	İNGİLİZCE ÖĞRETMENLİĞİ	ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ	---

7. Akademik Unvanlar

Görev Unvanı	Alan	Üniversite	Yıl
Arş. Gör.	İnşaat Mühendisliği Bölümü	ADANA BİLİM VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ	2012-2012
Arş. Gör.	İnşaat Mühendisliği Bölümü	ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ	2014-

8. SCI, SSCI, AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Emirler, B., Tolun, M., Laman, M., 2016, Experimental Investigation of the Uplift Capacity of Group Anchor Plates Embedded in Sand, GEOMECHANICS AND ENGINEERING, 11, 691-711, 10.12989/gae.2016.11.5.691

9. Diğer Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Emirler B., Tolun M., Laman M., "Investigation of the Uplift Capacity of Group Anchor Plates in Geogrid-Reinforced Sand", Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt.31, ss.257-267, 2016

10. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında (Proceedings) Basılan Bildiriler

Tolun M., Emirler B., Laman M., "Numerical Investigation of the Uplift Resistance of Plate Strip Anchors in Sand", 12th International Congress on Advances in Civil Engineering-ACE 2016, İSTANBUL, TÜRKIYE, 21-23 Eylül 2016, pp.1-8
Emirler B., Tolun M., Laman M., "Numerical Investigation of the Uplift Capacity of Inclined Anchor Plates in Sand", Fourth International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Lefkoşa, KUZEY KIBRIS TÜRK CUM., 2-4 Haziran 2016, pp.101-109

11. Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler

Tolun M., Laman M., "Eksenel Yüklü Tekil Kazığın Farklı Yöntemlerle Sayısal Analizi", 6. Geoteknik Sempozyumu, ADANA, TÜRKIYE, 26-27 Kasım 2015, ss.1-9

12. Diğer yayınlar

Mısır G., Bağriaçik B., Uysal F., Emirler B., Tolun M., "İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Geotekniğin Önemi", Diger, ss.26-27, 2015

13. Katıldığı Bilimsel Kongre/Sempozyum Ve Bilimsel Toplantılar

Fourth International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 4. ICNDSMGE-ZM 2016, Lefkoşa, Haziran 2016
6. Geoteknik Sempozyumu, Adana, Kasım 2015

3. Türkiye Plaxis Kullanıcıları Toplantısı, İstanbul, Aralık 2015

2. Türkiye Plaxis Kullanıcıları Toplantısı, İstanbul, Aralık 2014

5. Geoteknik Sempozyumu, Adana, Aralık 2013