

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜVİYAL ORTAMDA FARKLI ZEMİN KESİTLERİNDE  
ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ SEÇENEKLERİNİN  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Berna ÇAĞLAR**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sedat SERT**

**Haziran 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜVİYAL ORTAMDA FARKLI ZEMİN KESİTLERİNDE  
ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ SEÇENEKLERİNİN  
DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

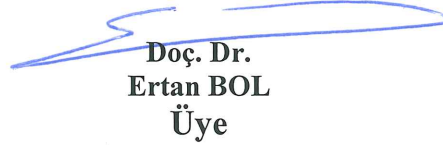
Berna ÇAĞLAR

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Bu tez 14/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr.  
Sedat SERT  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr.  
Ertan BOL  
Üye

  
Dr. Öğr. Üyesi  
Zehra Şule GARİP  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Berna ÇAĞLAR

14.06.2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Sedat SERT'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sırasında yardımlarını esirgemeyen, PLAXIS programı ile ilgili bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak her türlü desteği veren Sayın Arş. Gör. Ahmet Hamdi SERDAR'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni her konuda destekleyen, hayatta attığım her adımda bana güvenen ve ihtiyacım olduğu anda her türlü desteği veren sevgili aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY .....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Konu İle İlgili Çalışmalar .....	2
1.2. Amaç ve Kapsam.....	4
1.3. Tezin Organizasyonu.....	5
BÖLÜM 2.	
SAKARYA ZEMİNLERİ VE ZEMİN İYİLEŞTİRME.....	6
2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri .....	11
2.1.1. Jet enjeksiyonu (jet grout) metodu.....	12
2.1.2. Jet grout ile iyileştirilmiş zeminler için kompozit alan oluşturma yaklaşımı .....	13
BÖLÜM 3.	
YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ.....	15
3.1. Yapı-Zemin Etkileşim Problemlerinde Çözüm Yöntemleri.....	17
3.1.1. Direkt metot .....	19
3.1.2. Viskoz sınır şartı .....	20

BÖLÜM 4.	
PLAXIS YAZILIMI VE SONLU ELEMANLAR .....	22
BÖLÜM 5.	
SAYISAL ÖRNEKLER .....	31
BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	51
KAYNAKLAR .....	54
ÖZGEÇMİŞ .....	57



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Etkili alan
B	: Bina genişliği
[C]	: Sistemin sönüm matrisi
c	: Sönüm/kohezyon
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
EA	: Eksenel rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
G	: Kayma modülü
H	: Bina yüksekliği
H <sub>z</sub>	: Hertz (frekans)
k	: Eleman rijitlik matrisi
[K]	: Sistem rijitlik matrisi
m	: Eleman kütlesi
m	: Metre
[M]	: Kütle matrisi
[N]	: Şekil fonksiyonları matrisi
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
SEM	: Sonlu eleman modeli
t	: Zaman
T	: Periyot
u	: Deplasman
v <sub>s</sub>	: Zeminin kayma dalgası hızı
YASS	: Yer altı su seviyesi
YZE	: Yapı zemin etkileşimi

$\phi'$	: İçsel sürtünme açısı
$\psi$	: Kabarma açısı
$\rho$	: Kütleli yoğunluk
$\nu$	: Poisson oranı
$\omega$	: Açısız frekans
$\xi$	: Sönüm oranı





## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. AFAD Deprem Haritası .....	1
Şekil 2.1. Sakarya ili ve Adapazarı'nın konumu.....	6
Şekil 2.2. Adapazarı ve çevresinin Neotektonik haritası .....	7
Şekil 2.3. Adapazarı jeoloji haritası .....	8
Şekil 2.4. Adapazarı'nın jeomorfolojik özellikleri ve değişik formasyonlardan CPT profilleri.....	9
Şekil 2.5. Adapazarı kent merkezi zemin profilleri .....	10
Şekil 2.6. Adapazarı Yenidoğan Mahallesinden zemin kesiti.....	10
Şekil 2.7. Uygulama derinliği ve zemin cinsine bağlı zemin iyileştirme yöntemleri .....	11
Şekil 2.8. Jet grout yönteminin uygulama aşamaları .....	13
Şekil 3.1. Üst yapının mod şekilleri ve frekans değerleri (a) rijit bağlı (b) yapı-zemin etkileşimi dikkate alınıyor.....	16
Şekil 3.2. Dinamik sınırsız ortam-yapı etkileşimi.....	17
Şekil 3.3. Zemin modelleme şekilleri .....	18
Şekil 3.4. Yapı zemin etkileşim analiz metotları .....	19
Şekil 3.5. Zemin yüzeylerinin kesilmesi .....	19
Şekil 3.6. Direkt metotta viskoz sınır şartları.....	20
Şekil 4.1. Dört noktalı izoparametrik eleman .....	23
Şekil 5.1. Yapı-zemin modeli.....	31
Şekil 5.2. Yapı-zemin modelinin sonlu eleman modeli (PLAXIS 2D).....	32
Şekil 5.3. Marmara depremi ivme kaydı .....	33
Şekil 5.4. Yapısal elemanların düzlemsel rijit eleman olarak tanımlanması .....	34
Şekil 5.5. Betonarme üstyapı temelinin H/B=1,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok).....	37

Şekil 5.6. Betonarme üstyapı temelinin $H/B=1,00$ için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var).....	37
Şekil 5.7. Betonarme üstyapı temelinin $H/B=2,00$ için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok).....	37
Şekil 5.8. Betonarme üstyapı temelinin $H/B=2,00$ için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var).....	37
Şekil 5.9. Betonarme üstyapının $H/B=1,00$ için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok).....	38
Şekil 5.10. Betonarme üstyapının $H/B=1,00$ için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var).....	38
Şekil 5.11. Betonarme üstyapının $H/B=2,00$ için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok).....	38
Şekil 5.12. Betonarme üstyapının $H/B=2,00$ için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var).....	38
Şekil 5.13. Betonarme üstyapının $H/B=1,00$ için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok).....	39
Şekil 5.14. Betonarme üstyapının $H/B=1,00$ için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var).....	39
Şekil 5.15. Betonarme üstyapının $H/B=2,00$ için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok).....	39
Şekil 5.16. Betonarme üstyapının $H/B=2,00$ için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var) .....	39
Şekil 5.17. Betonarme üstyapı temelinin $H/B=1,00$ için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok) .....	41
Şekil 5.18. Betonarme üstyapı temelinin $H/B=1,00$ için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var) .....	42
Şekil 5.19. Betonarme üstyapı temelinin $H/B=2,00$ için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok) .....	42
Şekil 5.20. Betonarme üstyapı temelinin $H/B=2,00$ için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var) .....	42
Şekil 5.21. Betonarme üstyapının $H/B=1,00$ için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok) .....	42

Şekil 5.22. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var) .....	43
Şekil 5.23. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok) .....	43
Şekil 5.24. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var) .....	43
Şekil 5.25. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için görelı yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok) .....	43
Şekil 5.26. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için görelı yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var) .....	44
Şekil 5.27. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için görelı yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok) .....	44
Şekil 5.28. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için görelı yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var) .....	44
Şekil 5.29. Betonarme üstyapı temelının H/B=1,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok) .....	46
Şekil 5.30. Betonarme üstyapı temelının H/B=1,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var) .....	46
Şekil 5.31. Betonarme üstyapı temelının H/B=2,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok) .....	47
Şekil 5.32. Betonarme üstyapı temelının H/B=2,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var) .....	47
Şekil 5.33. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok) .....	47
Şekil 5.34. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var) .....	47
Şekil 5.35. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok) .....	48
Şekil 5.36. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var) .....	48
Şekil 5.37. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için görelı yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok) .....	48

Şekil 5.38. Betonarme üstyapının $H/B=1,00$ için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var) .....	48
Şekil 5.39. Betonarme üstyapının $H/B=2,00$ için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok) .....	49
Şekil 5.40. Betonarme üstyapının $H/B=2,00$ için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var).....	49



## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Amacına göre zemin iyileştirme yöntemleri.....	12
Tablo 5.1. Yapı-zemin sonlu eleman modellerinin matrisi.....	32
Tablo 5.2. Yapı-zemin modelinin betonarme üstyapısına ait yapısal elemanların özellikleri.....	33
Tablo 5.3. Zemin Parametreleri .....	35
Tablo 5.4. İyileştirme uygulanan zeminlere ait zemin parametreleri .....	35
Tablo 5.5. Yumuşak zemin tabaka kalınlığı $H_{ZT}=3$ m olan yapı-zemin modelleri.....	36
Tablo 5.6. Yumuşak zemin tabaka kalınlığı $H_{ZT}=6$ m olan yapı-zemin modelleri.....	41
Tablo 5.7. Yumuşak zemin tabaka kalınlığı $H_{ZT}=9$ m olan yapı-zemin modelleri.....	46

## ÖZET

**Anahtar Kelimeler:** Adapazarı zeminleri, Yüzeye yakın yumuşak zemin tabakası, Deprem, Yapı-zemin etkileşimi, Zemin iyileştirme, Plaxis.

1999 Marmara Depremi sonrasında yapılan incelemelerde aynı bölgede bulunan betonarme yapıların hasarlarında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Bu durum ağır hasar gören veya yıkılan binalarda zemin özelliklerinin yapıların hasarında etkili olduğu fikrini ortaya çıkarmıştır. Deprem sonrası yapılan zemin incelemelerinde Adapazarı ve civarında çok farklı zemin kesitlerinin var olduğu ve yumuşak zemin tabakaların altında kalınlıkları 5-6 m'ye varan sağlam tabakaların bulunduğu belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, kalınlıkları farklı olan yumuşak zeminler üzerine inşa edilen betonarme binaların deprem davranışına zemin özelliklerinin etkisinin incelenmesidir. Farklı kalınlıklardaki yüzeye yakın yumuşak zemin tabakaları, kalınlıklarına bağlı olarak “zemin değiştirme” veya “jet grout” yöntemlerinden birisi ile iyileştirilmiş ve iyileştirme sonrası zeminin betonarme üstyapısının davranışına etkisi de çalışmaya dahil edilmiştir. Bu amaçla, 12 farklı yapı-zemin modelinin sonlu eleman modelleri PLAXIS paket programı yardımıyla oluşturularak zaman tanım alanında analiz edilmişlerdir. Yapı-zemin modellerinin üstyapıları, 4 ve 8 katlı iki farklı yapı olmak üzere planları, kesit ve malzeme özellikleri sabit tutularak oluşturulmuştur. Yapı-zemin modellerinin altyapıları ise Adapazarı zeminleri dikkate alınarak üç farklı zemin tabakası ile oluşturulmuştur. Zemin ortamlarının gerçek zemin davranışlarının modellenebilmesi için doğrusal olmayan davranış özellikleri de dikkate alınmıştır. Yapı-zemin modelinin davranışı; betonarme üstyapısı temelinin düşey yer değiştirmeleri ve betonarme üst yapısının yatay yer değiştirmeleri açısından değerlendirilmek üzere grafikler halinde sunulmuştur.

# **THE EVALUATION OF SOIL IMPROVEMENT OPTIONS IN DIFFERENT SOIL SECTIONS CONTAINING ALLUVIAL SOFT SOILS**

## **SUMMARY**

Keywords: Adapazarı soils, Soft soil layers close to the surface, Earthquake, Soil-structure interaction, Soil improvement, Plaxis.

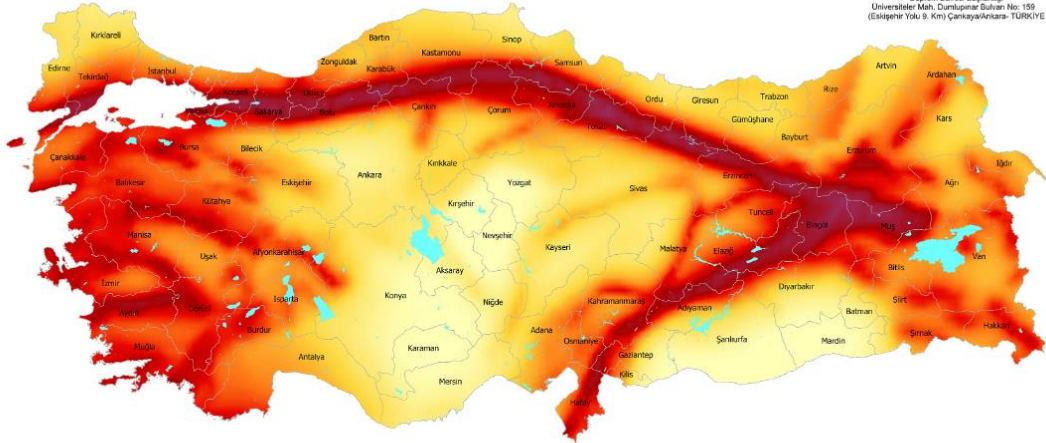
After the 1999 Marmara Earthquake, there were significant differences in the damage of the reinforced concrete structures in the close vicinity of each other. This has led to the idea that the soil properties, under the buildings that are heavily damaged or destroyed, are effective in damage of structures. The soil investigations after the earthquake revealed that there were many different soil sections in and around Adapazarı and that there were dense soil layers up to 5-6 m thickness below the soft soil layers.

The main purpose of this thesis is to investigate the effect of soil properties on earthquake behavior of reinforced concrete buildings constructed on soft soils with different thicknesses. Soft soil layers of different thicknesses close to the surface have been improved by soil changing or jet grout columns depending on their thickness and the effect of the soils on the behavior of the reinforced concrete superstructure is also included in the study. For this purpose, finite element models of 12 different structure-soil models were created with the help of PLAXIS 2D v2019 software and analyzed in time domain. The superstructures of the building-soil models have been formed by keeping the plans of two different structures with 4 and 8 storeys, section and material properties constant. The infrastructures of the building-soil models were constructed with three different soil layers considering Adapazarı soils. In order to model the actual soil behavior of soil environments, non-linear behavior characteristics were also taken into consideration. Behavior of building-soil model; the vertical displacements of the reinforced concrete superstructure and the horizontal displacements of the reinforced concrete superstructure are presented in graphs.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünyanın oluşumundan beri, sismik olarak aktif bölgelerde belirli periyotlarla depremlerin oluştuğu ve bu depremlerin milyonlarca insanın kaybı ve yapıların hasarıyla neticelendiği bilinmektedir. Geçmişte birçok yıkıcı depremler olduğu ve gelecekte oluşacak depremlerle de büyük can ve mal kaybına uğrayabileceğimiz acı bir gerçektir. Güncel AFAD Deprem Bölgeleri Haritası'na göre yurdumuzun hemen hemen tamamına yakını deprem bölgeleri içerisindedir. Bu nedenle şehirlerimizin büyük çoğunluğu deprem tehlikesi altında yaşamaktadır (Şekil 1.1.).

### TÜRKİYE DEPREM TEHLİKE HARİTASI

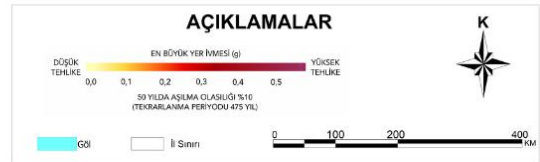


Bu harita, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP) kapsamında desteklenen UDAP-Ç-13-06 kod no'lu "Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi" başlıklı projenin sonuçları kullanılarak hazırlanmıştır.

Bu harita, zemin koşulu ( $V_s$ ) = 760 m/s esas alınarak hazırlanmıştır. Yerel zemin koşullarının neden olabileceği sivilaşma, büyüme, farklı oturma gibi tehlikeleri içermemektedir.

Kaynak Gösterme; Bu haritanın kullanılmasında "AFAD, 2018. Türkiye Deprem Tehlike Haritası" şeklinde kaynak belirtilmesi gerekmektedir.

2018© Haritanın telif ve iktibas hakkı AFAD Başkanlığına aittir. AFAD'ın yazılı izni alınmadan elektronik, optik, mekanik veya diğer yollarla çoğaltılması, dağıtılması, basılması, yayımlanması durumunda gerekli hukuki yollara başvurulacaktır.



Şekil 1.1. AFAD Deprem Haritası (Afad, 2019)

1999 Marmara depremiyle birlikte yaşanan acılar ve öğretiler depremin yıkıcı tesirini azaltma yolunda mühendislik araştırmalarına ve bilimsel çalışmalara ivme



kazandırmıştır. Özellikle, alüvyon zemin üzerine yapılmış çok katlı binaların bulunduğu ve ağır hasar ve yıkımların meydana geldiği Sakarya ilinin Adapazarı ilçesi inceleme alanı olarak birçok akademik çalışmada öne çıkmıştır. Ayrıca SAÜ Geoteknik Laboratuvarının deprem öncesi ve sonrasında yaptığı çalışmalar; şehrin zemin haritasının oluşmasında ve bazı önyargıların kırılıp, bazı öngörülme yenilerin de yapılabilirliği konusunda geniş bir veri tabanı oluşturularak bilimsel araştırmalara büyük katkı sağlamıştır.

### **1.1. Konu İle İlgili Çalışmalar**

Yapı-zemin etkileşimi ile ilgili yapılan birçok akademik çalışma bulunmakta olup ilk çalışma, Dünya Deprem Mühendisliği Konferansı'nda 1965 yılında sunulan bir konferans bildirisidir. Konu ile ilgili yapılan çalışmaların bazıları bu bölümde kısaca özetlenecektir.

Yapı-zemin etkileşimi ile ilgili yapılan ilk çalışmalardan biri Parmelee (Parmelee, 1967) tarafından gerçekleştirilmiştir. Parmelee yapı-zemin modelinin zemin altyapısı zemini yarı sonsuz, izotrop, lineer elastik ve homojen olarak tanımlamış ve üstyapı temelini ise zeminin yüzeyinde rijit, dairesel bir plak olarak idealleştirmiştir. Sürekli ortam yaklaşımı olarak adlandırılan bu yöntem, bünyesinde geometrik sönüm koşullarını barındırmakta olup az sayıda serbestlik derecesi kullanması nedeniyle de oldukça dikkat çekmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminin gelişmesi ile bu yöntem daha yaygın bir şekilde birçok bilim adamı tarafından da kullanılmaya başlanmış ve alt sistem yaklaşımı olarak adlandırılmıştır (Guitierrez ve Chopra, 1978). Bu yöntem, yapı-zemin etkileşimi problemlerinin yakın bölgede çözümlemesini yapmakta olup birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılmıştır.

Alt sistem yaklaşımı ile birlikte kullanılmaya başlayan bir diğer yöntem de ortak sistem yaklaşımıdır. Bu yöntemler, zemin ortamının özelliklerinin ve geometrik süreksizliğinin modellenmesinde sunduğu kolaylıklar gibi nedenlerle yaygın olarak kullanılmaya başlanmışlardır. Bununla birlikte bu yöntemlerde, belirli bir kaynaktan

gönderilen ve zemin ortamında yayılan dalga enerjisinin yapay sınırlara çarparak tekrar zemin ortamına dönmesi analiz sonuçlarında hatalara neden olmaktadır. Bu problemin çözümü ile ilgili olarak Lysmer ve Kuhlemeyer (1969) viskoz sınır şartları olarak adlandırdıkları ve dalga enerjisinin yutulmasını sağlayan bir yapay sınır modeli geliştirmişlerdir.

Aydinoğlu (1977) bu yaklaşımdan yola çıkarak sürekli ve ayrık ortam modellemelerinin üstünlüklerini bir araya getirdiği karma ortam modelini önermiştir. Aydinoğlu çalışmasında, sonlu eleman yöntemi ile zemini belirli bir derinliğe kadar modellemiş, geri kalan derinliği ise tek tabakalı zemin ortamı olarak tanımlamıştır.

Pala (2001) yapı-zemin etkileşimi problemini yapay sinir ağları modeli kullanarak incelemiştir. Pala, doktora çalışmasında deprem etkisi altındaki betonarme yapıların davranışına zemin tabaka kalınlıkları ve farklı zemin özelliklerinin etkisini araştırmıştır. Yapı-zemin modelinin betonarme üstyapısının tepe noktasına ait yatay yer değiştirmeleri ve ivmelerin değişimi ile betonarme üstyapısının periyotlarının değişimini belirlemiştir.

Garip (2005) deprem etkisi altındaki betonarme yapıların davranışına zemin özelliklerinin etkisini yapı-zemin modeli yaklaşımı ile araştırmıştır. Yapı-zemin modelini iki boyutlu ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak modellemiş, analizleri lineer elastik olarak gerçekleştirmiştir. Özellikle yapı-zemin modellemesinde rezonans etkisini dikkate alarak betonarme üstyapısının tepe noktasına ait yatay yer değiştirmesine etkilerini incelemiştir. Analizler sonucunda rezonansın önemini göstermiş ve betonarme üst yapının rezonans etkisi dikkate alınarak modellenmesi gerektiğini göstermiştir.

Serdar (2015) yüksek lisans tez çalışmasında yumuşak zeminler üzerine inşa edilen betonarme yapıların deprem davranışına bodrum katın etkisini incelemiştir. Yapı-zemin modellerini bodrum katlı ve bodrum katsız olarak PLAXIS 2D yazılımı yardımıyla oluşturmuş ve bu yapı-zemin modellerinin analizlerini zaman tanım alanında gerçekleştirmiştir. Yumuşak zeminler üzerinde inşa edilen betonarme

binaların bodrumlu olarak yapılması durumunda deprem davranışlarının olumlu olarak etkilendiğini ve deprem hasarlarının azaldığını belirlemiştir.

Aksangür (2017), yüksek lisans tez çalışmasında zemin iyileştirmesinde yüksek modüllü kolonların (jet grout) kullanılması ve hesap yöntemlerinin değerlendirilmesi konusunu incelemiştir. Aksangür, temel ve zemin ortamını Plaxis sonlu elemanlar programı yardımıyla modellemiş, iyileştirme öncesi ve sonrasında zemin ortamında oluşan oturmaları belirlemiştir. Analizler sonucunda zemin ortamlarında oluşan oturma problemine karşı jet grout kolonlarının çözüm olarak başarıyla uygulanabileceği gösterilmiştir.

## **1.2. Amaç ve Kapsam**

Bu tez çalışmasının temel amacı, kalınlıkları farklı olan yüzeydeki yumuşak zeminler üzerine inşa edilen betonarme binaların deprem davranışına zemin özelliklerinin etkisinin incelenmesidir. Farklı kalınlıklardaki yüzeye yakın yumuşak zemin tabakaları, kalınlıklarına bağlı olarak “zemin değiştirme” veya “jet grout” yöntemlerinden birisi ile iyileştirilmiş ve betonarme üstyapısının davranışına iyileştirme sonrası zeminin etkisi de araştırılmıştır. Bu amaçla, 12 farklı yapı-zemin kesitinin sonlu eleman modelleri PLAXIS paket programı yardımıyla oluşturularak zaman tanım alanında analiz edilmişlerdir. Yapı-zemin modellerinin üstyapıları, 4 ve 8 katlı iki farklı yapı olmak üzere planları, kesit ve malzeme özellikleri sabit tutularak oluşturulmuştur. Yapı-zemin modellerinin altyapıları ise Adapazarı zeminleri dikkate alınarak üç farklı zemin tabakası ile oluşturulmuştur. Zemin ortamlarının gerçek zemin davranışlarının modellenebilmesi için doğrusal olmayan davranış özellikleri de dikkate alınmıştır. Yapı-zemin modelinin davranışı, betonarme üstyapısı temelinin düşey yer değiştirmesi ve betonarme üst yapısının yatay yer değiştirmeleri açısından değerlendirilmek üzere grafikler halinde sunulmuştur.

### 1.3. Tezin Organizasyonu

Tezin ilk bölümünde tez konusu ile ilgili genel bilgiler ve literatürdeki çalışmalardan bazıları kısaca verilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde yapı-zemin etkileşimi detaylı olarak irdelenerek yapı-zemin etkileşimi problemleri ve çözüm yolları üzerindeki bilgiler aktarılmıştır.

Üçüncü bölümde PLAXIS paket programı ve sonlu elemanlar yöntemi hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde sayısal çalışma ve yapı-zemin modellerinin özellikleri verilmiş ve gerçekleştirilen dinamik analizlerin sonuçları grafikler halinde sunularak değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde ise sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

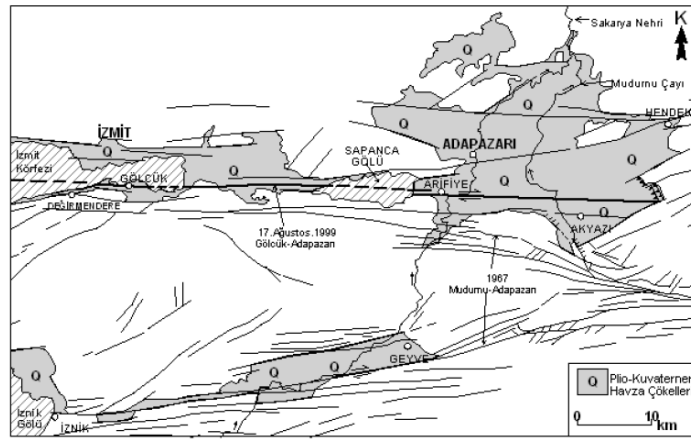
## BÖLÜM 2. SAKARYA ZEMİNLERİ VE ZEMİN İYİLEŞTİRME

Bu çalışma kapsamında ele alınan yapı-zemin modellerinin zemin altyapı modelleri Sakarya ilinin zemin özellikleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu bölümde Sakarya ili zemin ortamlarının genel karakterleri ve zemin iyileştirme yöntemleri hakkında bilgi verilecektir. Sakarya,  $40^{\circ} 46' 42''$  enlemi ve  $30^{\circ} 24' 11''$  boylamı arasında, Türkiye'nin kuzeybatısında bulunan 1900'lü yıllardan itibaren sürekli göç alan, 2018 yılı itibariyle nüfusu 1.000.000'u aşan tarım, sanayi ve hizmet sektörü ekonomisine dayalı önemli bir şehirdir (Şekil 2.1.).



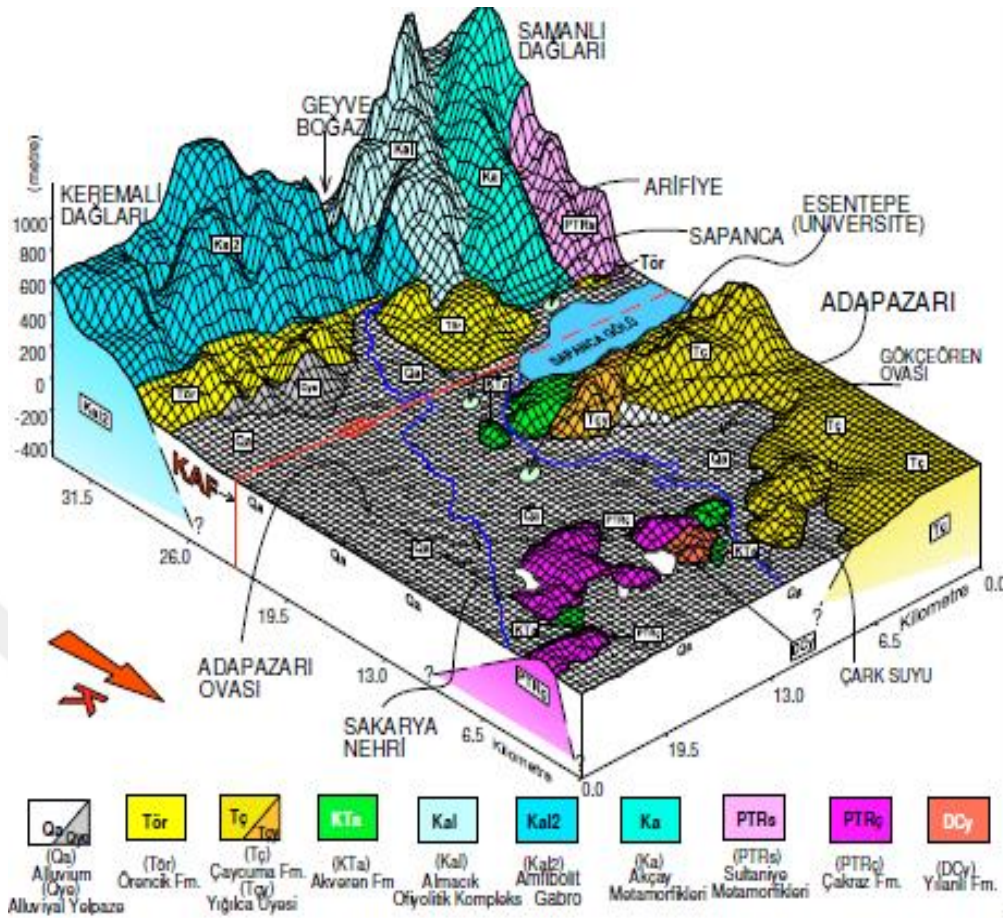
Şekil 2.1. Sakarya ili ve Adapazarı'nın konumu

Sakarya ilinin içinde bulunduğu bölge, doğudan batıya doğru uzanan Kuzey Anadolu Fayının etkisiyle aktif konumdadır. Kuzey Anadolu Fayı bölgenin içinden geçmekte ve şehir aralıklarla meydana gelen büyük depremlere maruz kalmaktadır (Şekil 2.2.).



Şekil 2.2. Adapazarı ve çevresinin Neotektonik haritası (Koçyiğit ve diğ., 1999)

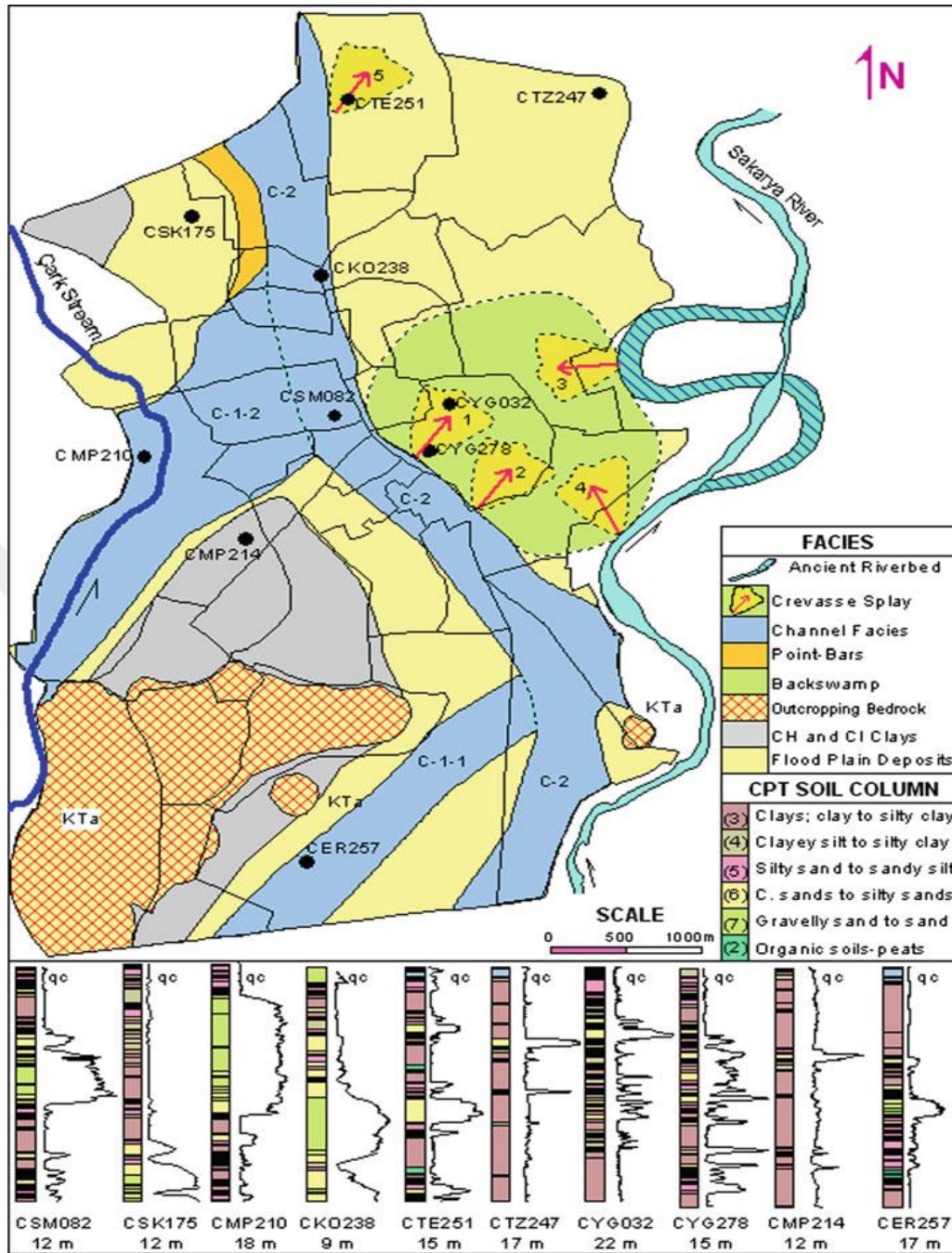
Tarih boyunca Sakarya bölgesinde büyüklüğü Richter ölçeği ile 5 ve daha fazla olan 29 deprem kaydı yapılmıştır. Bunlardan en büyük hasara neden olanlar 1926 Hendek depremi, 1943 Adapazarı-Hendek depremi, 1957 Mudurnu depremi, 1967 Sakarya depremi, 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleridir. Sakarya ili merkez ilçesi Adapazarı genelde düz bir görünüme sahiptir, bu düzlüğü batıda Serdivan ve güneybatıda Erenler mevkileri kısmen bozmaktadır, kentin deniz seviyesine göre yüksekliği ise 31 m civarındadır, deniz seviyesi kuzeybatı yönünde %2, kuzeydoğu yönünde %0,5'lik eğimle azalma göstermektedir. Şehir, Sapanca Gölü-Hendek güneybatısı arasında 32 km, kuzeyde Mağara Boğazı, güneyde Akyazı batısı arasında 27 km kadar uzanan Adapazarı Ovası'nın batısında kuruludur (Sert ve diğ., 2008). Şehir genç aluviyal (fluviyal) dolgu üzerinde ve yayılmanın daha çok kuzey-güney doğrultusunda olduğu tipik bir ova kentidir (Şekil 2.3.). Sakarya Nehri'nin Adapazarı Ovası ve çevresinin oluşumunda ve şekillenmesindeki rolü çok önemlidir. Sakarya Nehri günümüzde kentin doğu sınırından akmaktadır. Ancak geçmişte bugünkü kent merkezinin kurulu olduğu alandan akmış olabileceği gerçeği saptanmıştır (Bilgin, 1984).



Şekil 2.3. Adapazari jeoloji haritası (Bol, 2003)

12 gözlü ve 2000 yıllık Roma köprüsünün altından, şimdilerde ince akan Çark Deresi yerine o tarihlerde Sakarya Nehri'nin geçtiği, zaman içinde nehrin 4 km doğuya kaydığı anlaşılmaktadır (Şekil 2.4.). Büyük akarsuyun kentin ortasından geçtiği yollarda kumlar ve siltli kumlar, taşkın yaptığı yerlerde silt ara tabakaları, uzun süre göllendiği yerlerde ise orta ve yüksek plastisiteli killerin yaygın olduğu gibi bir genelleme yapılabilmekte, ayrıca düşeyde sayısı yüzlere varabilen tabakalarla sistemin karmaşıklığı da anlaşılmaktadır (Arel ve diğ., 2011).

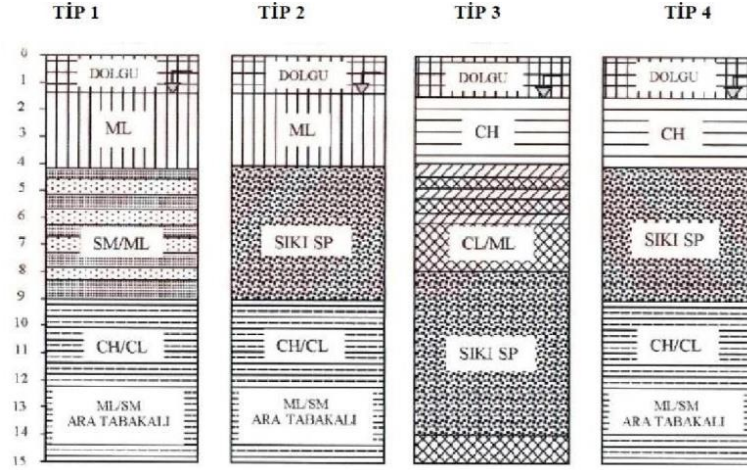




Şekil 2.4. Adapazarı'nın jeomorfolojik özellikleri ve değişik formasyonlardan CPT profilleri

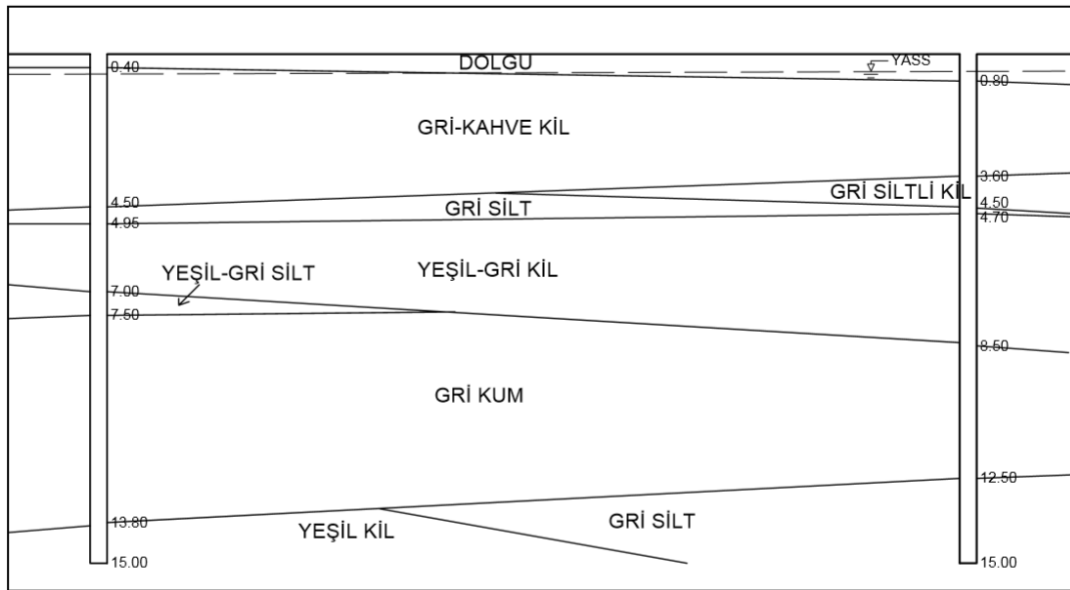
Sancio ve diğ. (2002), hasarın ve yıkımların yaygın görüldüğü Adapazarı merkezinin farklı yerlerinde toplam 46 sondaj ve 135 sondalama yapmışlar ve 4 ayrı tipte zemin profili ortaya koymuşlardır (Şekil 2.5.). 15 m derinlik için hazırlanan bu kesitlerde 6 m civarında kalınlığa sahip sıkı kum ve çakıllı kumların olduğu ve bu zemin katmanlarının üzerinde killi silt ve siltli killerin, derin katmanlarda ise silt ve kum ara katmanlı killerin olduğu gösterilmiştir.





Şekil 2.5. Adapazarı kent merkezi zemin profilleri (Sancio ve diğ., 2002)

SAÜ Geoteknik Laboratuvarı tarafından yapılan 1000'i aşkın sondaj ve deneylerle Adapazarı zeminleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, silt tabakalarının yaygın olduğu ve genelde orta ve yüksek plastisiteli killerle ardışık katmanlar halinde buldukları veya siltli kumlarla bir arada buldukları ortaya konmuştur (Arel ve diğ., 2011). Ayrıca, zemin tiplerinin yatayda ve derinlikte çok değişken olduğu ve bir araziye ait loglar arasında bile belirli bir korelasyon olmadığı belirlenmiştir. Şekil 2.6.'da verilen zemin kesitinde de görüldüğü gibi çok küçük mesafelerde bile zemin ortamları mercerler tarafından kesilmektedir (Önalp ve diğ., 2000).

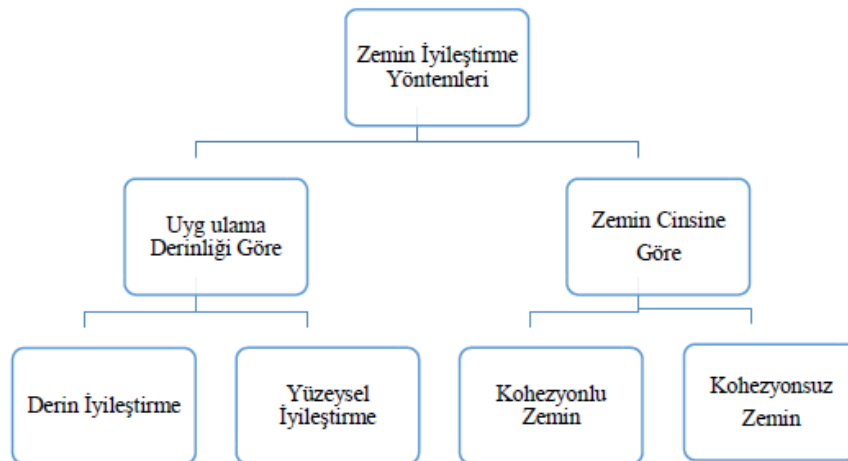


Şekil 2.6. Adapazarı Yenidoğan Mahallesi'nden zemin kesiti

## 2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Sakarya ili özellikle Adapazarı ilçesi dikkate alındığında yüzeye yakın yumuşak zeminlerin yaygın olarak bulunduğu ve şehrin genç aluviyal dolgu üzerinde yer aldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla yumuşak zeminler üzerinde yapılaşma olması durumunda bu tür zeminlerin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte zemin iyileştirme (ıslah) yöntemleri de çok çeşitli şekillerde saha uygulamalarında kullanılmaya başlanılmıştır. Araştırmacılar da bu çeşitli yöntemleri farklı kriterlere göre sınıflandırma yoluna gitmişlerdir. Zeminlerin mühendislik özellikleri zeminin cinsi yanında arazi koşullarına bağlı olarak da (sıklık derecesi, su muhtevası, ön konsolidasyon basıncı, yükleme ve drenaj koşulları gibi) geniş bir aralık içinde değişmektedir. Zemin iyileştirme yöntemleri; iyileşecek zeminin derinliğine, profiline, arazi koşullarına, problemin türüne ve yöntemin uygulanabilirliği gibi çok farklı kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. Bu kriterlerden uygulama derinliği ve zemin cinsine bağlı zemin iyileştirme yöntemleri Şekil 2.7.'de verilmiştir (Sağlamer, 1996).



Şekil 2.7. Uygulama derinliği ve zemin cinsine bağlı zemin iyileştirme yöntemleri (Sağlamer, 1996).

Zemin iyileştirme yönteminin seçiminde zeminin hangi parametrelerinin iyileştirileceğinin bilinmesi zeminde karşılaşılan probleme en etkili yöntemin tercihinin yapılmasını sağlar. Buna yönelik olarak Tablo 2.1.'de amaca yönelik zemin iyileştirme yöntemleri verilmiştir (Koçbay, 2013).

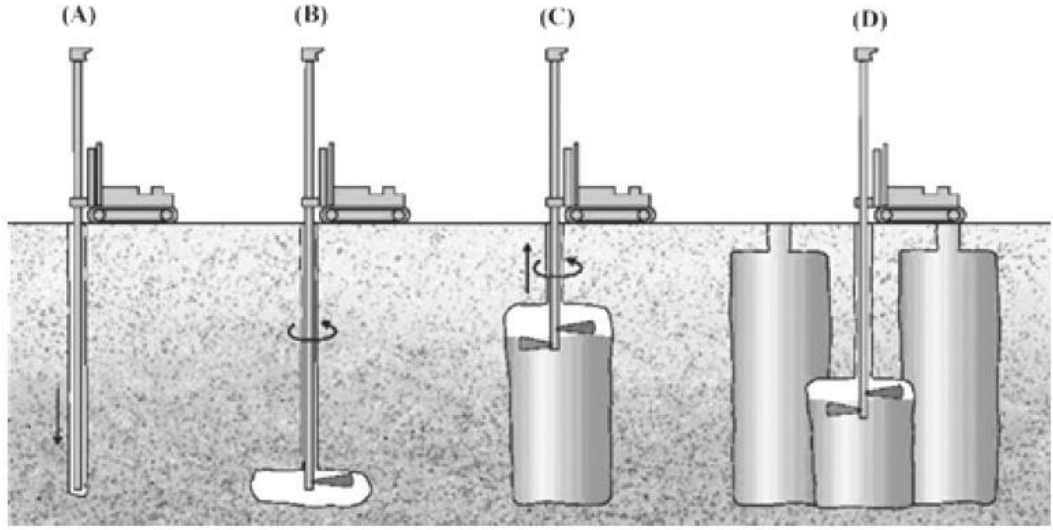
Tablo 2.1. Amacına göre zemin iyileştirme yöntemleri

Amaç	Yöntem
Sıvılaşmaya karşı direnci artırmak, zemin hareketini azaltmak	Titreşimli sondalama, Taş kolon, Derin dinamik kompaksiyon, Kum dren, Penetrasyon ve kompaksiyon enjeksiyonu, <i>Jet grouting</i>
Farklı oturmaya maruz kalacak binayı stabil hale getirmek	Penetrasyon ve kompaksiyon enjeksiyonu, <i>Jet grouting</i> , Mini Kazık
Ani oturmaya azaltmak	<i>Jet grouting</i> , Dinamik kompaksiyon, Titreşimli sondalama, Kompaksiyon enjeksiyonu, Derin karıştırma
Konsolidasyon oturmasının azaltması	Ön konsolidasyon, <i>Jet grouting</i> , Taş kolon,
Yamaç stabilitesi	Kum dren, <i>Jet grouting</i> , Penetrasyon ve kompaksiyon enjeksiyonu
Şişen zeminlerin iyileştirilmesi	Kireç ve çimento ile stabilizasyon, Şişen zeminin kaldırılması
Çöken zeminlerin iyileştirilmesi	Derin dinamik kompaksiyon, Vibro kompaksiyon, enjeksiyon

Bu çalışmada uygulama derinliğine göre yüzeysel iyileştirme olarak kötü zemini kaldırma ve derin iyileştirme olarak jet grout metodlarının yapı-zemin etkileşimindeki etkisi irdelenecektir.

### 2.1.1. Jet enjeksiyonu (jet grout) metodu

Jet enjeksiyonu (Jet grout), statik ve dinamik yüklemelerden dolayı üstyapının temelinde oluşan yükleri sağlam zemin tabakalarına aktarabilmek için üst yapı ile sağlam zemin arasında kalan zayıf zeminin iyileştirilmesi yöntemidir. Yöntemin temel amacı, zemin ortamına yüksek basınçta çimento şerbeti enjekte ederek zeminin elastisite modülünün ve taşıma kapasitesinin artırılmasıdır (Durgunoglu, 2004). Şekil 2.8.'de Jet groutun uygulama aşamaları verilmiştir. Jet grout uygulaması temel olarak belirli bir hız ve yüksek basınçla akışkan halindeki çimento şerbetinin püskürtülerek çevresindeki zeminin erozyona uğratılması ve bu sırada tijin dip noktadan yukarıya doğru devirsel hareket ile silindirik jet grout kolonu oluşturması prensibi üzerine oturur.



Şekil 2.8. Jet grout yönteminin uygulama aşamaları (Nikhbaktan ve Osanloo, 2009).

Zemin iyileştirilmesi için fore kazık, mini kazık ve çakma kazık gibi birçok farklı uygulama bulunmakla birlikte Jet grout kolonlarının bu tür rijit yapısal elemanlardan en büyük farkı zemin ortamı ile etkileşiminin diğerlerine göre çok daha yüksek olmasıdır (Doğanışık, 2010).

### 2.1.2. Jet grout ile iyileştirilmiş zeminler için kompozit alan oluşturma yaklaşımı

Kompozit alan oluşturma yaklaşımında temel olarak Jet grout kolonlarının özellikleri ile iyileştirilmemiş zeminin ilk hal özellikleri dikkate alınır. Jet grout kolonları ile iyileştirilmemiş zeminin alan oranları aşağıdaki formülden bulunur;

$$R_a = \frac{A_g}{S^2} \quad (2.1)$$

Kompozit alan tasarım değerleri için kullanılan eşitlikler ise aşağıda verilmiştir;

$$E_k = (1 - R_a) E_{zem} + R_a E_{jg} \quad (2.2)$$

$$c_k = (1 - R_a) c_{zem} + R_a c_{jg} \quad (2.3)$$

$$\phi_k = (1 - R_a) \phi_{zem} + R_a \phi_{jg} \quad (2.4)$$

$$\gamma_k = (1 - R_a) \gamma_{zem} + R_a \gamma_{jg} \quad (2.5)$$

Bu denklemlerdeki  $E$ , elastisite modülü,  $c$ , kohezyon,  $\phi$ , kayma direnci açısına karşılık gelmektedir.



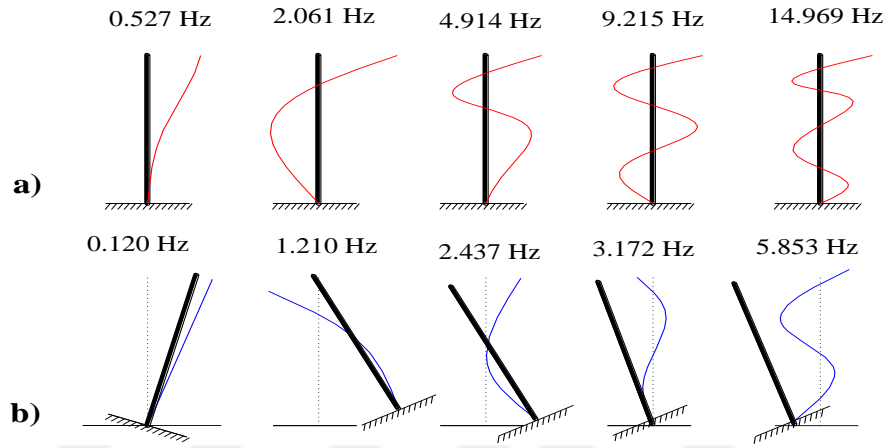
### **BÖLÜM 3. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ**

Statik ve dinamik yükler etkisi altındaki yapıların tasarımında yaygın olarak b yapıların zemine ankastre bağlı oldukları kabulü yapılır. Böyle bir yaklaşımda yapı-zemin arasındaki etkileşim dikkate alınmamakta ve yapı temelinin zemin ortamıyla bağlantısının aynı kaldığı varsayımı yapılmaktadır. Ancak, deprem anında zemin ortamı ve üzerinde inşa edilen yapının birbirlerinden farklı şekillerde hareket etmesiyle zemin, yapı davranışını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Deprem etkisi altındaki yapıların davranışında zemin önemli yapısal davranışlara neden olabileceğinden yapı-zemin etkileşimi tasarım aşamasında mutlaka dikkate alınmalıdır. Yapı-zemin etkileşimi, zemin üzerinde inşa edilen üst yapı ile zemin ortamının karşılıklı olarak birbiriyle etkileşime girmesi olarak tanımlanabilir.

Deprem, yer kabuğunda meydana gelen kırılmalarla ani olarak ortaya çıkan enerjinin titreşimler (S ve P dalgaları) halinde yayılarak yer yüzeyini sarsma olayı olarak tanımlanabilir. Deprem S dalgaları, yer kabuğunun yatay hareketine neden olurlar ve genellikle yapıların deprem yükü ve tasarım hesaplarında bu dalgalar dikkate alınır. Yüzeğe yakın yumuşak zeminler üzerine inşa edilen yapıların deprem davranışı ve tepe noktasındaki yer değiştirmeler, orta sert ve sert zeminler üzerinde inşa edilen yapılardakinden çok daha farklı olablmektedir. Bu nedenle, üstyapının zemin ortamına ankastre bağlı olduğu, üstyapı temelinde yer değiştirme ve dönmelerin olmayacağı kabullerini yapmak gerçek davranış ile örtüşmemektedir.

Deprem nedeniyle oluşan titreşim dalgaları zemin ortamı içinde yayılarak yapı temeline ulaşır. Yapı temeline ulaşan deprem dalgalarının belirli bir kısmı yapı temelinden yansiyarak zemin ortamına geri dönerler, diğer bir kısmı ise üstyapıya geçerek üstyapının titreşimine neden olur ve üstyapıdan geri yansiyarak tekrar zemin ortamına geri dönerler (Aydınoğlu, 1992). Zemin ortamı, üstyapının kütle ve rijitliği

etkileşime girerek, sistemin dinamik karakteristikleri üzerinde belirgin etkiler oluşturmaktadır. Bu nedenlerden dolayı da zemin ortamı, üstyapının dinamik davranışında, periyot ve mod şekillerinde önemli değişikliklere sebep olur (Şekil 3.1.). Eğer bu yapı-zemin etkileşimi esnasında yapı ile zemin ortamının periyotları birbirlerine çok yaklaşıyor veya çakışırsa üstyapıda rezonansa neden olurlar ve bunun sonucunda da üst yapıda çok büyük zorlanmalar oluşur.

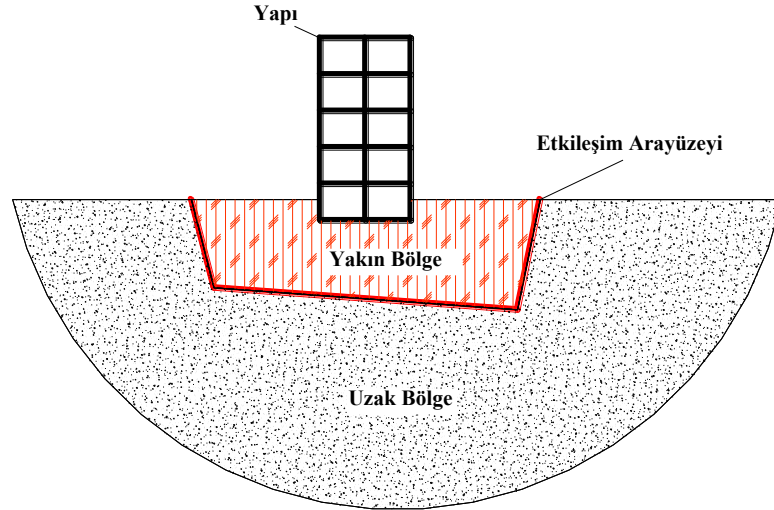


Şekil 3.1. Üst yapının mod şekilleri ve frekans değerleri (a) rijit bağlı (b) yapı-zemin etkileşimi dikkate alınıyor

Bileşik sistemler, birbirleri arasında zayıf veya kuvvetli bağlar bulunan ve kendi aralarında etkileşim içerisinde olan sistemler olarak tanımlanabilir. Bileşik sistemler temel olarak iki gruba ayrılabilir. İlk gruptaki sistemler birbirlerinden ayrı çözülemezler. Bu sistemler, sadece yüzeyler yolu ile oluşan birleşik sistemlerdir ve örnek olarak akışkan yapı etkileşimi verilebilir. İkinci grup sistemler ise birbirlerinden ayrı olarak değerlendirilebilir ve bu sistemlerin birbirine olan etkileri göz önüne alınarak çözüme ulaşılabilir. Bu sistemler, farklı sistemlerin kısmen veya tamamen bir araya gelmesiyle oluşan bileşik sistemlerdir. Bu sistemlere örnek olarak yapı-zemin etkileşimi problemi gösterilebilir. Bu tez çalışmasında deprem etkisindeki betonarme üst yapılar ile zemin ortamının etkileşimi inceleneceği için çalışma ikinci grup bileşik sistemlere girmektedir.

Yapı-zemin sistemi, sınırsız ortam, sınırlı ortam ve etkileşim arayüzü gibi farklı ortamlara ayrılarak modellenerek statik ve dinamik yükler etkisi altındaki analizleri kolaylıkla yapılabilir.

Bileşik sistem yaklaşımında, sınırsız olarak kabul edilebilecek olan zemin ortamı gerçek boyutlarında modellenemeyeceği için belirli bir bölge referans alınarak modelleme yapılır. Bileşik sisteme etki eden dinamik yüklemeler sınırsız ortam aracılığıyla tanımlanır.



Şekil 3.2. Dinamik sınırsız ortam-yapı etkileşimi (Griffiths, 1988)

Bileşik sistemde üstyapının sınırsız ortam ile etkileşimi sınırlı ortamda olmaktadır. Sınırlı ortam üstyapıya yakın olan bölge olarak adlandırılabilir. Etkileşim arayüzeyine kadar olan sınırlı ortamda zemin doğrusal davranış sergiler. Etkileşim arayüzeyi, gerilme ve şekil değiştirmelerin yüksek değerlere ulaştığı ve zemin ortamının doğrusal olmayan davranışa başladığı bölge olarak tanımlanır. Yapı-zemin etkileşimi problemlerinin çözümünde dinamik özellikler etkileşim arayüzeyinde tanımlanır (Griffiths, 1988).

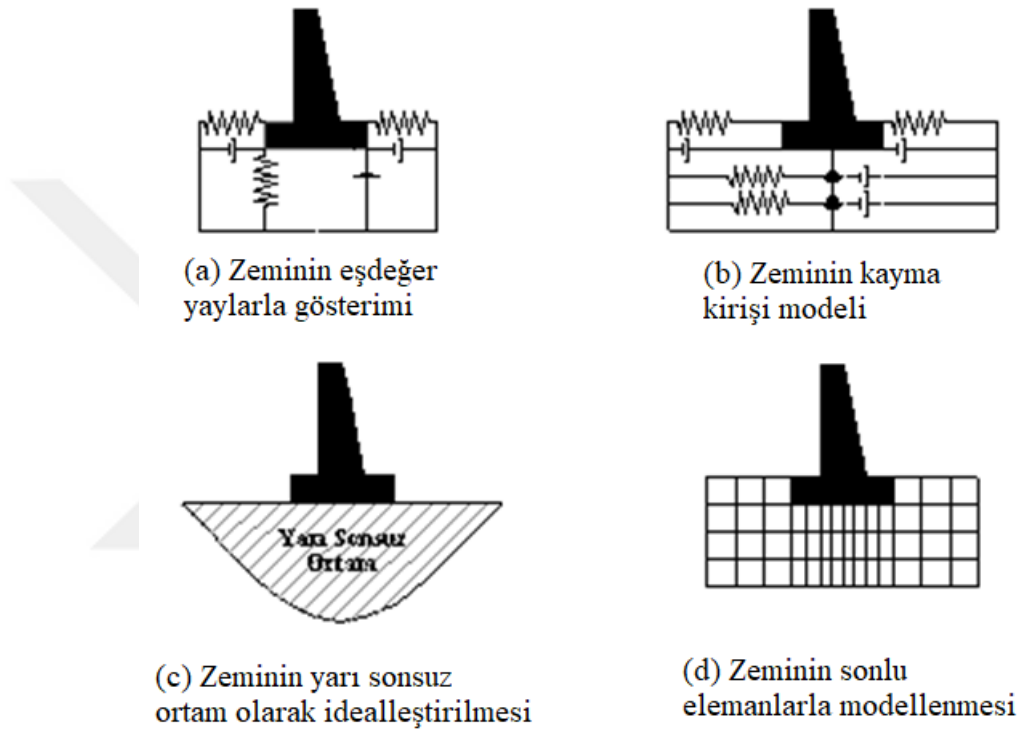
### 3.1. Yapı-Zemin Etkileşim Problemlerinde Çözüm Yöntemleri

Zemin ortamında deprem enerjisinin yayılması ve yapay sınırlardan yansımaları, üstyapının zemin ortamının davranışını etkilemesi, zemin ortamının sınırlama potansiyeli ve doğrusal olmayan davranışı gibi birçok parametre yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümünü son derece karmaşık hale getirir. Ayrıca, zemin ortamının yarı sonsuz olması, zemin ortamının farklı tabakalar halinde bulunması ve



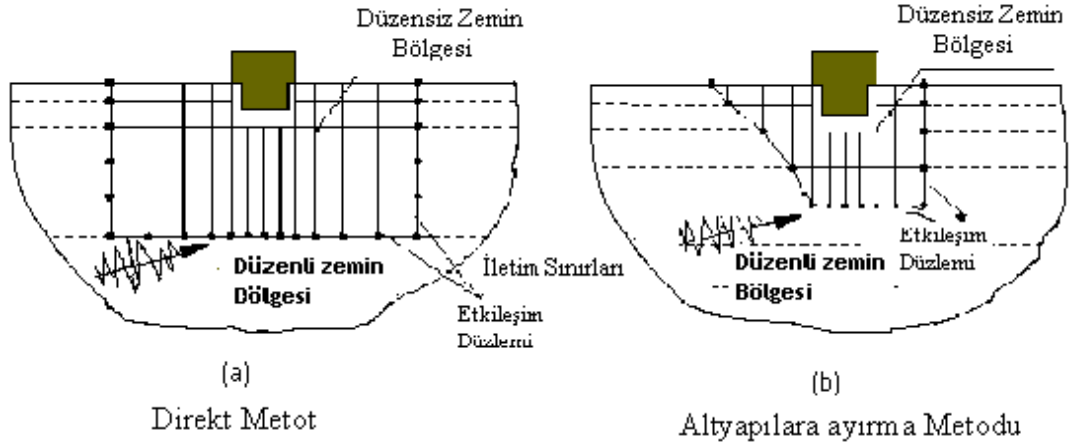
zemin tabakalarının değişkenliği gibi durumlar da bu tür problemleri klasik analiz problemlerinden ayırıştırıran özelliklerdir.

Yapı-zemin modelleri oluştururken zemin ortamı a) zemin eşdeğeri yay modeli b) zemin kayma kirişı modeli c) yarı sonsuz zemin ortamı d) sonlu elemanlar modeli olmak üzere farklı şekilde modellenebilir (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Zemin modelleme şekilleri (Garip, 2005)

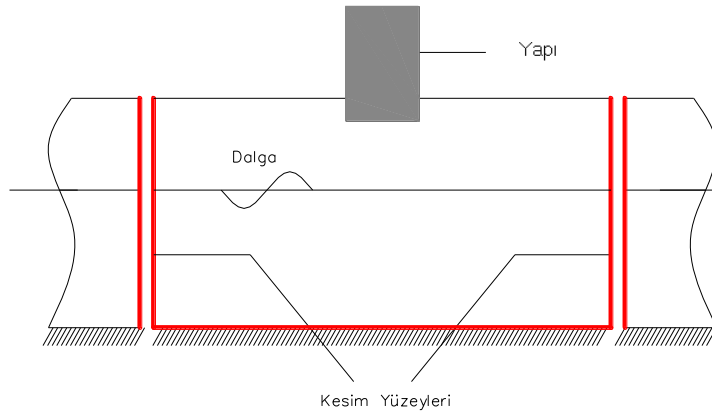
Şekil 3.4.'de gösterilen Direkt Metot ve Alt Yapılara Ayırma Metodu, yapı-zemin modellerinin dinamik analizlerinde yaygın olarak kullanılır. Zemin ortamı ve üst yapı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellendiği için bu çalışmada direkt metot tercih edilmiştir.



Şekil 3.4. Yapı-zemin etkileşim analiz metotları (Aydınöglü, 1992)

### 3.1.1. Direkt metot

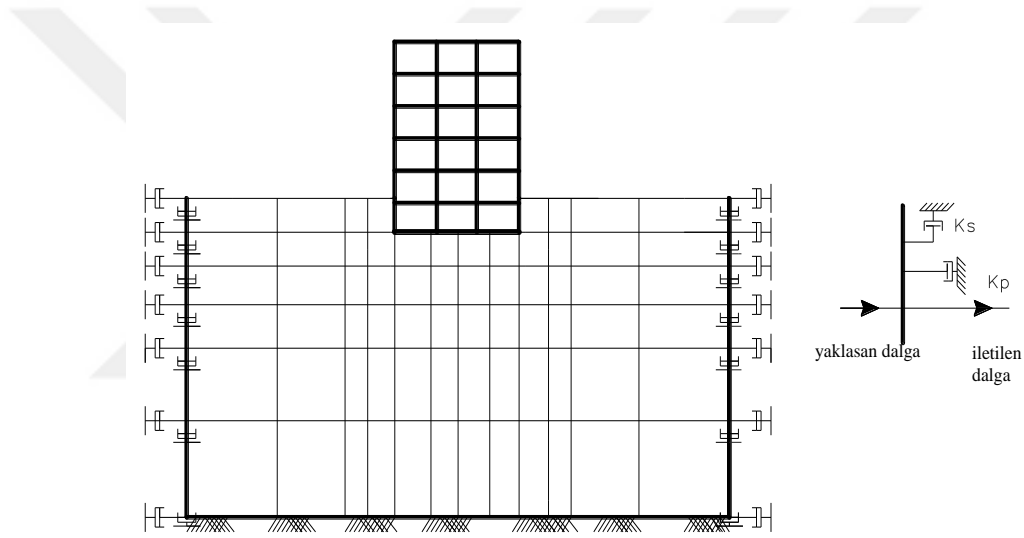
Direkt metot yönteminde, statik ve dinamik yükler etkisi altındaki yapı-zemin modelinin mod şekilleri, iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeleri sonlu elemanlar yöntemi ile tek adımda bulunabilmektedir. Zamana bağlı dinamik analizlerde ise tüm bu değerler hareket denklemi, modal analiz ve direkt integrasyon yöntemlerinden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Bu metotta sonsuza uzanan zemin ortamı, yapıdan yeterince uzak noktalarda seçilen kesim yüzeyleri ile kesilerek özel sınır şartları kesim yüzeylerine tanımlanır (Şekil 3.5.). Yapılan birçok çalışmada zemin ortamının toplam genişliğinin yapı temel taban genişliğinin 20 katı civarında olmasının yeterli olduğu belirtilmiştir (Gürsoy ve Durmuş, 2002).



Şekil 3.5. Zemin yüzeylerinin kesilmesi (Garip, 2005)

### 3.1.2. Viskoz sınır şartı

Zemin ortamında yayılan deprem dalgalarının, zeminin yapay sınırlarından yansiyarak tekrar zemin ortamına dönmesinin engellenmesi gerekir. Zemin ortamının sınır yüzeylerine uygulanan ve viskoz sınır şartı olarak adlandırılan matematiksel modeller deprem dalgalarının sınırlarda sönümlenmesini sağlarlar (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969). Viskoz sınır şartları, deprem dalgalarının yayılışının izotrop ve yayıldığı zemin ortamının lineer elastik olması kabulüyle kullanılabilir (Şekil 3.6.). Ayrıca deprem titreşim dalgalarının zemin ortamının sınırlarına çarpma açısını küçültmek için sınırlar yapıdan yeterince uzak tanımlanmalıdır.



Şekil 3.6. Direkt metotta viskoz sınır şartları (Pala, 2001)

Viskoz sınır şartı, A ilgili düğüm noktasına ait alanı göstermek üzere aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$K_p = \rho A v_p \quad (3.1)$$

$$K_s = \rho A v_s \quad (3.2)$$

Yukarıda verilen 3.1 denklemindeki  $v_p$  boyuna dalga, 3.2 denklemindeki  $v_s$  ise kayma dalga hızlarını ve  $\rho$  ise kütleli yoğunluğu tanımlamaktadır. Zeminin boyuna dalga  $v_p$  ve kayma dalga  $v_s$  hızları ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$v_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.3)$$

Burada  $G$  , zeminin kayma modülünü ve  $\lambda$  ise Lamé sabitini göstermekte olup bu ifadeler aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.4)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{2\nu G}{(1-2\nu)} \quad (3.5)$$

Burada  $\nu$  zeminin Poisson oranı,  $E$  ise zeminin elastisite modülüdür (Pala, 2001).

## **BÖLÜM 4. PLAXIS YAZILIMI VE SONLU ELEMANLAR**

Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik problemlerinin sayısal çözümlerinde yaygın olarak kullanılan etkili bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi yapı elemanlarının uygulama alanı olarak otomotiv, uçak, çelik ve betonarme gibi mühendisliğin birçok sahasını içermektedir. Deformasyon, gerilme analizi, ısı, akışkan ve magnetik akış, sızıntı ve diğer akış problemlerinin alan analizleri gibi birçok analiz yöntemini kapsamaktadır.

Bu yöntemde sürekli ortamı tanımlayan kompleks bölge, sonlu elemanlar adıyla basit geometrik şekillere bölünmektedir. Malzeme özellikleri ve çözüm bağıntıları, sonlu elemanlarla düşünülerek her sonlu elemanın köşelerindeki düğüm noktalarında bilinmeyen değerler cinsinden ifade edilmektedir. Sınır şartları ve yüklemelerin uygun bir şekilde göz önüne alınmasıyla denklemler sistemi elde edilerek ortamın yaklaşık davranışı bu denklemlerin çözümü ile sağlanmaktadır. Çözümler, yapıyı oluşturan her eleman için ayrı formüle edilmekte ve sonuçlar birleştirilerek tüm yapının davranışı elde edilmektedir. İşlem sayısı, temel yapıyı oluşturan sonlu eleman sayısına bağlı olarak artmasına karşılık analiz yöntemi basitleştirilmektedir. Bu nedenle işlemler bilgisayarlar yardımıyla yapılabilmektedir. Sonlu elemanlarda genellikle dörtgen veya iki boyutlu üçgen elemanlar kullanılmaktadır (Chantrapatla, 2012).

### **4.1. Plaxis Programı**

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak çalışan Plaxis 2D 2019 (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) paket programı kullanılmıştır. Bu program 1987 yılında Hollanda Delf Üniversitesi'nde yumuşak zemin üzerindeki dolguların sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla

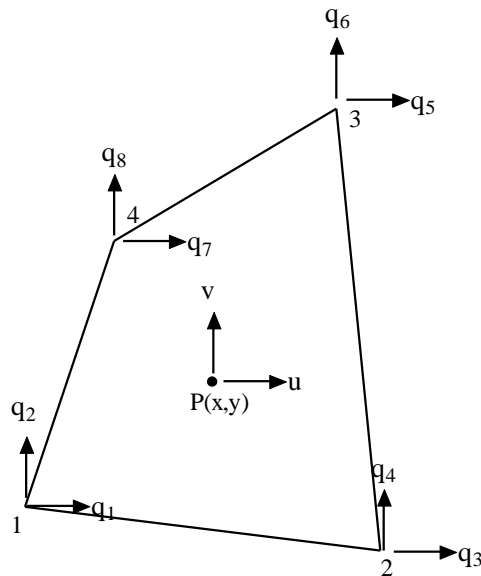
geliştirilmiştir. Daha sonra programda güncellemeler yapılarak 1993 yılında ticari bir yazılım haline dönüştürülmüştür. 1998 yılında Windows sürümü oluşturulmuştur. Günümüzde zamana bağlı davranış analizleri, stabilite analizleri, dinamik analizler, deformasyon analizleri vb. yapan sonlu elemanlar paket programı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Plaxis paket programı, yapı-zemin etkileşimi çalışmalarında etkin kullanılmaya başlanmıştır. Bunun en geçerli sebebi, Plaxis paket programının, üst yapının inşa edilecek olduğu zemin tabakalarına ait değerleri herhangi bir kabul olmaksızın gerçeğe en uygun şekilde modelleyebilmesidir.

Yapı-zemin etkileşim problemlerinde zemin tabakalarının doğrusal olmayan özellikleri hesaba katılmadan yapılan analizlerin sonuçları tutarlı olmadığından güvenilir sonuçlar elde edebilmek için zemin tabakalarının doğrusal olmayan özelliklerini de dikkate alabilen Plaxis paket programından yararlanılmıştır.

#### 4.2. İki boyutlu İzoparametrik Elemanlar

Şekil 4.1.'de dört noktalı bir izoparametrik eleman görülmektedir.



Şekil 4.1. Dört noktalı izoparametrik eleman

#### 4.2.1. Şekil fonksiyonları

Burada, lokal eksen takımı  $\xi, \eta$  ile, global eksen takımı  $x, y$  ile tanımlanmıştır. Şekil fonksiyonları kurulurken Lagrange şekil fonksiyonu  $N_i=1$ ,  $i$  noktasında birim şekil değiştirme ve diğer noktalarda sıfır yazılarak elde edilir:

$$N_1 = 1 \quad (1 \text{ nolu düğümde})$$

$$N_1 = 0 \quad (2, 3 \text{ ve } 4 \text{ nolu düğümlerde})$$

$$N_1 = \alpha_1 + \alpha_2\xi + \alpha_3\eta + \alpha_4\xi\eta \quad (4.1)$$

$$N_1 = c(1 - \xi)(1 - \eta) \quad (4.2)$$

$$1 = c[1 - (-1)][1 - (-1)]$$

$$1 = c(2)(2) \quad c = \frac{1}{4} \quad (4.3)$$

Birinci düğüm noktası için şekil fonksiyonu

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \quad (4.4)$$

olarak tanımlanır ve kalan tüm noktalar için de aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \quad (4.5)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)$$

$\xi_i, \eta_i$  i noktasının koordinatlarıdır.

Yer değıştirme terimi noktasal değerlerle tanımlanırsa:

$$u = \sum N_i q_i \quad (4.6)$$

$$u = N_1 q_1 + N_2 q_3 + N_3 q_5 + N_4 q_7$$

$$v = N_1 q_2 + N_2 q_4 + N_3 q_6 + N_4 q_8 \quad (4.7.a)$$

matris formunda yazılışı:

$$u = Nq \quad (4.7.b)$$

$$u = [u, v]^T$$

$$q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, \dots, q_8]^T$$

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

İzoparametrik formülasyonda, değıştirme fonksiyonları  $N_i$ , ayrıca noktasal koordinatlı bir elemanın bir noktasının koordinatlarını da ifade eder.

$$x = N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4$$

$$y = N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4 \quad (4.9)$$

$$u = \sum N_i u_i \quad x = \sum N_i x_i$$

$$v = \sum N_i v_i \quad y = \sum N_i y_i$$



$$f = f_{(x,y)}$$

$$\begin{matrix} x_{(\xi,\eta)} \\ y_{(\xi,\eta)} \end{matrix} \Rightarrow f = f[x_{(\xi,\eta)}, y_{(\xi,\eta)}]$$

türevlemenin zincir kuralından hareketle;

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \eta} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} \quad (4.10)$$

ya da

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \mathbf{J} \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

şeklinde ifade edilir.

Jakabiyen matrisi

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{J} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(1-\eta)x_1 + (1-\eta)x_2 + (1+\eta)x_3 - (1+\eta)x_4 & -(1-\eta)y_1 + (1-\eta)y_2 + (1+\eta)y_3 - (1+\eta)y_4 \\ -(1-\xi)x_1 - (1+\xi)x_2 + (1+\xi)x_3 + (1-\xi)x_4 & -(1-\xi)y_1 - (1+\xi)y_2 + (1+\xi)y_3 + (1-\xi)y_4 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

şeklinde ifade edilir.

(4.11) denkleminin şu şekilde tersi alınabilir;

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{Bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (4.14)$$

ya da

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det \mathbf{J}} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

Bu ifadeler elemanın rijitlik matrisinde kullanılacaktır.

#### 4.2.2. Eleman rijitlik matrisi

Dörtgen elemanın rijitlik matrisi gövdedeki gerilme enerjisinden türetilmektedir;

$$U = \int_v \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV \quad (4.16)$$

ya da

$$U = \sum_e t_e \int_e \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV \quad (4.17)$$

$t_e$   $e$  elemanının kalınlığını temsil etmektedir.

Gerilme ve yer değiştirme ilişkisi

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$

$f \equiv u$  ise denklem (4.15) de

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (4.19.a)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial \xi} \\ \frac{\partial v}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (4.19.b)$$

olur.

Denklem (4.18) ve (4.19.a,b)

$$\varepsilon = A \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi} \\ \frac{\partial v}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (4.20)$$

A;

$$A = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -J_{21} & J_{11} \\ -J_{21} & J_{11} & J_{22} & -J_{12} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

olur.

Enterpolasyon denklemleri (4.7a)'dan

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi} \\ \frac{\partial v}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \mathbf{Gq} \quad (4.22)$$

$$\mathbf{G} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(1-\eta) & 0 & (1-\eta) & 0 & (1+\eta) & 0 & -(1+\eta) & 0 \\ -(1-\xi) & 0 & -(1+\xi) & 0 & (1+\xi) & 0 & (1-\xi) & 0 \\ 0 & -(1-\eta) & 0 & (1-\eta) & 0 & (1+\eta) & 0 & -(1+\eta) \\ 0 & -(1-\xi) & 0 & -(1+\xi) & 0 & (1+\xi) & 0 & (1-\xi) \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

(4.20) ve (4.22) denklemleri

$$\varepsilon = \mathbf{Bq} \quad (4.24)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{AG} \quad (4.25)$$

ifadeleri elde edilir.

Gerilme denklemi ise

$$\sigma = \mathbf{DBq} \quad (4.26)$$

olur.

D matrisinin boyutu  $3 \times 3$ 'dür.

(4.17) denkleminde verilen gerilme enerjisi

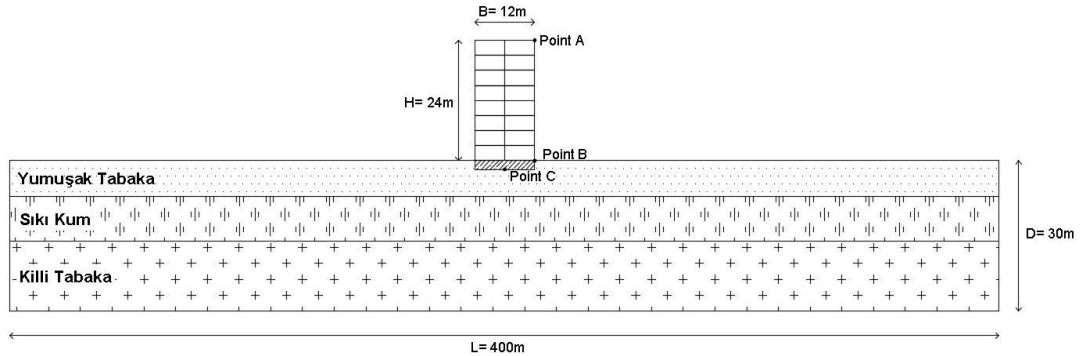
$$U = \sum_e \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \left[ t_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \det J d\xi d\eta \right] \mathbf{q} \quad (4.27.a)$$

$$U = \sum_e \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{k}^e \mathbf{q} \quad (4.27.b)$$

$$\mathbf{k}^e = t_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \det J d\xi d\eta \quad (4.28)$$

## BÖLÜM 5. SAYISAL ÖRNEKLER

Bu çalışmada, tabaka kalınlıkları farklı olan yumuşak zeminler üzerine inşa edilen betonarme binaların deprem davranışına zemin özelliklerinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 4 ve 8 katlı iki farklı yapı seçilmiş ve bu yapıların sonlu eleman prensibine dayalı yapı-zemin modelleri oluşturulmuştur. Yapıların planları, kesit ve malzeme özellikleri sabit tutulurken yapı-zemin modellerinin altyapıları ise Adapazarı zeminleri dikkate alınarak üç farklı zemin tabakası ile oluşturulmuştur (Şekil 5.1.) (Sert ve Bol, 2005).



Şekil 5.1. Yapı-zemin modeli

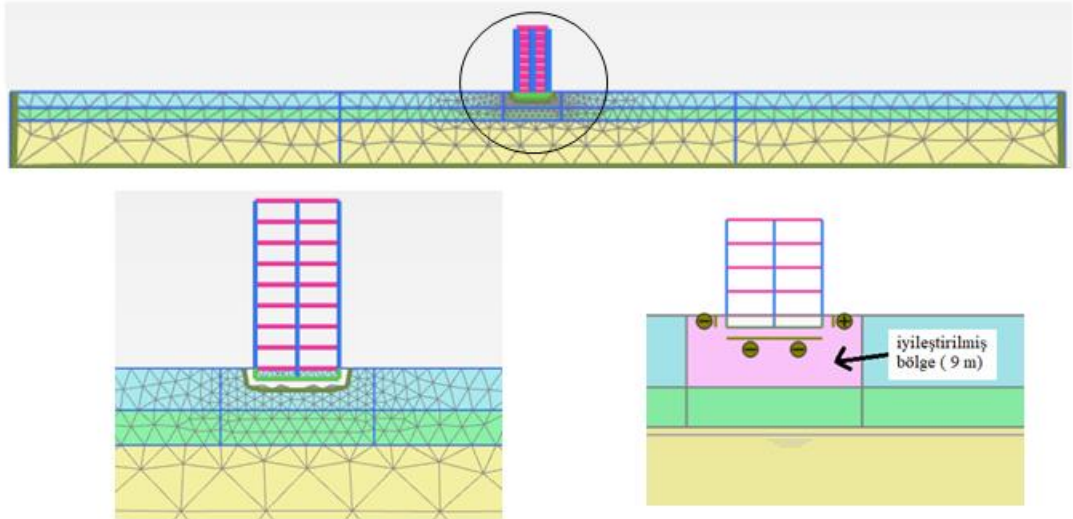
### 5.1. Yapı-Zemin Sonlu Eleman Modelleri

Bu çalışma kapsamında, iki farklı üstyapı ve 6 farklı altyapı olmak üzere toplam 12 yapı-zemin modeli oluşturulmuş ve dinamik analizleri PLAXIS 2D programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.1.'de gösterildiği gibi üst yapı modelleri oluşturulurken yapı yüksekliğinin yapı genişliğine oranı  $H/B=1$  ve  $H/B=2$  olarak seçilmiştir. Alt yapı modellerinde ise üç farklı zemin tabakası kullanılmış ve zemin tabaka kalınlıkları değiştirilerek hem yumuşak zemin tabakasının kalınlığının hem de üst yapı altındaki yumuşak zemin tabakasına iyileştirilme uygulanmasının yapı-zemin modelinin deprem davranışına etkileri incelenmiştir. Zemin iyileştirilmesi

olarak yumuşak zemin tabaka kalınlığının az olduğu durumlarda “*zemin değiştirme*”, yüksek olduğu durumlarda ise “*jet grout*” yöntemi tercih edilmiştir. Yapı-zemin modellerinin deprem etkisi altındaki davranışları zaman tanım alanında tanımlanmış olan deprem kaydı kullanılarak simüle edilmiştir. Şekil 5.2.’de yapı zemin modelinin PAXIS 2D v2019 programı yardımıyla oluşturulan sonlu eleman modeli ve sonlu eleman ağı (mesh) gösterilmiştir. Şekil 5.2.’de ayrıca 9 m kalınlığında jet groutla iyileştirilmiş kompozit bölge örnek olarak verilmiştir.

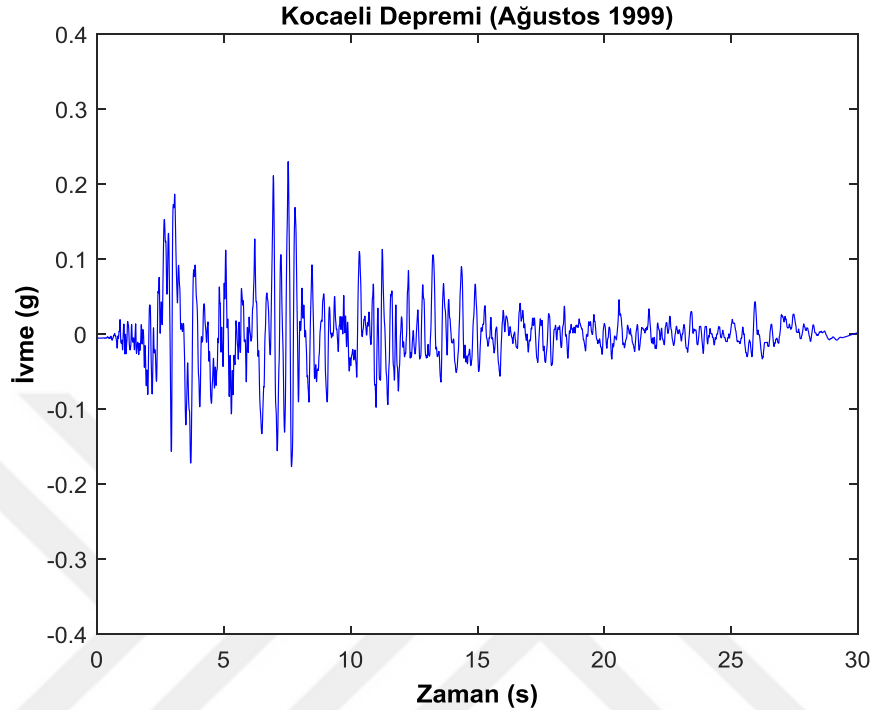
Tablo 5.1. Yapı-zemin sonlu eleman modellerinin matrisi

Model Adı	Üst Yapı Modeli H/B	Alt Yapı Modeli			
		Yumuşak Zemin		Sıkı Kum	Killi Silt
		$H_{ZT}$ (m)	İyileştirme	$H_{ZT}$ (m)	$H_{ZT}$ (m)
Model 1	1,00	3,00	Yok	5,00	22,00
Model 2	2,00				
Model 3	1,00	3,00	Zemin Değiştirme	5,00	22,00
Model 4	2,00				
Model 5	1,00	6,00	Yok	5,00	19,00
Model 6	2,00				
Model 7	1,00	6,00	Jet Grout	5,00	19,00
Model 8	2,00				
Model 9	1,00	9,00	Yok	5,00	16,00
Model 10	2,00				
Model 11	1,00	9,00	Jet Grout	5,00	16,00
Model 12	2,00				



Şekil 5.2. Yapı-zemin modelinin sonlu eleman modeli (PLAXIS 2D)

Yapı-zemin modellerinin tamamının analizlerinde Şekil 5.3.'de verilen 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi ivme kayıtları kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Marmara depremi ivme kaydı

### 5.1.1. Yapı-zemin sonlu eleman modelinde betonarme üst yapıları

Bu çalışma kapsamında üst yapı, betonarme düzlem çerçeve olarak dikkate alınmıştır. Üst yapının elemanlarına ait teknik özellikler Tablo 5.2.'de verilmiştir. Sonlu eleman modelleri oluşturulurken PLAXIS 2D sonlu eleman modelinin temel yapısı nedeniyle üst yapının düzlem zorlanma prensiplerine göre idealleştirilmesi gerekmektedir.

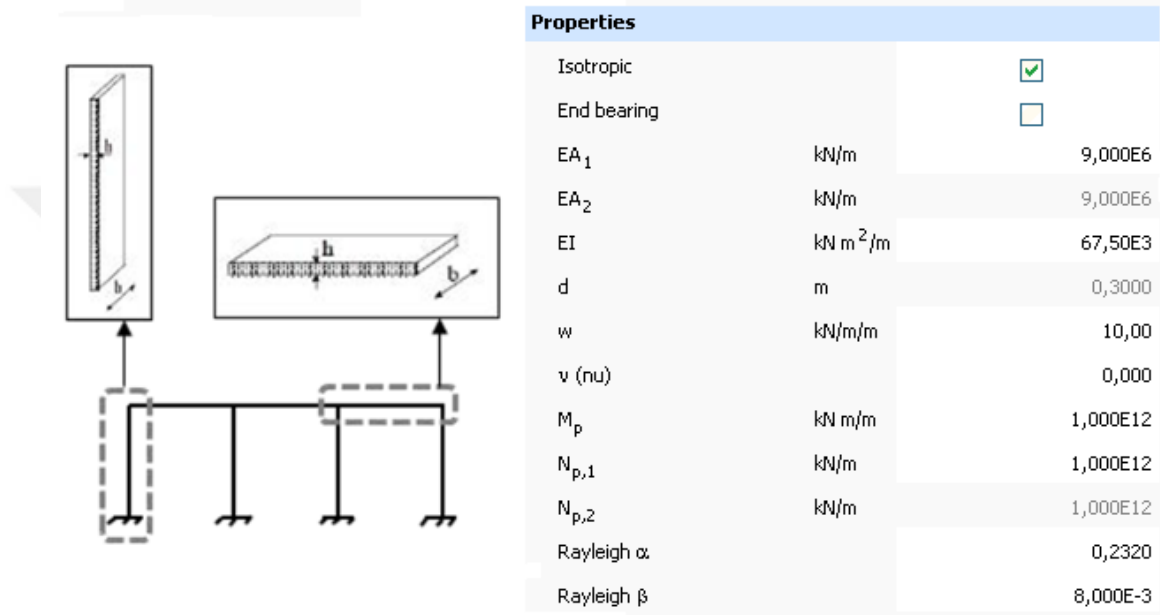
Tablo 5.2. Yapı-zemin modelinin betonarme üst yapısına ait yapısal elemanların özellikleri

		Kolon	Kiriş	Temel
Eksenel Rijitlik	EA (kN/m)	$4,8 \times 10^6$	$3,6 \times 10^6$	$12,00 \times 10^6$
Eğilme Rijitliği	EI (kNm <sup>2</sup> /m)	$6,4 \times 10^4$	$4,8 \times 10^4$	$16,00 \times 10^4$

PLAXIS 2D paket programında kullanılan elemanların tamamının 1m'lik birim derinliğe sahip olduğu kabul edilir. Yapı-zemin modelinin üst yapısının tüm



elemanlarının derinliğinin program tarafından  $b=1$  m olarak dikkate alınması nedeniyle elemanlar, aksel rijitlik (EA) ve eğilme rijitliklerine (EI) bağlı olarak düzlemsel rijit eleman olarak yeniden tanımlanmalıdır. Şekil 5.3.'te görüldüğü gibi üstyapı elemanlarının d kalınlıkları aksel rijitlik (EA) ve eğilme rijitliklerine (EI) dikkate alınarak belirlenmiştir. Betonarme üst yapısının beton sınıfı C25 olarak seçilmiştir.



Şekil 5.4. Yapısal elemanların düzlemsel rijit eleman olarak tanımlanması

### 5.1.2. Yapı-zemin sonlu eleman modelinin zemin alt yapıları

Yapı-zemin modelinin alt yapısında kullanılan olan zemin tabakalarının zemin parametreleri Tablo 5.3.'te, iyileştirmede kullanılan zeminlerin zemin parametreleri ise Tablo 5.4.'te sunulmuştur. Zemin tabakaları literatürdeki (Sert ve diğ., 2005) çalışmalardan seçilmiş ve bu zeminde bulunan yer altı su seviyesi -15 m olarak yapı-zemin modelinde dikkate alınarak modellenmeler yapılmıştır.

Tablo 5.3. Zemin Parametreleri

Tabaka ismi	Siltli-Kil (Yumuşak Zemin)	Sıkı Kum	Kil
Material Model	Hardening Soil Model	Hardening Soil Model	Hardening Soil Model
Material Type	Undrained	Undrained	Undrained
$\rho_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,5	17	17
$\rho_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	18	20
$e_0$	0,9	0,6	0,9
$E_{50}^{ref}$ (kPa)	5000	60000	15000
$E_{oed}^{ref}$ (kPa)	5000	60000	15000
$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	15000	180000	45000
Power, m	0,8	0,5	0,9
$c'$ (kPa)	10	1	20
$\phi'$ (°)	20	38	25
$\psi$ (°)	0	8	0
$v'_{ur}$	0,2	0,2	0,2
$p^{ref}$ (kPa)	100	100	100
$K_n^{nc}$	0,658	0,384	0,577
$c'_{increment}$ (kPa)	1	0	1
$y_{ref}$ (m)	0	0	-11
$R_f$	0,9	0,9	0,9
OCR	3	2	1,5

Tablo 5.4. İyileştirme uygulanan zeminlere ait zemin parametreleri

İyileştirme Tipi	Zemin Değişirme	İyileştirme Tipi	JetGrout
Material Model	Hardening Soil Model	Material Model	Hardening Soil Model
Material Type	Undrained	Material Type	Undrained (B)
$\rho_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17	$\rho_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,5
$\rho_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	$\rho_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18
$e_0$	0,6	$e_0$	0,5
$E_{50}^{ref}$ (kPa)	50000	$E_{50}^{ref}$ (kPa)	24490
$E_{oed}^{ref}$ (kPa)	50000	$E_{oed}^{ref}$ (kPa)	24490
$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	150000	$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	73740
Power, m	0,5	Power, m	0,5
$c'$ (kPa)	1	$s_u$ (kPa)	78
$\phi'$ (°)	40	$\phi'$ (°)	0
$\psi$ (°)	8	$\psi$ (°)	0
$v'_{ur}$	0,2	$v'_{ur}$	0,2
$p^{ref}$ (kPa)	100	$p^{ref}$ (kPa)	100
$K_n^{nc}$	0,384	$K_n^{nc}$	-
$c'_{increment}$ (kPa)	0	$c'_{increment}$ (kPa)	1
$y_{ref}$ (m)	0	$y_{ref}$ (m)	0
$R_f$	0,9	$R_f$	0,9
OCR	2	OCR	3

## 5.2. Sonlu Eleman Analiz (Plaxis) Sonuçları

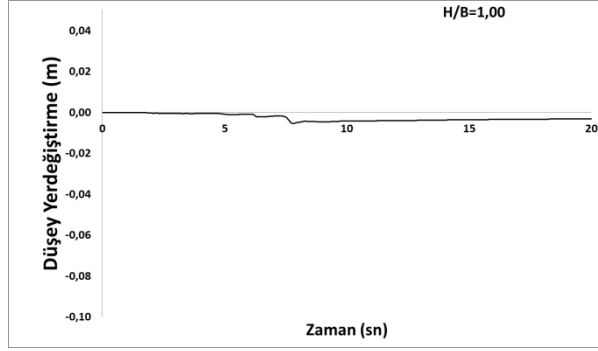
Yapı-zemin modellerinin altyapıları, farklı kalınlıklardaki yumuşak zemin, sıkı kum ve killi silt zemin katmanlarından oluşmakta olup betonarme yapının konumlandırıldığı yumuşak zemin katmanında iki farklı iyileştirme yöntemi dikkate alınmıştır. Üst yapı olarak ise tüm zemin profilleri için 4 ve 8 katlı iki farklı betonarme yapı modeli oluşturulmuştur. Sonlu eleman yöntemine dayalı olarak çalışan Plaxis programının zemin profillerinin doğrusal olmayan davranışını modelleyebilme özellikleri kullanılarak deprem etkisi altındaki yapı zemin modellerinin gerçekçi davranışı elde edilmeye çalışılmıştır.

### 5.2.1. Yumuşak zemin katmanı kalınlığı $H_{ZT} = 3 \text{ m}$ olan yapı-zemin modelleri

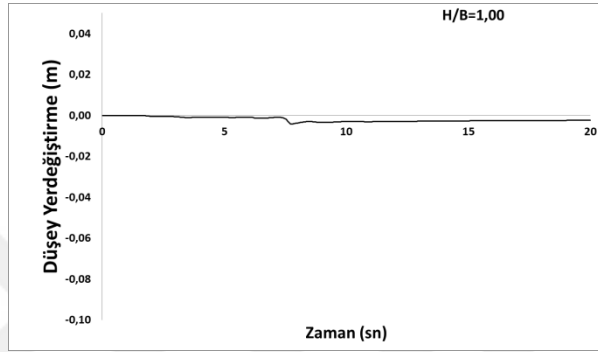
Zemin değiştirme, betonarme üstyapısının temeli altından sağlam tabakaya kadar 1.5 m kalınlığında ve temelin her iki kenarından 50 cm taşarak 13 m genişliğinde uygulanmıştır. Tablo 5.5.'de görüldüğü gibi üst yapı 4 katlı ( $H/B=1$ ) ve 8 katlı ( $H/B=2$ ) olarak tanımlanmış ve yapı-zemin sonlu eleman modellerinin tamamı, Marmara Depremi etkisi altında analiz edilmiştir. Yapı-zemin modelinin davranışı hem betonarme temelin oturması (düşey yönde yer değiştirme) hem de betonarme üstyapının seçilen noktalarının yatay doğrultudaki yer değiştirmesi halinde verilmiştir. Betonarme üstyapı temelinin (C noktası) düşey yer değiştirmesi Şekil 5.5.-5.8.'de, betonarme üstyapısının A ve B noktalarının yatay doğrultudaki yer değiştirmeleri Şekil 5.9.-5.12.'de ve A noktasının (tepe noktası) B noktasına (üstyapının temeli) göre görece yatay yer değiştirmeleri Şekil 5.13.-5.16.'da grafikler halinde sunulmuştur.

Tablo 5.5. Yumuşak zemin tabaka kalınlığı  $H_{ZT}=3 \text{ m}$  olan yapı-zemin modelleri

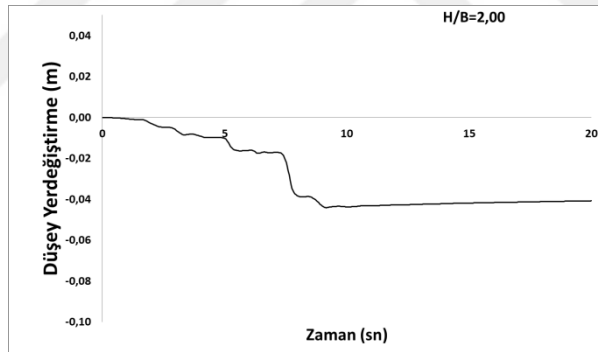
Model Adı	Üst Yapı Modeli H/B	Alt Yapı Modeli			
		Yumuşak Zemin		Sıkı Kum	Killi Silt
		$H_{ZT}$ (m)	İyileştirme	$H_{ZT}$ (m)	$H_{ZT}$ (m)
Model 1	1,00	3,00	Yok	5,00	22,00
Model 2	2,00				
Model 3	1,00	3,00	Zemin Değiştirme	5,00	22,00
Model 4	2,00				



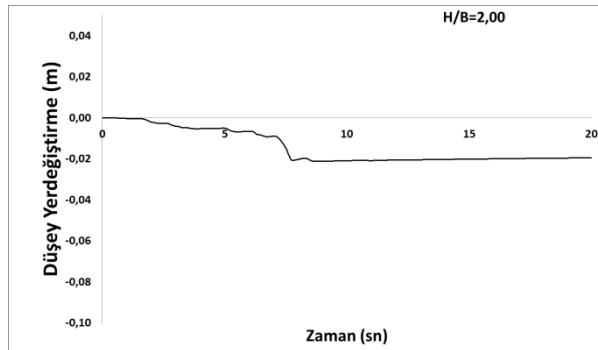
Şekil 5.5. Betonarme üstyapı temelının H/B=1,00 için düşey yer değıştirmesi (zemin iyileştirme yok)



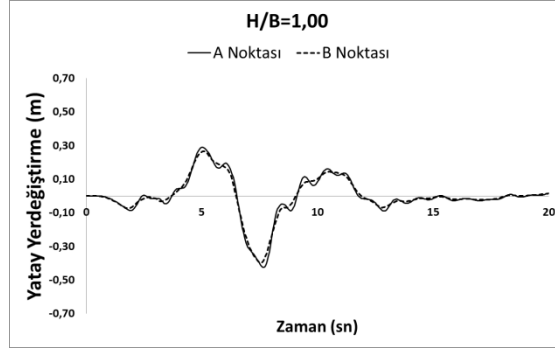
Şekil 5.6. Betonarme üstyapı temelının H/B=1,00 için düşey yer değıştirmesi (zemin iyileştirme var)



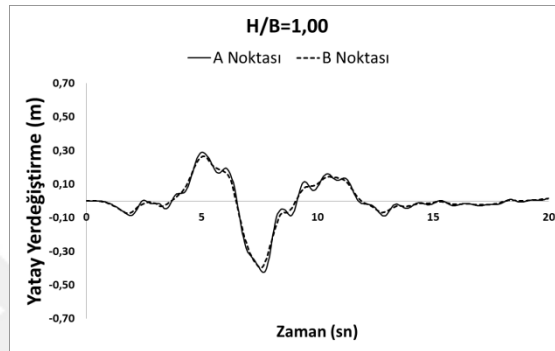
Şekil 5.7. Betonarme üstyapı temelının H/B=2,00 için düşey yer değıştirmesi (zemin iyileştirme yok)



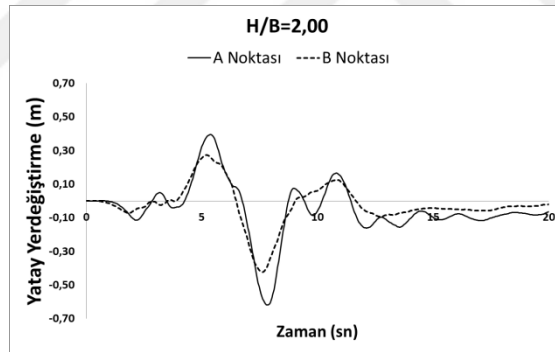
Şekil 5.8. Betonarme üstyapı temelının H/B=2,00 için düşey yer değıştirmesi (zemin iyileştirme var)



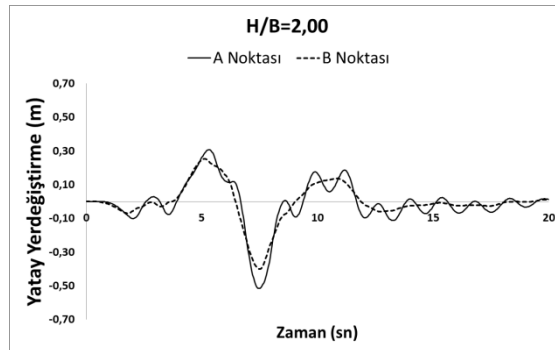
Şekil 5.9. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok)



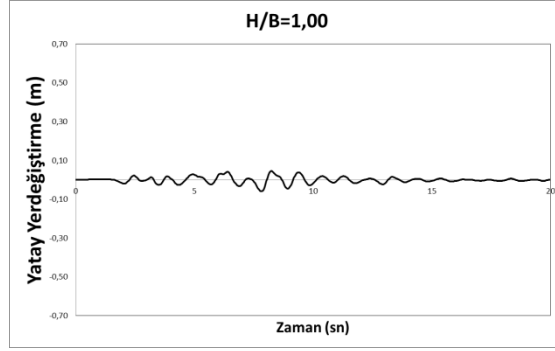
Şekil 5.10. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var)



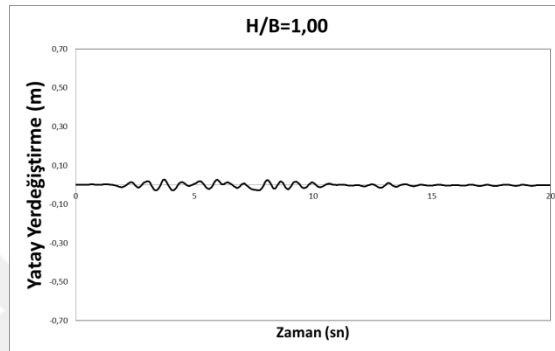
Şekil 5.11. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok)



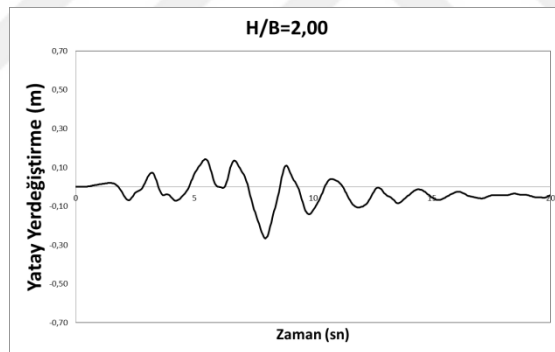
Şekil 5.12. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var)



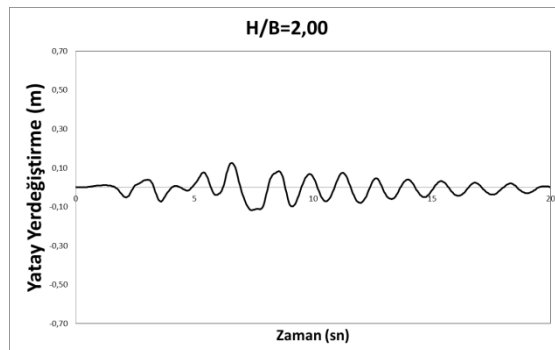
Şekil 5.13. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok)



Şekil 5.14. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var)



Şekil 5.15. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok)



Şekil 5.16. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var)

Yumuşak zemin tabaka kalınlığının 3 m olduğu durumlarda temelin düşey yer değiştirmesi (C noktası) H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalarda sırasıyla 0,50 cm ve 4,40 cm civarlarındadır (Şekil 5.5.-5.7.). Bu kalınlıktaki yumuşak zeminlerde “zemin değiştirmesi” tercihiyle iyileştirme yapılması durumunda temelin düşey yer değiştirmesi değerleri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 0,40 cm ve 2,10 cm değerlerine gerilemektedir (Şekil 5.6.-5.8.). Dolayısıyla üstyapı temelinin düşey yer değiştirmesindeki iyileşme, H/B oranı 1,00 olan binalarda %20 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %52 seviyelerindedir.

Betonarme üstyapının tepe noktasının (A noktası) yatay yer değiştirmelerinin en büyük değeri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 0,42 m ve 0,62 m iken bu değerler temel üst kotu (B noktası) için sırasıyla 0,40 m ve 0,42 m civarlarındadır (Şekil 5.9.-5.11.). Üstyapı altındaki yumuşak zeminde iyileştirme yapılması sonrasında bu değerler tepe noktası (A noktası) için sırasıyla 0,41 m ve 0,52 m ve temel üst kotu (B noktası) için ise sırasıyla 0,39 m ve 0,40 m civarlarındadır (Şekil 5.10.-5.12.).

Betonarme üstyapısının deprem etkisi altındaki davranışı, tepe noktasının (A noktası) temel üst kotuna (B noktası) göre görelî yatay yer değiştirmesi üzerinden daha belirgin bir şekilde belirlenebilir. Görelî yatay yer değiştirme değerleri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 5,90 cm ve 26,50 cm civarlarındadır (Şekil 5.13.-5.15.). İyileştirme yapılması sonrasında ise görelî yatay yer değiştirme değerleri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 2,90 cm ve 12,50 cm değerlerine gerilemektedir (Şekil 5.14.-5.16.). Dolayısıyla üstyapı tepe noktasının görelî yatay yer değiştirmesindeki iyileşme, H/B oranı 1,00 olan binalarda %51 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %53 seviyelerindedir.

### **5.2.2. Yumuşak zemin katmanı kalınlığı $H_{ZT} = 6 m$ olan yapı-zemin modelleri**

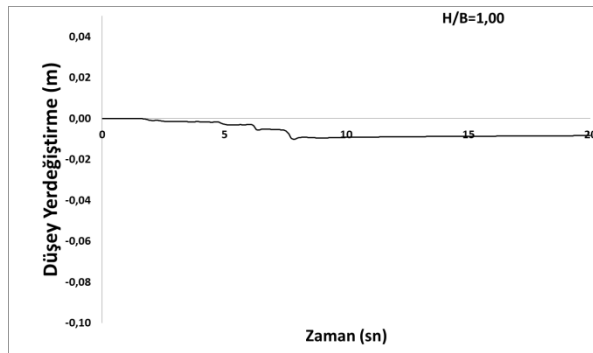
Yumuşak zemin katmanı kalınlığı 6 m olan yapı-zemin modellerinde zemin iyileştirmesi olarak “jet grout” yöntemi tercih edilmiştir. Jet grout, betonarme

üstyapısının temel altına ve her iki kenarından 50 cm taşarak 13 m genişliğinde ve 4,5 m yüksekliğinde uygulanmış ve kompozit ortam kabulü yapılmıştır.

Tablo 5.6.'da görüldüğü gibi üst yapı sırasıyla 4 katlı ( $H/B=1$ ) ve 8 katlı ( $H/B=2$ ) olarak tanımlanmış ve yapı-zemin sonlu eleman modellerinin tamamı, Marmara Depremi etkisi altında analiz edilmiştir. Analiz sonuçları dikkate alınarak yapı-zemin modelinin davranışı hem betonarme temelin oturması (düşey yönde yer değiştirme) hem de betonarme üstyapısının seçilen noktalarının yatay doğrultudaki yer değiştirmesi halinde verilmiştir. Betonarme üstyapı temelini C noktasının düşey yer değiştirmesi Şekil 5.17.-5.20.'de, betonarme üstyapısının A ve B noktalarının yatay doğrultudaki yer değiştirmeleri Şekil 5.21.-5.24.'de ve betonarme üstyapısının A noktasının (tepe noktası) B noktasına (üstyapısının temeli) göre görece yatay yer değiştirmeleri Şekil 5.25.-5.28.'de grafikler halinde sunulmuştur.

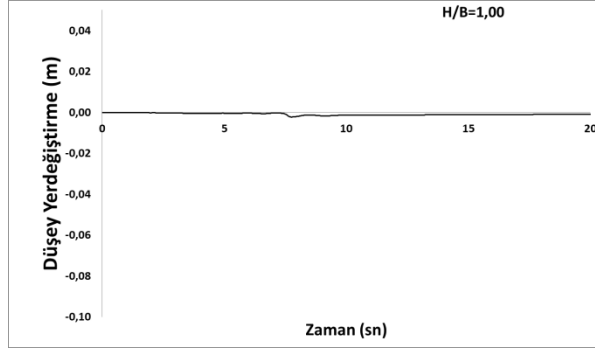
Tablo 5.6. Yumuşak zemin tabaka kalınlığı  $H_{ZT}=6$  m olan yapı-zemin modelleri

Model Adı	Üst Yapı Modeli H/B	Alt Yapı Modeli			
		Yumuşak Zemin		Sıkı Kum	Killi Silt
		$H_{ZT}$ (m)	İyileştirme	$H_{ZT}$ (m)	$H_{ZT}$ (m)
Model 5	1,00	6,00	Yok	5,00	19,00
Model 6	2,00				
Model 7	1,00	6,00	Jet Grout	5,00	19,00
Model 8	2,00				

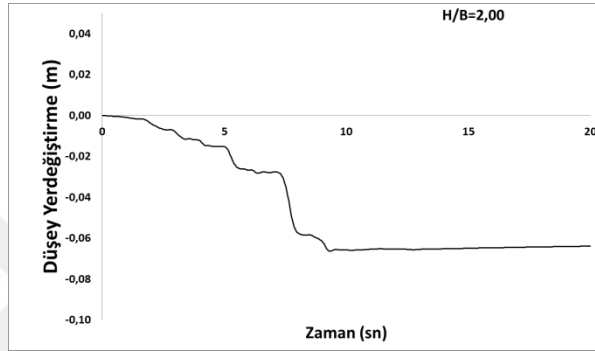


Şekil 5.17. Betonarme üstyapı temelini  $H/B=1,00$  için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok)

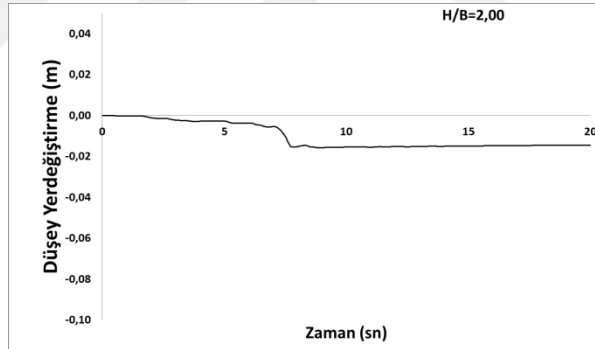




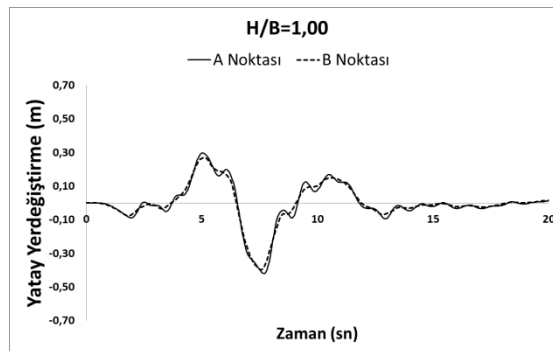
Şekil 5.18. Betonarme üstyapı temelini H/B=1,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var)



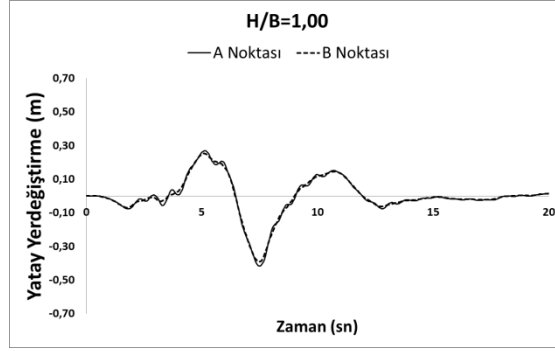
Şekil 5.19. Betonarme üstyapı temelini H/B=2,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok)



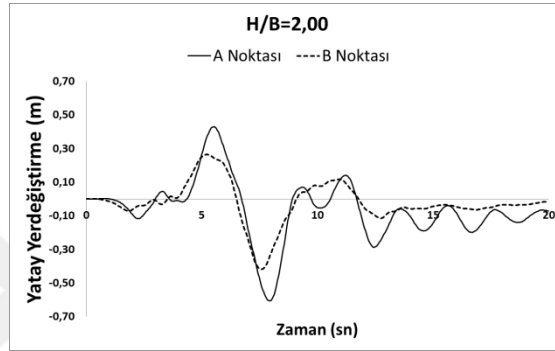
Şekil 5.20. Betonarme üstyapı temelini H/B=2,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var)



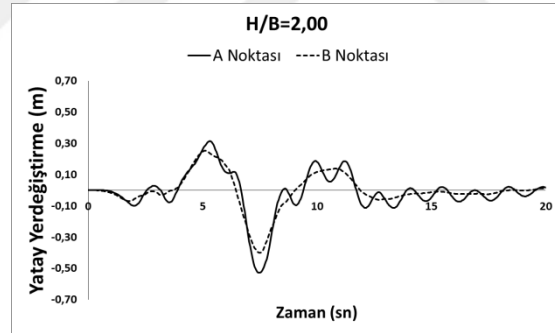
Şekil 5.21. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok)



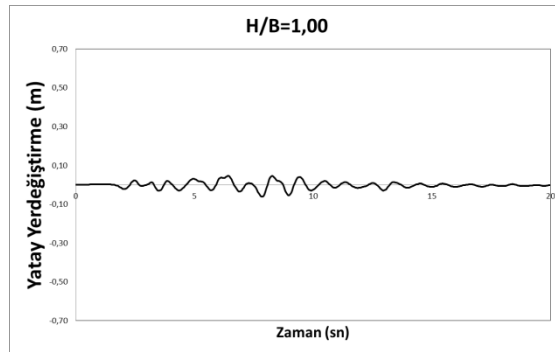
Şekil 5.22. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var)



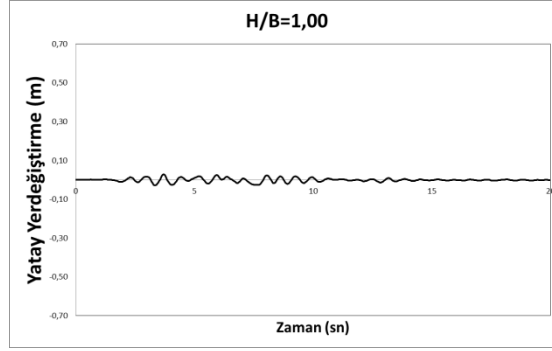
Şekil 5.23. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok)



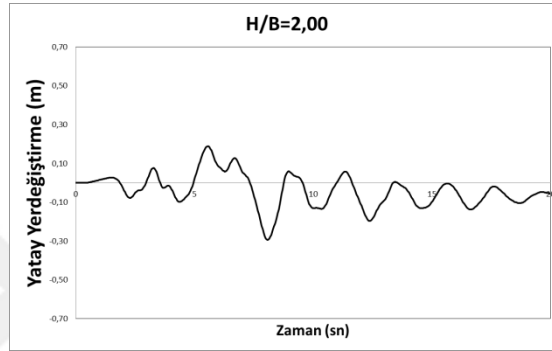
Şekil 5.24. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var)



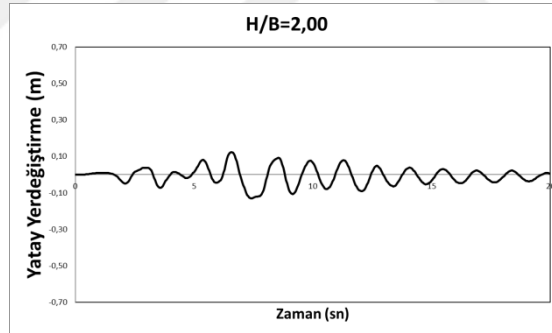
Şekil 5.25. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için görel yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok)



Şekil 5.26. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için görelî yatay yer değıştirmesi (zemin iyileştirme var)



Şekil 5.27. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için görelî yatay yer değıştirmesi (zemin iyileştirme yok)



Şekil 5.28. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için görelî yatay yer değıştirmesi (zemin iyileştirme var)

Yumuşak zeminin tabaka kalınlığının 6 m olduğu durumlarda temelin düşey yer değıştirmesi (C noktası) H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalarda sırasıyla 1,00 cm ve 6,60 cm civarlarındadır (Şekil 5.17.-5.19.). Bu kalınlıktaki yumuşak zeminlerde “jet grout” tercihiyle iyileştirme yapılması durumunda temelin düşey yer değıştirmesi değeri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 0,20 cm ve 1,60 cm değeri gerilemektedir (Şekil 5.18.-5.20.). Dolayısıyla üstyapı temelinin düşey yer değıştirmesindeki iyileşme, H/B oranı 1,00 olan binalarda %80 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %76 seviyelerindedir.

Betonarme üstyapının tepe noktasının (A noktası) yatay yer değiştirmelerinin en büyük değeri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 0,42 m ve 0,61 m iken bu değerler temel üst kotu (B noktası) için sırasıyla 0,40 m ve 0,42 m civarlarındadır (Şekil 5.21.-5.23.). Üstyapı altındaki yumuşak zeminde iyileştirme yapılması sonrasında bu değerler tepe noktası (A noktası) için sırasıyla 0,41 m ve 0,53 m ve temel üst kotu (B noktası) için ise sırasıyla 0,39 m ve 0,40 m civarlarındadır (Şekil 5.22.-5.24.).

Betonarme üstyapısının deprem etkisi altındaki davranışı, tepe noktasının (A noktası) temel üst kotuna (B noktası) göre görelı yatay yer değiştirmesi üzerinden daha belirgin bir şekilde belirlenebilir. Görelı yatay yer değiştirme değerleri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 6,20 cm ve 29,40 cm civarlarındadır (Şekil 5.25.-5.27.). İyileştirme yapılması sonrasında ise görelı yatay yer değiştirme değerleri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 2,80 cm ve 13,00 cm değerlerine gerilemektedir (Şekil 5.26.-5.28.). Dolayısıyla üstyapı tepe noktasının görelı yatay yer değiştirmesindeki iyileşme, H/B oranı 1,00 olan binalarda %55 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %56 seviyelerindedir.

### 5.2.3. Yumuşak zemin katmanı kalınlığı $H_{ZT} = 9 \text{ m}$ olan yapı-zemin modelleri

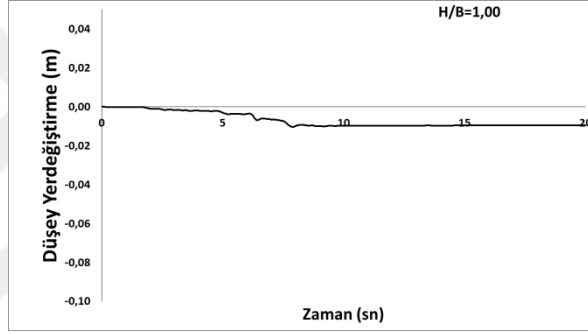
Yumuşak zemin katmanı kalınlığı 9 m olan yapı-zemin modellerinde zemin iyileştirmesi olarak “jet grout” yöntemi tercih edilmiştir. Jet grout, betonarme üstyapısının temel altına ve her iki kenarından 50 cm taşarak 13 m genişliğinde ve 7,5 m yüksekliğinde uygulanmış ve kompozit ortam kabulü yapılmıştır.

Tablo 5.7.’de görüldüğü gibi üst yapı sırasıyla 4 katlı (H/B=1) ve 8 katlı (H/B=2) olarak tanımlanmış ve yapı-zemin sonlu eleman modellerinin tamamı, Marmara Depremi etkisi altında analiz edilmiştir. Analiz sonuçları dikkate alınarak yapı-zemin modelinin davranışı hem betonarme temelin oturması (düşey yönde yer değiştirme) hem de betonarme üstyapının seçilen noktalarının yatay doğrultudaki yer değiştirmesi halinde verilmiştir. Betonarme üstyapı temelının C noktasının düşey yer değiştirmesi Şekil 5.29.-5.32.’de, betonarme üstyapısının A ve B noktalarının yatay

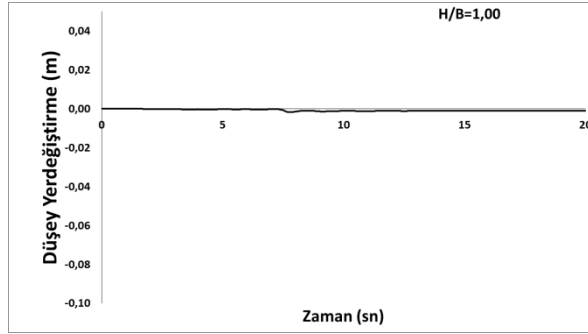
doğrultudaki yer değiştirmeleri Şekil 5.33.-5.36.'da ve betonarme üstyapısının A noktasının (tepe noktası) B noktasına (üstyapının temeli) göre göreli yatay yer değiştirmeleri Şekil 5.37.-5.40.'da grafikler halinde sunulmuştur.

Tablo 5.7. Yumuşak zemin tabaka kalınlığı  $H_{ZT}=9$  m olan yapı-zemin modelleri

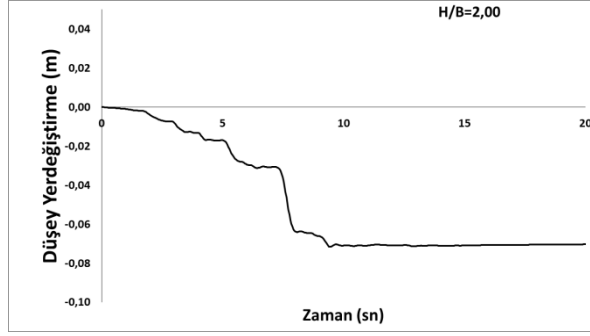
Model Adı	Üst Yapı Modeli	Alt Yapı Modeli			
		Yumuşak Zemin		Sıkı Kum	Killi Silt
	H/B	$H_{ZT}$ (m)	İyileştirme	$H_{ZT}$ (m)	$H_{ZT}$ (m)
Model 9	1,00	9,00	Yok	5,00	16,00
Model 10	2,00				
Model 11	1,00	9,00	Jet Grout	5,00	16,00
Model 12	2,00				



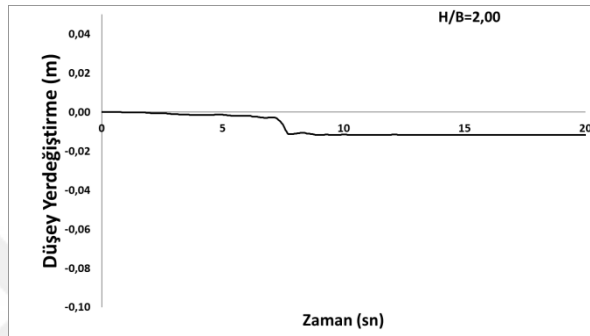
Şekil 5.29. Betonarme üstyapı temelini H/B=1,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok)



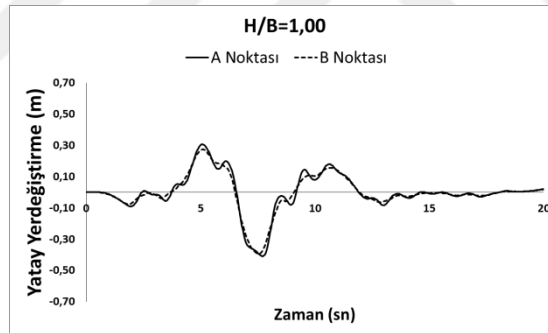
Şekil 5.30. Betonarme üstyapı temelini H/B=1,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var)



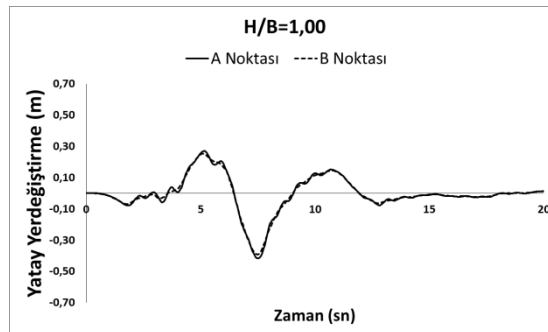
Şekil 5.31. Betonarme üstyapı temelinin H/B=2,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok)



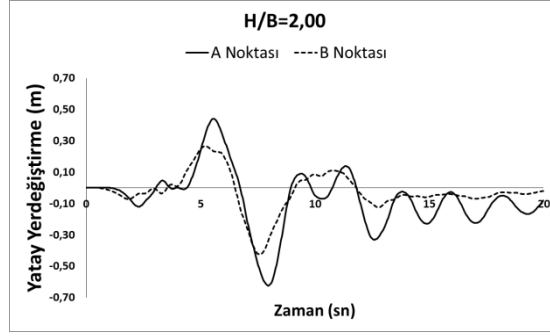
Şekil 5.32. Betonarme üstyapı temelinin H/B=2,00 için düşey yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var)



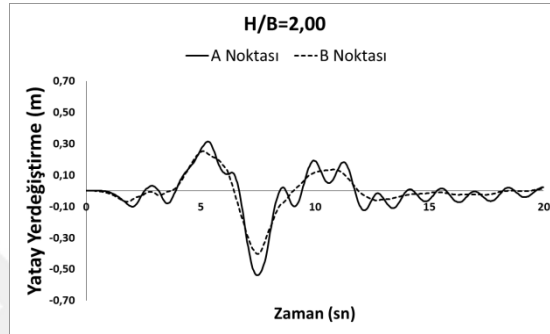
Şekil 5.33. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok)



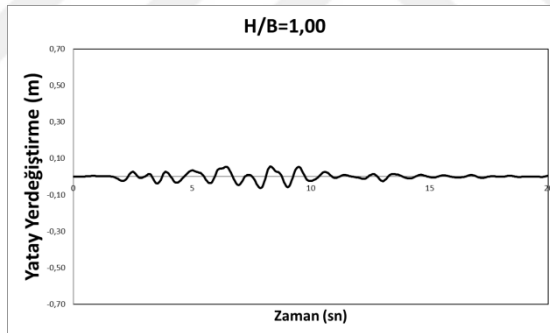
Şekil 5.34. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var)



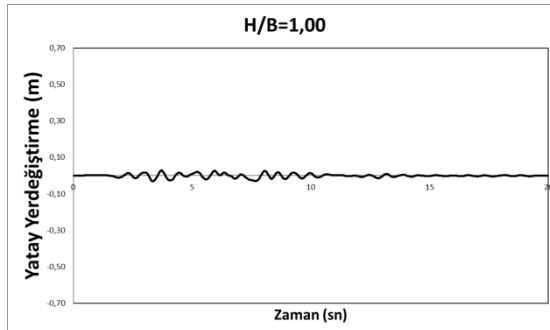
Şekil 5.35. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme yok)



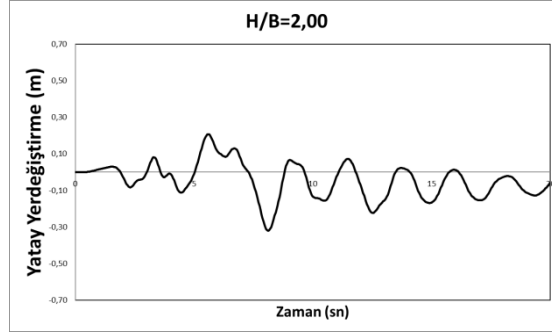
Şekil 5.36. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için yatay yer değiştirmeleri (zemin iyileştirme var)



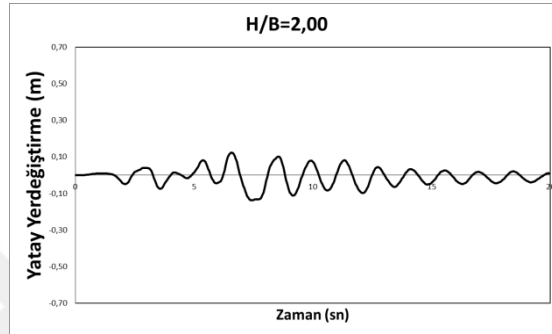
Şekil 5.37. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok)



Şekil 5.38. Betonarme üstyapının H/B=1,00 için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var)



Şekil 5.39. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme yok)



Şekil 5.40. Betonarme üstyapının H/B=2,00 için görelî yatay yer değiştirmesi (zemin iyileştirme var)

Yumuřak zeminin tabaka kalınlığının 6 m olduğu durumlarda temelın dūřey yer değiştirmesi H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalarda sırasıyla 1,00 cm ve 7,20 cm civarlarındadır (Şekil 5.29.-5.21.). Bu kalınlıktaki yumuşak zeminlerde “jet grout” tercihiyle iyileştirme yapılması durumunda temelın dūřey yer değiştirmesi (C noktası) değerleri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 0,20 cm ve 1,20 cm değerlerine gerilemektedir (Şekil 5.30.-5.32.). Dolayısıyla üstyapı temelının dūřey yer değiştirmesindeki iyileşme, H/B oranı 1,00 olan binalarda %80 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %83 seviyelerindedir.

Betonarme üstyapının tepe noktasının (A noktası) yatay yer değiştirmelerinin en büyük değeri H/B oranın 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 0,41 m ve 0,62 m iken bu değerler temel üst kotu (B noktası) için sırasıyla 0,39 m ve 0,43 m civarlarındadır (Şekil 5.33.-5.35.). Üstyapı altındaki yumuşak zeminde iyileştirme yapılması sonrasında bu değerler tepe noktası (A noktası) için sırasıyla 0,41 m ve 0,54 m ve temel üst kotu (B noktası) için ise sırasıyla 0,39 m ve 0,40 m civarlarındadır (Şekil 5.34.-5.36.).



Betonarme üstyapısının deprem etkisi altındaki davranışı, tepe noktasının (A noktası) temel üst kotuna (B noktası) göre görelî yatay yer değiştirmesi üzerinden daha belirgin bir şekilde belirlenebilir. Görelî yatay yer değiştirme değerleri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 6,40 cm ve 32,10 cm civarlarındadır (Şekil 5.37.-5.39.). İyileştirme yapılması sonrasında ise görelî yatay yer değiştirme değerleri H/B oranının 1,00 ve 2,00 olduğu binalar için sırasıyla 3,00 cm ve 13,80 cm değerlerine gerilemektedir (Şekil 5.38.-5.40.). Dolayısıyla üstyapı tepe noktasının görelî yatay yer değiştirmesindeki iyileşme, H/B oranı 1,00 olan binalarda %53 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %57 seviyelerindedir.



## BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tabaka kalınlıkları farklı olan yumuşak zeminler üzerine inşa edilen betonarme binaların deprem davranışına zemin özelliklerinin ve zemin iyileştirme yöntemlerinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla yapı-zemin modelinin zemin altyapısı üç farklı zemin katmanı ve betonarme üstyapısı ise 4 ve 8 katlı olmak üzere iki farklı kat sayısında dikkate alınarak modellenmiş ve yapı-zemin modellerinin tamamı zaman tanım alanında analiz edilmişlerdir. Yapı-zemin modelinin davranışı, betonarme üstyapısı temelinin düşey yer değiştirmesi ve betonarme üst yapısının yatay yer değiştirmesi açısından değerlendirilmiştir.

Betonarme üstyapısı temelinin düşey yer değiştirmesi davranışındaki iyileşmenin;

1. Yumuşak zemin tabaka kalınlığının 3 m olduğu ve zemin iyileştirme yöntemi olarak “zemin değiştirmesi” tercih edilmesi durumunda H/B oranı 1,00 olan binalarda %20 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %52 seviyelerinde,
2. Yumuşak zemin tabaka kalınlığının 6 m olduğu ve zemin iyileştirme yöntemi olarak “jet grout” tercih edilmesi durumunda H/B oranı 1,00 olan binalarda %80 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %76 seviyelerinde,
3. Yumuşak zemin tabaka kalınlığının 9 m olduğu ve zemin iyileştirme yöntemi olarak “jet grout” tercih edilmesi durumunda H/B oranı 1,00 olan binalarda %80 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %83 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.

Betonarme üstyapısı yatay yer değiştirmesi davranışını belirlemek üzere üstyapının tepe noktası (A noktası) ve temel üst kotu (B noktası) değerleri dikkate alınmıştır. Deprem etkisi altındaki yapı-zemin modelinin üstyapı zorlanmaları ve yapılan iyileştirmeler, tepe noktasının temel üst kotuna göre yaptığı göreceli yatay yer

değiştirmelerinden daha belirgin bir şekilde gözlemlenebilir. Dolayısıyla, betonarme üstyapısının tepe noktasının görelî yatay yer değiştirmesi davranışındaki iyileşmenin;

1. Yumuşak zemin tabaka kalınlığının 3 m olduğu ve zemin iyileştirme yöntemi olarak “zemin değiştirmesi” tercih edilmesi durumunda H/B oranı 1,00 olan binalarda %51 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %53 seviyelerinde,
2. Yumuşak zemin tabaka kalınlığının 6 m olduğu ve zemin iyileştirme yöntemi olarak “jet grout” tercih edilmesi durumunda H/B oranı 1,00 olan binalarda %55 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %56 seviyelerinde,
3. Yumuşak zemin tabaka kalınlığının 9 m olduğu ve zemin iyileştirme yöntemi olarak “jet grout” tercih edilmesi durumunda H/B oranı 1,00 olan binalarda %53 seviyelerinde iken H/B oranı 2,00 olan binalarda %57 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde betonarme yapıların üzerine inşa edildiği yumuşak zemin kalınlığının yapı davranışını belirgin oranlarda etkilediği ve yumuşak zemin kalınlığının artması durumunda yapının hem düşey doğrultuda hem de yatay doğrultudaki davranışının olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmiştir. Yumuşak zemin kat kalınlığının 3 m ve civarında olması durumunda “zemin değiştirmesi”, 6-9 m civarlarında olması durumunda ise “jet grout” yöntemi ile zemin iyileştirmesi yapılması durumunda üstyapı davranışında %50’ler civarında iyileştirme sağlandığı belirlenmiştir.

İleride yapılacak olan çalışmalar için öneriler ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- a) Bu çalışma kapsamında yapılan analiz sonuçlarından da açıkça görüldüğü gibi yumuşak zeminler üzerine yapılan betonarme yapıların davranışına yumuşak zemin katmanı yüksekliği olumsuz yönde etki etmektedir. Bu tür zeminlerin olumsuz etkisini azaltmak için betonarme üst yapıların üzerine yapıldığı yumuşak zeminlere iyileştirme yöntemleri uygulanabilir.
- b) Bu çalışma kapsamında sadece zemin davranışının doğrusal olmama özelliği dikkate alınmış üst yapı davranışı ise doğrusal olarak tanımlanmıştır. Bilgisayar ve nümerik modelleme tekniklerinde sağlanan gelişmeler dikkate

alındığında yapı-zemin modelinin tamamının davranışında doğrusal olmama özelliği tanımlanarak yapı-zemin etkileşimden kaynaklanan üst yapı hasarları daha gerçekçi bir şekilde belirlenebilir.

- c) Elde edilen analiz sonuçları dikkate alındığında özellikli yapıların hemen hemen hepsinde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınarak analizlerin ve tasarımların yapılması gerektiği açıktır.



## KAYNAKLAR

- Afad deprem tehlike haritası <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>  
Erişim tarihi: 15.05.2019.
- Aksangür, Z. 2017. Yüksek Modüllü Kolonların (Jet Grout) Zemin İyileştirmesinde Kullanılması ve Hesap Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ FBE, Sakarya.
- Arel, E., Önalp, A., Bol, E., Sert, S., Özocak, A., Ural, N., Duran, İ.B. 2011. Adapazarı Zeminlerinin Özellikleri, 4. Geoteknik Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, sayfa: 111- 22, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Aydinoğlu, M. N. 1977. Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Deprem Hesabı, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Aydinoğlu, M. N. 1992. Development of Analytical Techniques in Soil-Structure Interaction, Developments in Dynamic Soil-Structure Interaction, Kluwer Academic Publishers.
- Bilgin, T. 1984. Adapazarı Ovası ve Sapanca Oluğunun Alüvyal Morfolojisi ve Kuvaternerdeki Jeomorfolojik Tekamülü, İ.Ü., Edebiyat Fak. Yay., Yayın No: 2572, İstanbul.
- Bol, E. 2003. Adapazarı Zeminlerinin Geoteknik Özellikleri, Doktora Tezi, SAÜ FBE, Sakarya.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Zampich, L., Manoj, N. R.. 2019. PLAXIS 2D Reference Manual.
- Chantrapatla, R. D. B. 2012. Introduction to Finite Elements in Engineering, Second Ed., Inc. Upper Saddle River, New Jersey.
- Doğanışık, K. S. 2010. Jet Grout Kolonundaki Gerilme Dağılımının İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği EABD, Yüksek Lisans Tezi.
- Durgunoğlu, H. T. 2004. Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul.

- Garip, Z. S. 2005. Deprem Etkisindeki Betonarme Yapılarda Yapı-Zemin Etkileşimi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ FBE, Sakarya.
- Griffiths, D. V. 1988. Numerical Studies of Soil Structure Interaction Using a Simple Interface Model, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, pp. 158-162.
- Guitierrez, J. A., Chopra, A. K. 1978. A Substructure Method for Earthquake Analysis of Structures Including Structure Soil Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 6, pp. 51-69.
- Gürsoy, Ş., Durmuş, A. 2002. Betonarme İstinat Duvarlarının Zemin Etkileşimini de Dikkate Alarak Çeşitli Yöntemlerle Karşılaştırmalı Deprem Hesabı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi., *Bildiriler Kitabı*, Sayfa 228-237, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Koçbay, A. 2013. Zemin İyileştirme Yöntemleri, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü Eğitim Semineri, Antalya.
- Koçyiğit, A., Bozkurt, E., Cihan, M., Özacar, A., Teksöz, B. 1999. 17 Ağustos Gölcük-Arifeye (KD Marmara) Depremi Jeolojik Ön Raporu, ODTÜ, Jeol. Müh. Böl., 26 sayfa.
- Lysmer, J., Kuhlemeyer, R. L. 1969. Finite Dynamic Model for Infinite Media, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4): 859-877.
- Nikbakhtan, B., Osanloo, M. 2009. Effect of Grout Pressure and Grout Flow on Soil Physical and Mechanical Properties in Jet Grouting Operations, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3):498-505, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.10.005>.
- Önalp, A., Sert, S., Bol, E. 2000. Adapazarı Zeminlerinin Deprem Performansı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, ZM8, 2000, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Pala, M. 2001. Zemin Yapı Dinamik Etkileşiminin Yapay Sinir Ağları ile Analizi, Doktora Tezi, SAÜ FBE, Sakarya.
- Parmelee, R. A. 1967. 'Building-Foundation Interaction Effect', *Journal of Engineering Mechanics Division*, 93(2): 131-152.
- Sağlamer, A. 1996. Temel İnşaatı II Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul (yayımlanmamış).
- Sancio, R. B., Bray, J. D., Stewart, J. P., Youd, T. L., Durgunoğlu, H. T., Önalp, A., Seed, R. B., Christensen, C., Baturay, M. B., Karadayılar, T. 2002. Correlation between Ground Failure and Soil Conditions in Adapazarı, Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9-12): 1093-1102.

Serdar, A. H. 2015. Yüzeye Yakın Yumuşak Zeminlerde Yapılan Betonarme Binaların Deprem Davranışına Bodrum Kat Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ FBE, Sakarya.

Sert, S., Ural, N., Arel, E. 2005. Effects of Foundation Design on Earthquake Damages. International Conference Earthquake Engineering in 21st Century Conference. Skopje, Republic of Macedonia.

Sert, S., Önalp, A., Ural, N. 2008. Adapazarı Derin Zemin Profilinin Yapısı, Zemin Mekaniği ve Temel Müh. Onikinci Ulusal Kongresi, Selçuk Üniversitesi, Konya, (1):259-270.

Sert, S., Bol, E. 2005. Adapazarı Zeminlerinde Sağlam Katman Derinlikleri, TMMOB İMO Adana Şubesi Geoteknik Sempozyumu, sayfa:239-251, Adana.



## ÖZGEÇMİŞ

Berna ÇAĞLAR, 1972 yılında İzmir’de doğdu. İlköğretim ve lise eğitimlerini İzmir Buca Ortaokulu ve Buca Lisesi’nde tamamladı. 1990 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Sakarya Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde başladığı lisans eğitiminden 1994 yılında mezun oldu. 1997-2000 yılları arasında Milli Eğitim Bakanlığı’nda ilkokul öğretmeni ve Yapı İşleri Bürosunda inşaat mühendisi, 2000-2001 yıllarında özel sektörde proje mühendisi, 2010-2014 yıllarında Adapazarı Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğü’nde Yapı Ruhsat ve Zemin Etüd bürolarında inşaat mühendisi, 2014-2018 yıllarında Sakarya Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Dairesinde kontrol mühendisi olarak görev yaptı. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı - Geoteknik Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 Eylül ayı itibariyle, halen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Dairesi Bakım Onarım Şube Müdür Vekili olarak görev yapmaktadır. Evli ve 4 çocuk annesidir.