

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ÇİMENTO-KUMLU KİLLİ KARIŞIMININ DİNAMİK VE
STATİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Suadad Faisal Ibrahim AL ASADI

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Programı

MAYIS, 2023

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ÇİMENTO-KUMLU KİLLİ KARIŞIMININ DİNAMİK VE
STATİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Suadad Faisal Ibrahim AL ASADI
(Y2013.090006)

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kaveh DEHGHANIAN

MAYIS, 2023

ONAY FORMU

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “ Takı Tasarımı - Kuyumculuk E Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Çimento-Kumlu Killi Karışımının Dinamik ve Statik Analizi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Kaynakça ’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (02/05/2023)

Suadad Faisal Ibrahim AL ASADI

ÖNSÖZ

İstanbul Aydın Üniversitesi yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman bilgi ve birikimlerinden faydalandığım, zorlu eğitim dönemlerinde bana destek olan, benimle tecrübelerini paylaşan, bana yol gösteren, geoteknik alanında kendimi geliştirmemde tüm içtenliğiyle bana yardım eden ve eğitim hayatı dışında da örnek kişiliğiyle dikkat çeken çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Kaveh DEHGHANIAN'a teşekkürlerimi sunarım.

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.

Anneme, Görmediğim babama,

Değerli kardeşim Sarmad AL Asadi'ye

Mayıs, 2023

Suadad Faisal Ibrahim AL ASADI

ÇİMENTO-KUMLU KİLLİ KARIŞIMININ DİNAMİK VE STATİK ANALİZİ

ÖZET

Mühendisler, yapıların hasar görmesine ve çökmesine yol açan killi zeminin aşırı oturması ve düşük taşıma kapasitesi nedeniyle altyapı inşaatlarında sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu sorunu çözmek için çeşitli zemin iyileştirme kullanılmaktadır. Bu tezin temel amacı, zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve toplam deformasyonunu azaltmaktır. Farklı yükler (50, 100, 150, 200 kPa) altında farklı oranlarda (%5, %10, %15) çimento ile iyileştirilmiş bir kumlu-killi zemin modeli çalışılmıştır. İyileştirilmiş kil-çimento zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri, literatürde mevcut ve İstanbul Aydın Üniversitesi laboratuvarlarında bulunan sonuçlara dayanarak elde edilmiştir. Statik ve dinamik analizi gerçekleştirmek için sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Modellemede, zemin profili belirtmek için 10 m derinliğinde tek tabakalı Kumlu-killi zemin kullanılmıştır. Tüm hesaplamalar (statik ve dinamik), Mohr-Coulomb modeli kullanılarak PLAXIS 2D'te yapılmıştır. Bu Araştırmada, ilk adım, plastik ve konsolidasyon hesaplama türünü içeren statik bir analiz yapmaktadır. İkinci adımda, dinamik analizi gerçekleştirmek için yerel ve uluslararası bir sismik kayıt kullanılmıştır. Yerel sismik kaydı, maksimum ivmesi 0,628 g ile 7,6 Mw büyüklüğündeki İzmit depremidir, uluslararası sismik kaydı, maksimum ivmesi 0,244 g ile 5,7 Mw büyüklüğündeki Upland depremidir. Bu çalışma sırasında, zemin profilinin modellenmesine sönümlenme faktörü eklendiğinde, zeminin toplam deformasyonundaki değişikliklerin etkileri ortaya çıkarılmıştır. Bir sonraki adım, deprem sırasında zemin davranışını değerlendirmek için İzmit ve Upland deprem giriş hareketini kullanarak zemin profili için bir zemin tepki analizini yapılmıştır. Bu tezin ana sonucu, statik ve dinamik analizlerde, %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminin taşıma kapasitesini artırdığını ve toplam deformasyonu azalttığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kumlu killi zemin, Konsolidasyon oturması, PLAXIS 2D, Mohr-Coulomb modeli, Deformasyon

DYNAMIC AND STATIC ANALYSIS OF CEMENT-SAND CLAY MIXTURE

ABSTRACT

Engineers face problems in infrastructure construction due to excessive settlement of clayey soil and low bearing capacity, which causes damage and collapse of structures. Various ground improvement are used to solve this problem. The main purpose of this thesis is to increase the bearing capacity of the soil and to reduce its total deformation. An improved sandy-clay soil model with different ratios of cement (5%, 10%, 15%) under different loads (50, 100, 150, 200 kPa) was studied. The physical and mechanical properties of the modified clay-cement soil were achieved according to the laboratory result of Istanbul Aydın University and the research papers. The Finite Element Method (FEM) have been applied to run the static and dynamic analysis. In the modeling, a single layer of sandy-clay soil with a depth of 10 m was used to specify the soil profile. All calculations (static and dynamic) were done in PLAXIS 2D using the Mohr–Coulomb model. In this study, first a static analysis that includes the plastic and consolidation calculation type has been performed. Then, a local and international seismic record was used to perform the dynamic analysis. The local seismic record is the Izmit earthquake with a maximum Peak Ground Acceleration (PGA) of 0.628 g and a magnitude of 7.6 Mw, the international seismic record is the Upland earthquake with a maximum acceleration of 0.244 g with a magnitude of 5.7 Mw. During this study, the effects of changes in the total deformation of the soil were revealed when the damping factor was added to the modeling of the soil profile. The next step is to perform a soil response analysis for the soil profile using the Izmit and Upland earthquake input motion to evaluate the soil behavior during the earthquake. The main result of this thesis shows that in static and dynamic analysis, 15% cement-improved soil increases the bearing capacity and reduces the total deformation.

Keywords: Sandy-clay soil, Consolidation settlement, PLAXIS 2D, Mohr-Coulomb model, Deformation

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ONUR SÖZÜ	i
ÖNSÖZ.....	iii
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xix
I. GİRİŞ	1
A. Genel Bakış.....	1
B. Araştırma Amacı.....	2
C. Araştırma Aşamaları	2
D. Araştırma Çizelgesi	3
II. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
A. Derin Karıştırma Yöntemiyle İlgili Literatür	5
B. Jet grout Yöntemiyle İlgili Literatür.....	11
III. METOT VE YÖNTEMLER.....	1
A. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Plaxis.....	1
B. Sonlu Elemanlar Yöntemi	1
C. Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı	3
D. Plaxis Paket Programı.....	4

E. Plaxis Yazılımı Genel Kullanım İlkeleri	5
F. Zemin Modelleri	7
1. Lineer Elastik Modeli (Linear Elastic Model)	7
2. Mohr-Coulomb Modeli (Mohr-Coulomb Model).....	8
3. Sertleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model).....	8
4. Küçük Gerinim Sertliğine Sahip Sertleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness).....	8
5. Yumuşak Zemin Modeli (Soft Soil Model).....	9
6. Yumuşak Zemin Sürünme Modeli (Soft Soil Creep Model).....	9
7. Eklemli Kaya Modeli (Jointed Rock Model).....	9
8. Modifiye Cam-Kil Modeli (Modified Cam-Kil Model)	9
9. NGI-ADP Modeli (NGI-ADP Model)	10
10. UDCAM-S Modeli (UDCAM-S Model)	10
11. Hoek-Brown Modeli (Hoek-Brown Model).....	10
12. UBC3D-PLM Modeli (UBC3D-PLM Model)	11
13. Beton Modeli (Concrete Model)	11
14. Viskoz olmayan Sekiguchi-Ohta Modeli (Sekiguchi-Ohta Model Inviscid).....	11
15. Viskoz olan Sekiguchi-Ohta Modeli (Sekiguchi-Ohta Model Viscid) ...	11
16. Kullanıcı Tanımlı Zemin Modelleri (User-Defined Soil Models)	11
IV. ANALİZ	13
A. Analiz Metodolojisi	13
B. Mohr-Coulomb Modeli.....	14
C. Plaxis'te Kullanılan Zemin Özellikleri.....	14
D. Ayrıklaştırma veya Ağ (Mesh)	16
E. Statik Analizi	17
F. Statik Analizinden Elde Edilen Sonuçlar.....	18

1. Konsolidasyon Hesap Türü Sonuçları	18
2. Plastik Hesap Türü Sonuçları.....	21
G. Dinamik Analizi.....	23
H. Dinamik Analizde Serbest Saha (free field) Kullanım.....	27
İ. Modelde yayılan dalgaların sönümlenmesi	28
J. Sönümleme Etkisi Olmadan Serbest Saha Sınır Koşulundan Elde Edilen Toplam Yer Değiştirmesinin Sonuçları.	32
1. İzmit Depremden Gelen Sonuçlar.....	32
2. Upland Depremden Gelen Sonuçlar	36
K. Sönümleme Oranı %5 Olduğunda Serbest Saha Sınır Koşulundan Elde Edilen Toplam Yer Değiştirmesinin Sonuçları.	39
1. İzmit Depremden Gelen Sonuçlar.....	39
2. Upland depremden gelen sonuçlar.....	42
L. Tek Boyutlu Zemin Tepki Analizi.....	45
V. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
VI. KAYNAKLAR	59
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	93

KISALTMALAR LİSTESİ

- S_u^A : Aktif kesme mukavemeti
- e : Boşluk oranı
- E_{ur}^{ref} : Boşaltma / yeniden yükleme rijitliği
- G_{ur} : Boşaltma/yeniden yükleme kesme modülü
- λ : Cam-Kil sıkıştırma indeksi
- κ : Cam-Kil şişme indeksi
- CSC** : Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak kil
- $^\circ$: Derece
- DCM** : Derin çimento karışımı
- DSM** : Derin karıştırma yöntemi
- $S_{u,inc}^A$: Derinlik ile kesme mukavemetinin artması
- S_u^{DSS} : Direkt basit kesme kuvveti
- Ψ : Dilatasyon açısı
- γ_f^{DSS} : Direkt basit kesmede kesme gerilimi
- γ_d : Doygun birim hacim ağırlığı
- k : Geçirgenlik katsayısı
- $\sigma_{t,i}$: Gerilme direnci
- M_v : Hacimsel sıkışma katsayısı
- CBR** : Islatılmış California taşıma oranı testi
- φ : İçsel sürtünme açısı
- V_s : Kayma dalga hızı
- τ : Kayma gerilmesi

- G** : kayma modülü
- c'**_{ref} : Kohezyon
- C_v** : Konsolidasyon katsayısı
- MR** : Kopma modülü
- M** : Kritik durum çizgisinin teğeti
- γ_k** : Kuru birim hacim ağırlığı
- λ*** : Modifiye sıkıştırma indeksi
- κ*** : Modifiye şişme indeksi
- μ*** : Modifiye sürenme indeksi
- K₀^{nc}** : Normal konsolidasyondaki yanıl gerilme katsayısı
- E_{oed}** : ödometre modülü
- S_u^P** : Pasif kesme kuvveti
- v'**_(nu) : Poisson oranı
- S_u^{A,ref}** : Referans aktif kesme kuvveti
- y_{ref}** : Referans derinliğı
- E₅₀^{ref}** : Sekant rijitliğı
- qu** : Serbest basınç mukavemeti
- FEM** : Sonlu elemanlar yöntemi
- γ_w** : Suyun birim hacim ağırlığı
- E_{oed}^{ref}** : Teğet rijitliğı
- S_u^{C,TX}** : Üç eksenli basınç kesme kuvveti
- γ_f^C** : Üç eksenli sıkıştırmada kesme gerilmesi
- γ_f^E** : Üç eksenli uzatmada kesme gerilmesi
- E'** : Young modülü
- e_{ini}** : Yükleme için ilk boşluk oranı

K : Zemin altı reaksiyon modülü

G_s : Zemin katılarının özgül ağırlığı

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1. Zemin parametre özellikleri	14
Çizelge 2. statik analizde kullanılan hesaplama aşamaları a) konsolidasyon b) plastik hesaplama işlemi.....	18
Çizelge 3. Konsolidasyon hesaplama tipi sonuçları	21
Çizelge 4. Plastik hesaplama tipi sonuçları	23
Çizelge 5. İzmit ve Upland depremleri için ivme, hız ve süre değerleri	24
Çizelge 6. Dinamik analizinde kullanılan hesaplama aşamaları	27
Çizelge 7. İzmit deprem için Rayleigh sönümlenme parametresinin belirlenmesi	30
Çizelge 8. Upland deprem için Rayleigh sönümlenme parametresinin belirlenmesi.	31
Çizelge 9. Dinamik analizde İzmit deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (Sönümsüz)	33
Çizelge 10. Dinamik analizde Upland deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (Sönümsüz)	37
Çizelge 11. Dinamik analizde İzmit deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (%5 Sönümlenme oranı)	40
Çizelge 12. Dinamik analizde Upland deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (%5 Sönümlenme oranı)	43
Çizelge 13. Seçilen düğümlerin koordinatları	47

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.	Modelin sonlu elemanlara bölünmesi (Bildik, 2013).....	2
Şekil 2.	Tipik 2 Boyutlu Elemanlar (Civelek, 2011).....	3
Şekil 3.	Girdi programı.....	6
Şekil 4.	Çıktı programı.....	6
Şekil 5.	proje özellikleri.....	13
Şekil 6.	Statik analizde ağ oluşturma.....	16
Şekil 7.	Dinamik analizde ağ oluşturma.....	16
Şekil 8.	statik analizde Kullanılan sınır koşulları.....	17
Şekil 9.	iyileştirilmemiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Konsolidasyon hesap türü).....	18
Şekil 10.	%5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Konsolidasyon hesap türü).....	19
Şekil 11.	%10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Konsolidasyon hesap türü).....	20
Şekil 12.	%15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Konsolidasyon hesap türü).....	20
Şekil 13.	iyileştirilmemiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Plastik hesap türü).....	21
Şekil 14.	%5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Plastik hesap türü).....	22
Şekil 15.	%10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Plastik hesap türü).....	22

Şekil 16. %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Plastik hesap türü).....	23
Şekil 17. İzmit depremden elde edilen maksimum yer ivmesi	24
Şekil 18. Upland depremden elde edilen maksimum yer ivmesi.....	25
Şekil 19. İzmit ve Upland depreminde kullanılan seçenekleri	26
Şekil 20. Plaxis yazılımına girilen İzmit deprem kaydı	26
Şekil 21. Plaxis yazılımına girilen Upland deprem kaydı.....	27
Şekil 22. serbest saha sınır koşulu kullanımı	28
Şekil 23. İzmit deprem için Fourier genliği ile frekans arasındaki ilişki.....	30
Şekil 24. Upland deprem için Fourier genliği ile frekans arasındaki ilişki	31
Şekil 25. Dinamik analizde İzmit deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (Sönümsüz).....	33
Şekil 26. zeminin enine kesiti	34
Şekil 27. İzmit deprem ve farklı yükler altında farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonunun karşılaştırması (Sönümsüz) a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa.....	35
Şekil 28. Dinamik analizde Upland deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (Sönümsüz).....	37
Şekil 29. Upland deprem ve farklı yükler altında farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonunun karşılaştırması (Sönümsüz) a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa.....	38
Şekil 30. Dinamik analizde İzmit deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (%5 Sönümlenme oranı).....	40
Şekil 31. İzmit deprem ve farklı yükler altında farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonunun karşılaştırması (%5 sönümlenme oranı) a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa	41
Şekil 32. Dinamik analizde Upland deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (%5 Sönümlenme oranı).....	43

Şekil 33. Upland deprem ve farklı yükler altında farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonunun karşılaştırması (%5 sönümleme oranı) a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa.....	44
Şekil 34. Tek boyutlu PLAXIS modeli (solda) ve Bağlı serbestlik derecesi sınır koşulu (sağda).....	46
Şekil 35. Seçilen düğümlerle oluşturulan ağ	47
Şekil 36. İzmit deprem için zeminde İvme ile Dinamik zaman arasındaki ilişki a-) İyileştirilmemiş zemin b-) %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin c-) %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin d-) %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin	48
Şekil 37. İzmit deprem için A ve B noktasında Pik spektral ivme tepki spektrumu a-) İyileştirilmemiş zemin b-) %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin c-) %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin d-) %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin	50
Şekil 38. Upland deprem için zeminde İvme ile Dinamik zaman arasındaki ilişki a-) İyileştirilmemiş zemin b-) %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin c-) %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin d-) %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin	51
Şekil 39. Upland deprem için A ve B noktasında Pik spektral ivme tepki spektrumu a-) İyileştirilmemiş zemin b-) %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin c-) %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin d-) %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin	53

I. GİRİŞ

A. Genel Bakış

İnşaat sektöründeki gelişmeler, hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme ile birlikte, zemin özelliklerinin mühendislik açısından yapı inşası uygun olmadığı alanlarda arazi yatırımı yapmak gerekli hale gelmiştir. Dolayısıyla inşaat mühendisliği çalışmalarında bu çok önemli soruna çözüm bulunması gerekmektedir. Bu nedenle zemin iyileştirme yöntemleri ekonomi, hız ve sorunlu alanlarda uygulama kolaylığı açısından tercih edilen yöntemler arasında gelmektedir. Killi zeminler, düşük taşıma kapasitesi, aşırı oturması ve minimum kesme dayanımına sahip olduğu için uygulama sırasında ve proje ömrü boyunca deformasyonlara karşı hassas olduklarından, yapısal hasarlara neden olan zeminlerdir. Bu amaçla, Bu tip zeminin ya diğer uygun zeminlerle değiştirilmesi ya da taş kolon yöntemi, jet grout yöntemi, derin karıştırma yöntemi ve diğer uygun yöntemler gibi iyileştirme yöntemlerinden biri ile işlem görmesi gerekmektedir. Zemin İyileştirme yöntemi, zeminin kayma direncini yükselterek ve zemindeki hacimsel değişimleri azaltarak zeminin taşıma kapasitesini artırır, yapıların oturmasını azaltır ve zeminin stabilitesini artırır. Genel olarak, zemin mukavemeti, zeminin binalar veya diğer yapılar tarafından uygulanan ağırlığı kusursuz ve tutarlı bir şekilde sürdürme kapasitesini ifade eder. Yapım nedenleriyle ve temeli desteklemek için, modifiye edilmiş yumuşak zeminler çeşitli yüklere farklı tepkiler vererek farklı derecelerde erken dayanım artışı ve son dayanım gelişimi sağlar (Kalantari, 2012; Al-Busoda & Al-Taie, 2010; Al jeznawı, Sanchez, Al taie and Zielinski, 2019). Dünyanın birçok bölgesinde büyük hacimlerde ince killi toprak bulunmaktadır. Bu arazi "sert zemin" olarak bilinir. Bu zeminler, orada inşa edilen yapıda kayma yetersizliklerine, farklı oturmalara ve düşük taşıma kapasitesine neden olur (Arulrajah, Piratheepan, Disfani & Bo, 2012; Bhavsar, Joshi, Shorf & Patel, 2014). Yumuşak killi zeminler, nispeten düşük bir sertliğe sahipken, bir kuvvet uygulandığında önemli ölçüde esner. Bu nedenle, önemli deformasyona sürekli bir yaklaşım olarak

deformasyon analizinde yumuşak kil dikkate alınmalıdır (Nelson, Chao, Overton, & Nelson, 2015). Zemin, belirli bir yük seviyesine maruz kaldığında yükün uygulandığı yönde deforme olma eğilimindedir. Her zeminin farklı bir deformasyon tipi ve derecesi vardır. Aynı basınçta, sert topraklar yumuşak killi topraklardan farklı Şekilde deforme olma eğilimindedir. Toprak deformasyonunun özellikleri, toprağın kaynağından, moleküller arası bağlantılardan, parçacık yapısından ve su içeriğinden etkilenir. (Teunissen & Zwanenburg, 2017; Moriwaki, Idriss & Doyle, 1982; Fu, Wang, Song, Yu, Wei & Wu, 2021).

B. Araştırma Amacı

Çalışmanın temel amacı, kumlu-killi zeminin imento karışımları ile karıştırılarak deformasyon direncinin arttırılmasıdır. Statik ve dinamik analiz için, daha önce İA laboratuvarında ve literatürde bulunan sonuçlara dayalı olarak modifiye edilmiş bir imento zemin kullanılmıştır. Farklı imento oranları (%5, %10, %15) ile iyileştirilmiş zemin için farklı statik yüklerin (50, 100, 150 ve 200 kPa) etkisinden kaynaklanan oturmalar ve yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Dinamik analizde, farklı imento oranları ile güçlendirilmiş kumlu-killi zeminin farklı yüklerin etkisi altındaki toplam deformasyonunu belirlemek için yerel deprem kaydı (İzmit deprem kaydı) ve uluslararası deprem kaydı (Upland deprem kaydı) kullanılmıştır. Ayrıca zemine eklenen imento oranlarının zeminin sismik tepki analizi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu alışma kapsamında farklı imento oranlarındaki farklı özelliklerdeki zeminler için oturma ve deformasyon kontrolü yapılmıştır. Zemin tipi Young modülü ve Poisson oranı ile belirlenmiştir. Bu amaca ulaşmak için, PLAXIS 2D'de tek katmanlı bir zemin sisteminin temsili bir modeli simüle edilmiştir.

C. Araştırma Aşamaları

Yukarıdaki hedeflere ulaşmak için, problem aşağıdaki aşamalar aracılığıyla simüle edilmiştir:

Aşama 1: Malzeme modelinin oluşturulması: PLAXIS 2D'de Mohr-Coulomb modeli kullanılarak temsili bir zemin profili simüle edilmiştir. Zemin tipini belirlemek için diğer parametrelere ek olarak Young modülü ve Poisson

oranı kullanılmıştır. Kayma dalga hızı, Plaxis programı kullanılarak Young modülü ve Poisson oranına göre otomatik olarak belirlenmiştir. Statik ve dinamik sınır koşulları, önceki Araştırma ve önerilere göre belirlenmiştir.

Aşama 2: Zemin profilinin statik analizi: Zemin profilinin statik analizinde konsolidasyon ve plastik tipi hesabı yapılmıştır. Bu analizin amacı, farklı statik yüklerin bir sonucu olarak kumlu-killi zeminlerin maruz kaldığı oturma ve toplam deformasyonun izlenmesidir. PLAXIS 2D programında, konsolidasyon tipi hesaplamasından elde edilen sonuçlar, plastik tipi hesaplaması ile karşılaştırılmıştır.

Aşama 3: Zemin profilinin dinamik analizi: Zeminin toplam deformasyonunu izlemek için zemin profiline uygulanan farklı statik yüklerle ek olarak yerel bir deprem kaydı (İzmit deprem) ve uluslararası bir deprem kaydı (Upland deprem) kullanılmıştır. Farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zemin için %5 sönümlü ve sönümsüz toplam deformasyon hesaplanmıştır. Zeminin enine kesiti alınarak, farklı çimento oranlarıyla iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonu, zemin derinliği boyunca karşılaştırılmıştır.

Aşama 4: PLAXIS 2D'de Tek Boyutlu Zemin Tepki Analizi: Zemin yüzey seviyesinde ve zemin tabakasının alt kısmında bir noktada PSA tepki spektrumu dikkate alınıp karşılaştırılmıştır. Ardından, farklı çimento oranlarının zeminin sismik performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için sonuçları karşılaştırılmıştır.

D. Araştırma Çizelgesi

Bu tez beş ana bölümden oluşmaktadır:

Bölüm 1: Giriş: Bu bölüm teze genel bir giriş sağlar. Araştırmanın amaçlarını ve aşamalarını belirler. Okuyucuların genel bir bakış elde etmeleri için tezin bir taslağı verilmiştir.

Bölüm 2: Literatür Taraması: Bu bölümde, ilgili tüm literatürün ve analiz için incelenen önceki Araştırmaların kısa bir özeti açıklanmaktadır. Sonlu elemanlar analizi yöntemiyle ilgili literatür ve Araştırmaları içerir. Literatür taraması iki alt bölüme ayrılabilir: 1) Derin karıştırma yöntemiyle ilgili literatür. 2) Jet grout yöntemiyle ilgili literatür.

Bölüm 3: Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanımı: Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ve PLAXIS programı açıklanmaktadır.

Bölüm 4: Analiz ve Sonuç: Bu bölümde, tüm analizlerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Analizler üç bölüme ayrılmıştır: 1) Statik Analizi 2) Dinamik Analizi 3) Sismik Tepki Analizi.

Bölüm 5: Tartışma ve Sonuç: Burada genel bir özet, tezin amaçları doğrultusunda tartışma ve sonuç bölümü verilmektedir.

II. LİTERATÜR TARAMASI

A. Derin Karıştırma Yöntemiyle İlgili Literatür

Saadeldin ve arkadaşları, çimento ile stabilize edilmiş yumuşak kil (CSC) üzerine inşa edilmiş bir yol dolgusunun performansını Araştırma yürütmüşlerdir. Yumuşak kilin drenajsız kesme dayanımı, çimento ile stabilizasyondan önce ve sonra deneysel olarak belirlemişlerdir. Deneysel çalışmanın sonuçları, 2 boyutlu bir sonlu eleman modeli kullanılarak yol dolgusu altındaki temel zeminin davranışını simüle etmek için kullanılmıştır. Temel zemini iki katmandan oluşmuştur: 1 ila 5 m arasında değişen kalınlığa sahip CSC, ardından zemin yüzeyinin 15 m altına uzanan yumuşak kil katmanı. CSC üzerine kurulan dolgunun performansı, CSC'nin sıkıştırılmış kum dolgu ile değiştirilmesi durumunda elde edilen performansla karşılaştırılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, çimento içeriği arttıkça, çimento ile stabilize edilmiş yumuşak kilin serbest basınç dayanımı artmıştır. Ayrıca, Kürlenme süresi yaklaşık 28 güne çıktıkça serbest basınç dayanımı artmıştır. Zemin iyileştirme için çimento stabilizasyonu kullanılması durumunda: standart güvenlik faktörü (F.S./F.S.yumuşak kil), stabilizasyon derinliğinin her bir ilave metresi için stabilizasyon derinliğinin yaklaşık %21 artmasıyla lineer olarak artmıştır. Zemin iyileştirmesi için zemin ikamesi (sıkıştırılmış kum) kullanılması durumunda: kayma mukavemetinin bozulmasına karşı standart güvenlik faktörü (F.S./F.S.yumuşak kil), değiştirme derinliğinin her her ilave metre değiştirme için değiştirme derinliğinin yaklaşık %10 artmasıyla lineer olarak artmıştır. Çimento stabilizasyonu, kayma bozulmasına karşı güvenlik açısından dolgunun performansını zemin değişiminden daha fazla artırmıştır. Ayrıca, çimento stabilizasyonu ve zemin değişimi, toplam oturmayı azaltma konusunda benzer sonuçlar vermiştir (Saadeldin, Salem and Lotfi, 2011).

Chen ve arkadaşları, Şanghay'da üç-şaftlı derin zemin karıştırma yöntemi kullanarak zemin iyileştirmesi yapmışlardır. Zemin-çimento kolonlarının uygulanmasının gözeneklerdeki su basıncını artırdığını ve çevredeki zeminin

hareket etmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle derin karıştırma uygulamasını etkileyen ana faktörlerin etkisini Araştırmak için saha testleri yapılmasını ve uygulama yapılırken zeminde oluşacak deformasyonların izin verilebilir sınırlar içinde kalacak şekilde yeniden düzenlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Saha testleri sonucunda, çimento kolonların yapımının, zeminde kolonun dibinden yayılan boşluk suyunun basıncının artmasına neden olduğu görülmüş ve testlerde yüksek su/çimento oranı, düşük karıştırma hızı ve geri çekme sırasında enjeksiyon yapılmaması gibi parametreler değiştirilerek metodun zemin hareketini en aza indirdiğini gözlemlemişlerdir (Chen, Zhang, Zhu and Wang, 2013).

Tatarnyuk, doktora tezinde killi zeminlerde şev stabilitesini sağlamak için derin karıştırma yöntemi üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu kapsamda saha testleri yapmış ve nümerik analiz çalışmaları için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Saha çalışmalarında yanal yüklü bir derin karıştırma kolonunun davranışını incelemek için üç farklı bölgeyi (Northland Allochthon) incelemiş ve daha sonra kolonun davranışını daha iyi anlamak için problemi sayısal bir modelle tartışmıştır. Saha test alanlarında incelenen her üç zemin tipinde de şev hareketliliğini gözlemlemiş ve yaptığı testler sonucunda, zemin yüzeyine yakın kısımlarda aşırı konsolidasyon oranının çok yüksek değerlere ulaştığını fark etmiştir. Kayma gerilmeleri altında zorlanan yanal yüklü karıştırma kolonu için nümerik analizinde, 2D ve 3D modelleme sonuçlarını uyum sağlamak için kullanılan yer değiştirme oranında değişiklikler yapılmıştır. Ayrıca kolon etrafındaki zeminde yapılacak değişikliklerin kolon sisteminin davranışını etkilediğini ve zemin iyileştirmesine katkı sağlayacak bu özelliklerin daha ileri test ve Araştırmalarla incelenmesi gerektiğini ifade etmiştir (Tatarniuk, 2014).

Ebadi ve arkadaşları, İran'ın Şiraz kentinde, çimento işleminin zemin ve jeotekstillerin arayüzey kayma mukavemeti değişkenleri üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Test edilen kil numunesi için %1 çimento uygulamasının zemin özelliklerini iyileştirmediğini ancak %5 ve %10 çimento ilavesinin sürtünme açısını ve kohezyonu önemli ölçüde artırdığını gözlemlemişlerdir. Ek olarak, Çimento işleminin sağlanan bağlar, zemin ortamı ve jeotekstil tabakası arasında güçlü bir yapışma sağlar, ancak tane geometrisini veya arayüzey pürüzlülüğünü eşit olarak değiştirmez. Ayrıca çalışmalarında,

Arayüzey zemin-jeotekstil kayma mukavemetinin büyük ölçüde zemin parçacıklarının boyut dağılımına, özellikle de ince tane içeriğine bağlı olduğunu belirtmişlerdir (Ebadi, Habibagahi and Hataf, 2015).

Nguyen ve arkadaşları, lif takviyeli çimento ile bağlanmış derin karıştırma kolonlarının, karayolu ve demiryolu projelerinde karşılaşılan yumuşak zeminleri iyileştirmek için uygulanan kesme mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Artan efektif gerilme ile sementasyon bağlarının bozulması nedeniyle liflerin işlevini yitirdiğini, bunun modellemede etkisinin göz ardı edilmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda, derin karıştırma kolonlarında çimento ve lif takviyesinin hem mukavemet hem de düktilite etkilerini gösteren bir model oluşturmuşlar ve sementasyon bozulması nedeniyle liflerin etkisinin azalacağını ifade etmişlerdir. Üç eksenli basınç testleri yapılmış ve lif takviyesi ile iyileştirilmiş zeminlerin mukavemet ve düktilitede önemli bir artış sağladığı gösterilmiştir (Nguyen, Fatahi and Khabbaz, 2016).

Sargent ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, düşük karbonlu çimento bağlayıcılar kullanarak yumuşak, zayıf zeminleri iyileştirmek için derin bir kuru karıştırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Zemin-çimento kolonları elde etmek için, döner burgu ekipmanı kullanılarak zayıf zeminlerde çimento enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında dikkat çeken konu; CEM-I Portland çimentosu dünyada kuru derin karıştırma yönteminde yaygın tip bağlayıcı olarak kullanılırken, CEM-I çimentosu çok fazla enerji gerektirdiğinden çok fazla karbondioksit üretir. Bu açıdan bakıldığında, sodyum hidroksit gibi alkalilerle aktive edilebilen ve böylece karbondioksiti emen yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda, yüksek fırın cürufu ile güçlendirilmiş zeminin mekanik özelliklerinde, özellikle mukavemetinde, zamanla CEM-I çimento ile güçlendirilmiş zemine göre önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir (Sargent, Hughes and Rouainia, 2016).

Mungan ve Sünbül çalışmalarında, deprem etkisi altında bir yapının depremin merkez üssüne olan mesafesinin uzak ve yakın olması durumunun davranışa etkisi incelemişlerdir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (PLAXIS 2d) Kullanarak Modele iki farklı zemin iyileştirme yöntemi (darbeli kırmataş kolon (DKK) ve Jet Grout kolonu) uygulanarak Düşey yer değiştirmeyi (oturmaları) değerlendirmek için derin temel (delme kazık) kullanılmıştır. Bu çalışmada,

zemin rijitliğini sağlamak ve oturmaları azaltmak amacıyla zemine uygulanan rijit kolonların performansı araştırılmıştır. DKK, Jet Grout ve Delme Kazık kolonlarının genel olarak zemindeki aşırı oturmaları azalttığı gözlemlenmiştir. Derin temel olan delme kazık uygulanırken, statik durumda düşey yer değiştirmeye göre en iyi performans elde edilmiştir. Deprem bölgesinde DKK, Jet Grout ve Delme kazık uygulamasının uzak depremlerin etkisi altında yayılan temel altındaki yatay yer değiştirme (U_x) değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Modelin dinamik analizinde delme kazık performansı DKK ve Jet Grout kolonuna göre daha iyi bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre delme kazık kolonlarının statik ve dinamik oturma performansı açısından DKK ve Jet Grout kolonlarından daha etkili ve verimli olduğu tespit edilmiştir (Mungan ve Sünbül, 2018).

Pongsivasathit ve arkadaşları, çimento ile stabilize edilmiş malzemelerin mekanik özelliklerini incelemek için kapsamlı laboratuvar testleri yapmışlardır. Bu Araştırma, incelenen üç tür (kum, laterit ve kil) zemini içermiştir. X ışını kırınımı (XRD) ve X ışını Floresansı (XRF), morfolojik oluşum ve kimyasal bileşik miktarlarını belirlemek için üç alt zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çimento içeriğinin çimento ile stabilize edilmiş zemin numunelerinin mukavemeti üzerindeki etkisi serbest basınç mukavemeti (q_u) testi, ıslatılmış California taşıma oranı (CBR) testi, üçüncü nokta yükleme testi ve plaka yükleme testi yoluyla incelenmiştir. Sonuçlar, 3 stabilize zemin altı malzemesinin 28 günlük q_u , ıslatılmış CBR, kopma modülü (MR) ve zemin altı reaksiyon modülünün (K) çimento içeriğindeki artışla arttığını göstermiştir. (Pongsivasathit, Horpibulsuk and Piyaphipat, 2019).

Bildik ve arkadaşları, derin karıştırma yöntemi (DSM) ile taşıma kapasitesi ve oturma açısından sorunlu zemin koşullarının iyileştirilmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Taşkent, Özbekistan'dan bir vaka çalışması ele alındığında, zemin deneysel ve sayısal olarak iyileştirildikten sonra saha performansı incelenmiştir. İyileştirme sonrası sitenin performansı, DSM kolonları ve iyileştirilmiş site üzerinde yapılan deneylerle belirlenmiştir. Ayrıca dinamik yükler altındaki saha davranışı DeepSoil ve Plaxis 2D yazılımları kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Proje sahasında imal edilen DSM kolonlarının yük taşıma performanslarının belirlenmesi amacıyla 9 farklı kolon üzerinde yükleme

deneyleri yapılmıştır. Yükleme deneyinden elde edilen taşıma kapasitelerinin tasarım aşamasında hesaplanan güvenli taşıma gücünden yaklaşık %55-60 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sahada yapılan jeofizik ölçümler sonucunda zemin yüzeyine yakın temel zemini alanlarında iyileştirme çalışmaları öncesi kayma dalgası hızı ortalama 300 m/s iken, DSM ile iyileştirme sonrası Vs değerleri ortalama 500 m/s'ye yükselmiştir. DeepSoil yazılımı kullanılarak dinamik yükler altında tek boyutlu saha davranış analizleri yapılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlara göre, iyileştirme sonrası zemindeki maksimum rölatif deplasmanlar %65 oranında azalmıştır. Plaxis 2D sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilen 2B saha davranış analizlerinde zemin iyileştirme sonrası yapının bulunduğu alandaki yer değiştirme değerleri zemin iyileştirme öncesine göre daha düşük çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar, iyileştirmenin sadece statik koşullarda değil dinamik koşullarda da alanın genel performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir (Bildik, Savaşeri, Duale, Büyükgökçe ve Laman, 2019).

Nguyen ve arkadaşları, derin karıştırma yöntemini kullanarak yumuşak zeminlerin güçlendirilmesi üzerine bir Araştırma yapmışlar. Tien'de yol dolgusu altındaki yumuşak zeminin konsolidasyonunda jeotekstiller ile birleştirilmiş derin çimento karışımı (DCM) kolon sisteminin kolonları ve zemin tabanı üzerindeki gerilme dağılımını analiz etmek için PLAXIS yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi (FEM) benimsenmiştir. Kolonun ucuna bir takviye tabakası eklemenin yumuşak zemin üzerindeki gerilmeyi azaltmada büyük bir etkisi olduğunu fark etmişler. Bu çalışmaya göre yumuşak zemin DCM kolonlarla güçlendirildikten sonra zemin yüzeyinin oturması 4,2 kat (%76) azalmaktadır (Nguyen and Nguyen, 2020).

Zakaria ve arkadaşları, Mısır'daki Doğu Port Said limanının yumuşak killi zeminle geoteknik özellikleri üzerinde laboratuvar çalışmaları ve nümerik analizler yapmışlardır. Zemini iyileştirmek için sıradan Portland çimentosu veya sönmemiş kireç ile derin karıştırma yöntemini (DMM) kullanmışlar. Ayrıca, yumuşak zeminin iyileştirilmesinde bağlayıcı türü, bağlayıcı içeriği, farklı su-çimento oranı ve kür süresinin etkisini araştırmışlardır. Zeminin oturmasını ölçmek için üç küçük ölçekli laboratuvar modeli (işlenmemiş zemin modeli, uç taşıyan derin karıştırma kolonlu model ve yüzen derin karıştırma kolonlu model) tasarlamışlar. İki boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi (PLAXIS 2D) sonuçlarını

fiziksel modelin sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır ve sonuçların genel olarak birbiriyle uyumlu olduğunu bildirmişlerdir. Derin karıştırma ile ve derin karıştırma olmadan zemin performansının bir karşılaştırmasını göstermek için sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Sonuçlarına göre, 28 günlük kür süresinden sonra çimento içeriğinin arttırılması serbest basınç mukavemetini iyileştirirken, dolgu oturmasını da azaltırken, kireç içeriğinin arttırılması serbest basınç mukavemeti değerlerini arttırmamaktadır. Ayrıca, Kür süresinin, serbest basınç mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve böylece sürenin 7'den 28 güne çıkarılmasının gücü arttırdığını bildirmişlerdir. (Zakaria, Hafez, El kamash and Moubarak, 2020).

Kaptan ve arkadaşları, derin karıştırma ile iyileştirilmiş zeminler için bir mukavemet-modül ilişkileri veri tabanı oluşturmuşlardır. 12 adet çalışmadan 1090 veri literatürde toplanmış ve zemin türüne, katkı tipine ve modül laboratuvar veya arazi numunesine bağlı olarak sınıflandırılmış ve E veya E50 olarak sunulmuş, ardından serbest basınç mukavemeti-elastisite modülü ilişkileri alt limit, üst limit ve ortalama değer olarak sunulmuştur. Uygun elastik modül değerini belirlemek için bu veri tabanının serbest basınç mukavemetine dayalı DSM tasarımları için referans olarak kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Organik ve turba zeminler için modül değerlerinin 160 MPa ve daha az olduğunu fark etmişlerdir. Yaptıkları incelemelerden, çimento ve kirecin birlikte kullanılması durumunda elastisite modülü değerlerinin sadece çimento kullanımına göre daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır (Kaptan, Çınar ve Bozbey, 2021).

Tsige ve arkadaşları, sonlu elemanlar yöntemiyle modifiye edilmiş çimento-killi zeminin deformasyon özelliklerini belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Yumuşak kilin düşey yer değiştirmesini farklı yükler ekleyerek incelemişler. Toplanan zemin numuneleri üzerinde, tane boyutu analizi, serbest şişme, özgül ağırlık, indeks özelliği, serbest basınç mukavemeti, tek boyutlu konsolidasyon ve üç eksenli testi belirlemek için laboratuvar testleri yapmışlardır. Test sonuçlarından, çalışma alanının zemini yüksek plastisiteli inorganik kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Zemin-çimento stabilizasyonunun %9, %12 ve %15'inde üç eksenli ve tek boyutlu konsolidasyon testi gerçekleştirmişler. Laboratuvar sonuçlarından, stabilizatör içeriğinin artmasıyla ön konsolidasyon basıncının arttığını ve bunun puzolanik ile çimento reaksiyonundan

kaynaklandığını fark etmişlerdir. Nümerik analiz sonuçlarından, yumuşak killi zeminin düşey deformasyon değerlerinin çimento oranının artmasıyla azaldığını fark etmişler. Çimento stabilizasyonunun optimum yüzdesinin %15 olduğunu belirtmişlerdir. Bu, yumuşak zemin için çimento stabilitesinin kayma mukavemetini arttırdığı ve deformasyonu azalttığı anlamına gelir. Ayrıca çimento oranındaki artışla birlikte sıkıştırılabilirlik indeksinde ve şişme indekslerinde bir azalma olduğunu fark etmişlerdir (Tsige, Korita and Beyene, 2022).

Makararotrit ve Youwai, bir nehir duvarı inşa etmek için derin çimento karıştırma yönteminin kullanıldığı bir uygulamayı sunmuşlardır. Nehir duvarının davranışları Midas GTS NX yazılımı kullanılarak 3 boyutlu sonlu elemanlar ile simüle edilmiştir. Analizde çimento ile stabilize edilmiş kilin farklı tipteki yapısal modelleri kullanılmıştır. Çimento ile stabilize edilmiş kil için gerilim yolu üç eksenli testin gerilme-şekil değiştirme simülasyonu, GTS NX yazılımında SoilTest özelliği kullanılarak yapılmıştır. Mohr Coulomb modeli, UBCSand modeli ve Sertleşen Zemin Modeli arasında çimento ile stabilize edilmiş Kilinin deformasyon özelliklerini tahmin etmede en iyi performansı göstermiştir. Gerilme tepkisinden tahmin edilen rijitlik, düşük ortalama gerilime sahipken çimento karışımı kilin rijitliğini olduğundan fazla tahmin ederek gelişmiştir. Onlara göre üç boyutlu sonlu elemanlar analizi, çimento ile iyileştirilmiş nehir duvarının genel davranışlarını tahmin edebilmiştir. Çimento ile stabilize edilmiş kil için en iyi model Mohr Coulomb Modeli olduğunu belirtmişlerdir (Makararotrit and Youwai, 2022).

B. Jet grout Yöntemiyle İlgili Literatür

Tschuchnigg ve Schweiger, jet grout kolonlarının klasik kazık veya kazıklı radye temellere ekonomik bir alternatif olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Yüksek binalar gibi yapılardan gelen yükü taşıyamayan zemin problemini çözmek için çok sayıda jet grout kolonunun yapılması gerektiğini ve bunun da analiz edilmesi zor bir problem olduğunu, bu temellerin performansını hesaplamak için nümerik yöntemlerin artarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Jet grout kolonlarının yayılı yük altında analizinde iki boyutlu düzlem deformasyon, üç boyutlu ve gömülü kazıklar modelleri kullanmışlardır. üç boyutlu sonlu eleman modellemesi, iki boyutlu modellemeden daha doğru sonuçlar vereceği

açıktır. üç boyutlu modellemede tüm elemanlar saha koşullarında olduğu gibi tanımlanırken, bu yöntemi kullanarak problemi modellemek çok karmaşıktır. Bu tür modellerin karmaşıklığını azaltmak için, kazıkların sürekli sonlu elemanlarla açıkça modellenmediği, ancak kazıkların nüfuz etme davranışını hesaba katabilen özel bir formülasyon ile değiştirildiği gömülü kazık kavramının kullanılmasıdır. Jet grout kolonlarla desteklenen bir temelin analizi için farklı modellerin karşılaştırılması ve gömülü kazık seçeneğinin pratik bir probleme uygulanması sunulmuştur. Farklı modellerin karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlar, tüm modellerin deformasyonlar için aynı büyüklük sırasını verdiğini göstermiştir (Tschuchnigg and Schweiger, 2008).

Ou ve arkadaşları, yumuşak killi zeminlerde yapılan derin kazılarda aşırı duvar sehimleri ve zemin oturmasının çok yaygın bir sorun olduğunu ve özellikle bitişik yapılarda büyük hasara yol açtığını vurgulamışlardır. Duvar sehimini veya zemin oturmasını azaltmak için zeminin genellikle yerinde jet grout veya mekanik derin karıştırma yöntemi ile güçlendirildiğini belirtmişlerdir. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi, iyileştirilmiş bölgelerin belirlenmesini etkileyecek köşenin etkilerini hesaba kattığı için kullanılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile birlikte köşe etkisinin kullanılmasının, bir kazıdaki iyileştirme alanını belirlemek için makul bir belirleme prosedürü sağladığı açıktır. Köşelere yakın alan iyileştirilip iyileştirilmediği takdirde, yan duvar sehiminin neredeyse etkilenmediğini bulmuştur. Sadece köşelerden uzak olan orta kısmın iyileştirilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir (Ou, Teng and Wang, 2008).

Akan ve Keskin, jet grout uygulamasından oluşan kolonların serbest basınç dayanımı ile bu yöntemde kullanılan parametreler ve zeminin iyileştirme öncesi durumu arasındaki ilişkiyi bir çalışma yapmışlardır. jet grout kolonların serbest basıncının tespitinde bulanık mantık ve çoklu regresyon analizi yöntemlerini kullanmışlardır. İki yöntemde de belirlilik (determinasyon) katsayısı hesaplanmıştır. Analizde enjeksiyon basıncı, zemin standart penetrasyon sayısı, çekme hızı, nozul çapı ve ince dane oranı girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Çoklu regresyon analizinde kullanılan parametrelerden çekme hızının en etkili, standart penetrasyon sayısının ise en az etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Bulanık mantık ve çoklu regresyon analizlerinde kullanılan parametreler ile serbest basınç dayanımı arasında önemli ilişkiler olduğu gözlemlenmiştir. Jet

grout kolon serbest basınç dayanımının; çekme hızı ve ince dane oranının artmasıyla azaldığı, standart penetrasyon sayısı ve nozul çapının artması ile arttığı tespit edilmiştir. Çoklu regresyon yöntemi, temel olarak kullanımının daha kolay olması ve daha hızlı uygulanabilmesi nedeniyle tercih edilebildiğini belirtmişlerdir. Veri sayısının az olması ve çok çeşitli olmaması dezavantajına rağmen tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir (Akan ve Keskin, 2014).

Sünbül ve Parlak, zemin sıvılaşması, oturması sorununa ve deprem yükleri altında taşıma gücü kayıplarına maruz kalan dört katlı bir bina için zemini iyileştirme metodu incelemiştir. Zemini iyileştirmek için yüksek basınçlı jet grout kolonu kullanılmıştır. Analizlerde önce kolon tek başına, sonlu eleman yöntemi kullanılarak farklı boyutlarda analiz edilmiş, ardından deprem sırasında zeminde oluşacak sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Bu yöntemin, bölgedeki inşaat sırasında ve sonrasında meydana gelebilecek oturmaları kabul edilebilir seviyelere azaltabileceği ve zemin sıvılaşmasını azaltmak için kullanılabileceği gözlenmiştir (Sünbül ve Parlak, 2015).

Bu makalede Nogueira ve arkadaşları, 2010 ve 2011 Canterbury deprem dizileri nedeniyle büyük oturmaları maruz kalan Christchurch Sanat Galerisi binasının altındaki zemini iyileştirmek için jet grout kolonları ve sıkıştırma grout kullanarak benimsenen bir çözümü açıklamışlardır. Binanın orijinal seviyesine geri döndürülmesi için yeniden seviyelendirme yapılmıştır. Binayı yükseltmek için kullanılan teknikler, zemin enjeksiyon tekniklerinin kullanımını, çimento esaslı şerbet malzemesi ile yerinde zemin takviyesinin sağlanmasını ve zemin kırığı ile zemin hacminin artmasını içeriyormuş. Bu çözüm JOG – Integrated Computer Grouting (JOGICG) olarak bilindiğini ifade etmişlerdir. Bu teknikler, yapı yükseltme çalışmaları sırasında JOGICG işleminin getirdiği artan gerilmeler altında yeterli zemin reaksiyonu sağlayarak, zemin rijitliği ve mukavemetinde bir artış sağlamak için kullanılmıştır. Zemin güçlendirme çalışmaları öncesinde ve sonrasında yakın yüzeydeki kesme dalgası hızlarını karşılaştırmak için yapılan çapraz kuyu sismik kesme dalgası ve MASW Araştırmaları genel olarak belirgin bir artış göstermiştir. Bu, jet grout kolonlarının montajı ve sıkıştırma groutu ile zeminin güçlendirilmesine bağlı olarak zemin sıvılaşmasına karşı geliştirilmiş direnç şeklinde bir katma değeri kanıtlamıştır, sıvılaşma potansiyelini ve sismik

bir olaydan sonra temel seviyesindeki hasarı azaltmıştır (Nogueira, Cristovao, Pinto, Hutchison and Lindsay, 2015).

Tuhami ve Mohamed, şev kretine bitişik şerit temelin davranışını ve temel altında jet grout uygulamasının etkisini incelemiştir. Bu problem, sonlu eleman yöntemi kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır. Analizde, düzlemsel gerilme modeli, 15 üçgen düğüm ve sertleşen zemin modeli uygulanmıştır. Şerit temeli idealleştirmek için beş düğümlü izoperimetrik kiriş elemanı kullanılmıştır. Arayüz elemanı, kiriş elemanı ile zemin arasındaki teması temsil etmek için kullanılmıştır. İki parametre çalışılmıştır, birincisi temel derinliği, ikincisi ise şev kretinden Şerit temel mesafesidir. Şerit temelin oturma ve yatay yer değiştirmesi elde edilmiş ve analiz edilen sonlu eleman modeli sonuçlarından çalışılmıştır. Jet grout uygulamasının temel yer değiştirmesi üzerindeki azaltıcı etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, şev kretine bitişik şerit temelin altına jet grout uygulanmasının şerit temelin ve şev tepkisinin iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Tuhami and Mohamed, 2015).

Sert ve arkadaşları, Türkiye'de Adapazarı ve Bartın illerini birbirine bağlayan bir demiryolu projesinin potansiyel geoteknik sorunlarını anlatmışlardır. Proje zeminin yumuşak/gevşek zemin olduğu ve çeşitli yüksekliklerde dolgular içerdiği belirtilmiştir. Bu nedenle bu zeminlerin taşıma kapasitesi ve oturma performanslarının dolgu ve demiryolu trafik yüklerini taşımada yetersiz olduğu düşünülmüştür. Dolguların stabilite analizi, hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemi yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Adapazarı ve yakın çevresi depremlerden etkilendiği için oturma, taşıma kapasitesi ve şev stabilite analizlerinin yanı sıra sıvılaşma analizleri de yapılmıştır. Üst zeminin çok yumuşak olduğu taşıma gücü ve oturma sorunu, üst zemin yerine kaya dolgu yapılarak giderilmiştir. Bunun yanında istasyon bölgesindeki yumuşak ve kalın killi zeminlerin ön yükleme ve fitil drenler kullanılarak iyileştirilmesi önerilmiştir. Jet-grout kolonlar, sıvılaşma potansiyeli olan ve oturma problemi olabilecek kalın, yumuşak/gevşek zeminlerle karşılaşıldığında zemin iyileştirme yöntemi olarak önerilmiştir. Jet-grout yöntemi bölgede uygulanan en verimli zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olduğunu ifade etmişlerdir. Sayısal analiz, jet-grout kolonlarının statik ve dinamik oturmaları kabul edilebilir değerlere düşürdüğüne dair klasik hesaplamaları doğrulamıştır (Sert, Ozocak ve Bol, 2015).

Ozener ve arkadaşları, jet grout kolonlarının sıvılaştırmanın azaltılmasındaki etkinliğini Araştırmak için bir dizi sayısal çalışma yapmışlardır. Türkiye'de jet grout kolonları ile zeminin iyileştirildiği bir sahanın performansı, daha önce yapılmış bir çalışmaya göre parametrik analiz ile incelenmiştir. Jet grout kolonları ile iyileştirilmiş sahanın sonlu elemanlar analizi, PLAXIS yazılım programı üzerinde efektif gerilme tabanlı UBC3D-PLM modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Jet grout kolonlarının sıvılaştırma riskinin azaltılmasındaki etkisini gösterebilmek için jet grout kolonları için farklı rijitlik oranları ve iyileştirilmiş zemin ve farklı alan oranları için sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal analizin sonuçları, jet grout kolonu ile çevreleyen zemin arasında oluşan kayma gerilmesi paylaşım mekanizmasından geçilerek değerlendirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları, jet grout kolonlarının deprem yüklemesi sırasında oluşan kayma gerilmesinin azaltılmasında önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Çalışma ayrıca, tasarım uygulamasında jet grout kolonları için yaygın olarak kullanılan kayma gerilmesi azaltma faktörünün oranını ve pratik değerlerini etkileyen parametreler hakkında bir fikir vermiştir (Ozener, Dulger and Berilgen, 2015).

Parlak, yapılaşma alanında sıvılaştırma potansiyeli olan zemin üzerinde statik ve dinamik sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bir işlem gerçekleştirmiştir. Zemin davranışını iyileştirmek için Jet grout kolonları kullanmıştır. Sayısal analizler, arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerle ilişkilendirilmiş ve uygulama alanı farklı senaryolar altında değerlendirilmiştir. Zemin iyileştirmesi yapılırken farklı çaplarda (60, 80 ve 100 cm) 3 adet jet grout kolonu kullanılmıştır. Dinamik analizi gerçekleştirmek için farklı büyüklükteki (Mw 5,4- Mw 7,1) iki depremin kaydını kullanılmıştır. Zeminde iyileştirme öncesi ve sonrası karşılaştırıldığında, Zeminde iyileştirmeden sonra yer değiştirmede bir azalma gözlemlenmiştir (Parlak, 2017).

Atapuerca ve arkadaşları, Cebelitarık'taki liman tesislerinin geliştirilmesi için Jet Grouting tekniğinin bir vaka sunmuşlardır. Temel amaç, bir dizi liman kesonunun temellerinin altındaki zemini sismik olaylar altında genel stabiliteyi iyileştirmek için güçlendirmiştir. Ayrıca, kesonların arka kısmında yer alan tesislerin bir bölgesinde su tablasının altındaki kazıyı gerçekleştirmek için su geçirmez bir muhafaza ve Jet Grouting ile bir alt sızdırmazlık uygulaması

anlatılmıştır. Sismik olay sırasında zeminin sıvılaşmasını dikkate alarak Keson Duvarın davranışını simüle etmek için bir Plaxis sonlu eleman modeli gerçekleştirilmiştir. Deprem dinamik etkileri, yazılımın dinamik modülüne ivme kayıtlarının eklenmesiyle modellenmiştir. Hesaplama kullanılan kurucu zemin modelleri, zeminler için Mohr-Coulomb ve Sertleşen Zemin Modeli ve Keson Duvar için Lineer Elastik Modeli kullandığını belirtmişlerdir. Jet Grouting'in sismik risk altındaki alanlarda düşük dirençli zeminlerin işlenmesi ve iyileştirilmesi için çok etkili ve çok yönlü bir teknik olduğu kanıtlanmıştır. Deformasyonların kabul edilebilir seviyelere indirilmesini sağlar ve depremin neden olduğu dinamik ve sıvılaşma etkilerini azaltmak için en uygun çözümü oluşturduğunu ifade etmişlerdir (Atapuerca, Cuenca and Díaz, 2019).

Temel, Midas GTS NX yazılımında yüksek modüllü kolonlar kullanarak zemin iyileştirme yönteminin 2D ve 3D analizlerini gerçekleştirmiştir. Yaptığı analizlerde, 2D'de oluşturulan zemin içinde tanımlanan 1D jet grout kolonlarının modellemeleri yapmıştır. ise 3D'de oluşturulan zemin içinde tanımlanan 3D jet grout kolonlarının modellemeleri yapılarak analizler gerçekleştirmiştir. Modellerde kullanılan zemin kesiti 5 farklı kumlu zemin tabakası ve ardından sağlam bir ana kayadan oluşmuştur. Onun sonucuna göre, Farklı aralıklarda ve çaplarda jet grout kolonları kullanılarak zemin iyileştirmesi için yapılan analizlerde oturma değeri zemin iyileştirmeden öncesine göre yaklaşık %90 oranında azalmıştır. Jet grout kolonlar aralığı azaldıkça temelin eğilme momentleri azalmıştır. 2D zemin modelinde, kolon aralığı 2 m'ye kadar olan durumlarda 0,6 m çapa sahip yüksek modüllü kolonlar, aralık 2 m'yi geçince 0,8 m çapa sahip kolonlar iyileştirmede daha etkin olduğunu fark etmiştir. 3D zemin modelinde ise kolon aralığı değerlerindeki artma, zeminin iyileştirilmesinde olumsuz etki oluşturmuştur (Temel, 2020).

Al-Omari ve arkadaşları, Irak'ın kuzeyindeki Musul şehrindeki tarihi Al-Hadba minaresinin temelini çevreleyen zayıf zemin tabakalarının ıslah edilmesi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Minarenin rehabilite edilmesini ve onarımını yapmak için iki farklı yöntem uygulamışlardır: Birincisi, zemin katmanlarını çimento enjeksiyonu tekniği ile işlemek, ikincisi ise minare temelini altına mikropillerin yerleştirilmesini içermiştir. Analizlerde, iki boyutlu sonlu eleman yöntemi (PLAXIS yazılımı) kullanılmıştır. Çalışma, minarenin rehabilite edilmesi

için gelecekteki çalışmalarda alınabilecek en uygun karara ulaşmak için, uygulamadan önce ve sonra zemin gerilimi dağılımının analizinin karşılaştırılması ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, temelin toplam düşey yer değiştirmesi, zemin taşıma kapasitesi ve minare bütünlüğünün güvenlik faktörü analizlerine büyük önem verilmiştir. Çalışma, işlenmiş zemin katmanlarının performansında belirgin bir iyileşme olduğu ve bunun da minare stabilitesinin artmasına yol açtığı sonucuna varmıştır. Çimento enjeksiyon tekniği, mikropillerin döşenmesine kıyasla daha iyi zemin katmanları performansı sağladığını ifade etmişlerdir (Al omari, Khalil and Khattab, 2020).

Zhang ve arkadaşları, jet grout plakalarının derin çaprazlı kazılara verilen tepkiler üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir dizi sonlu elemanlı sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Duvar derinliği, duvar rijitliği, yumuşak kil kalınlığı ve rijitliğin jet grout plakalarının performansı üzerindeki etkileri, bir dizi simülasyon sonucu karşılaştırılarak ve analiz edilerek değerlendirilmiştir. Parametre çalışmalarının sonuçlarına göre, deniz kilinin kalınlığı ve diyafram duvarın rijitliği derin kazı tepkilerini önemli ölçüde etkilemiştir. Diyafram duvar, sert zemin tabakasına 2–3 m derinlikte gömülmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Yumuşak kilin çoğu için, jet grout plakası iyi bir güçlendirme etkisi sağlayabilmesini ifade etmişlerdir (Zhang, Hong, Li, Zhang, Goh and Liu, 2021).

Fu ve arkadaşları, Köprü inşaatı sırasında köprü sahasındaki nehir yatağında derin kum madenciliği yapılması nedeniyle, köprü sahasında bir kum madenciliği bozucu tabaka oluştuğu ve bu, kazıklı grup temelin inşaat kalitesini etkilediğini belirtmişlerdir. Bu yazıda, derin kum madenciliği nedeniyle bozulan tabakaları güçlendirmek için yüksek basınçlı jet grout yöntemi kullanılmıştır. Yüksek basınçlı jet grout yöntemi ile örselenmiş tabakanın güçlendirilmesinden önceki ve sonraki kazık grubunun üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Güçlendirmeden önce ve sonra örselenmiş tabakalarda sondaj deliği duvarının yanal yer değiştirme dağılım özelliklerinin karşılaştırılması ve analiz edilmesiyle, örselenmiş tabakaların yüksek basınçlı jet grout takviyesinin işlem planının delik genişlemesi ve kazık muhafazası olayını etkili bir şekilde çözebileceği gösterilmiştir. Bozulmuş katmanları güçlendirmek için yüksek basınçlı jet grout uygulanmış kolonun işlem şeması, sondaj deliğinin çökmesini önlemede ve

sondaj deliği duvarının stabilitesini artırmada iyi bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir (Fu, Wang, Ren, Zhu and Wang, 2022).

Kareem ve Al-Abbas, jet grout yöntemini kullanarak farklı geometrik özelliklere sahip killi zeminler (yumuşak, orta, sert) ve kumlu zeminler (gevşek, orta, yoğun) zerinde bir çalışma yürütmüşlerdir. Sığ temel üzerindeki zeminin yük deplasman eğrisi ve taşıma kapasitesi PLAXIS 3D 2020 programı kullanılarak hesaplanmıştır. Jet grout kolonu enjekte edildikten sonra taşıma kapasitesindeki iyileşmenin sonucu, killi zemin tipleri (yumuşak, orta ve sert) ve ayrıca kumlu zemin tipleri (gevşek, orta ve yoğun) için fark edilmiştir (Kareem and Al-Abbas, 2022).

III. METOT VE YÖNTEMLER

A. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Plaxis

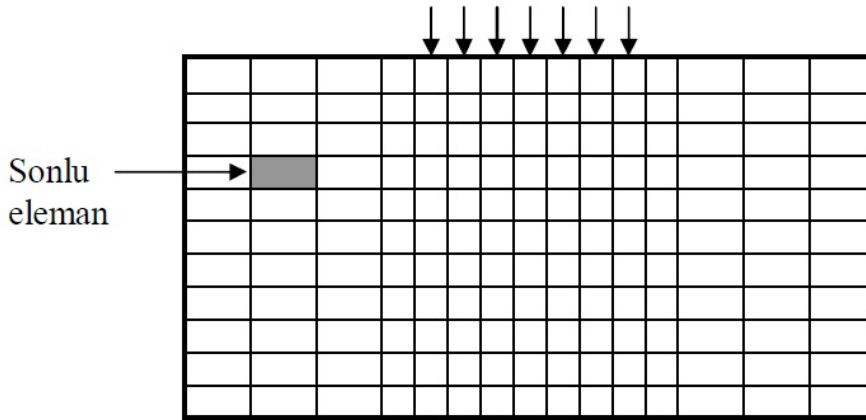
Bilgisayar teknolojisindeki büyük gelişmelerle birlikte birçok sonlu eleman yöntemi ve programı geliştirilmiştir. Bu programlardan biri de PLAXIS paket programıdır. Sayısal analiz yöntemleri, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Zemin ortamının yapısı gereği heterojen ve anizotrop olduğu için zemin ve zemine gömülü yapıların özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması ve üst yapı ile zemin etkileşiminin gerçekçi olarak modellenmesi oldukça karmaşık ve çözülmesi zor bir problemdir. PLAXIS yazılımı ile zemin yapısı nonlineer bir şekilde modellenebilir ve zemin ile ilişkisi olan diğer yapı ve yapısal elemanlar lineer olarak modellenebilir (Yıldırım, 2019). Bu çalışmada, kumlu killi zeminde meydana gelen toplam oturmayı hesaplamak için PLAXIS 2D v20 paket programı kullanılarak statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Çimento ile stabilize edilmiş zeminin toplam yer değiştirmesi doğrulanmıştır. Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ve PLAXIS 2D v20 paket programı hakkında bilgiler sunulmuştur.

B. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Nümerik analiz yöntemleri arasında bilgisayar yazılımı için en uygun olan sonlu elemanlar yöntemidir. Bunun nedeni, karmaşık sınır koşulları, heterojen malzemeler ve nonlineer malzeme davranışı gibi zor problemlerin çözümünde sistematik programlamaya izin vermesidir. Öte yandan, bu yöntem geniş bir mühendislik alanındaki (katı cisim mekaniği, termoelastisite, termodinamik, akışkanlar mekaniği, manyetizma vb.) sınır değer problemlerine uygulanabilir (Berilgen, 1996).

Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli sistemin problemin karakterine uygun sonlu elemanlara ayrılması, elde edilen elemanlar üzerindeki iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin minimum olması ve daha sonra bu elemanların birleştirilmesiyle

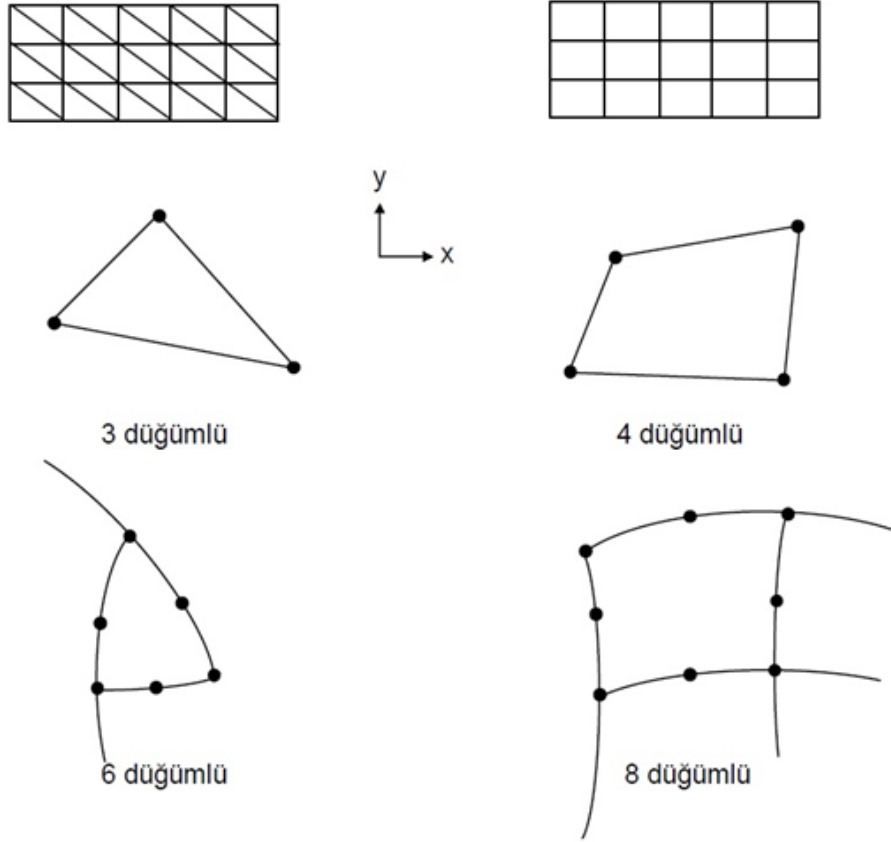
uygulamaktadır. Sonuç olarak, sınır koşulları, sistem özellikleri, dış yüklerdeki sürekli veya ani değişimler kolaylıkla hesaba katılabilmektedir. Ayrıca sürekli sistemin tipik bölgelerindeki elemanların boyutlarını küçülterek o bölgeyi daha detaylı incelemek mümkün olmaktadır (Töremiş, 2003). Bu yöntemin bir diğer avantajı, sınır koşullarının problemin çözülme sırasına göre son adımda hesaplamalara dahil edilmesidir. Böylece, probleme çeşitli sınır koşulları uygulandığında, ilk yoğun hesaplamaları tekrarlamaya gerek kalmamaktadır. Zeinkiewicz (1977), sonlu elemanlar yöntemini matematiksel olarak sürekli sistemler için genel bir çözüm yöntemi olarak tarif etmiştir. Bu yöntemi kullanarak, sürekli bir sistem, sonlu sayıda bileşen veya elemandan ve bu elemanları birbirine bağlayan düğümlerden oluşan ayrık bir sistem olarak modellenmektedir (Bildik, 2013). Şekil 1 Modelin sonlu elemanlara bölünmesini göstermektedir.



Şekil 1. Modelin sonlu elemanlara bölünmesi (Bildik, 2013)

Bunun anlamı ise; Karmaşık geometrili bir eleman, sonlu sayıda elemana bölünür, ardından her eleman bir takım denklemlerle matematiksel olarak ifade edilir. Bu denklem takımları, bir takım sistem denklemleri elde etmek için entegre edilir. Sistemin diferansiyel denklem takımı cebirsel denklem takımlarına indirgenir.

Sonlu elemanlar yönteminde elemanlar 2B veya 3B olarak seçilebilmektedir. Eleman tipi seçilirken düzgün geometrik form sahip olmayan elemanlar için eğrisel eleman seçilir. Şekil 2'de görüleceği gibi, 2B çözümlerde eleman tipi üçgen veya dörtgen şeklinde oluşturulabilmektedir.



Şekil 2. Tipik 2 Boyutlu Elemanlar (Civelek, 2011)

Bu yöntemin avantajları;

- Bilgisayar yardımı ile karmaşık sorunlara hızlı çözüm sağlamaktadır,
- Herhangi bir eleman Her türlü bir geometrik şekilde modellenebilmektedir,
- Problem verilerine göre gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir,
- Aynı formül takımı altında birçok soruna çözüm geliştirme,
- Zemin-yapı etkileşimi, yük ataması ve sınır koşulları belirlenmektedir.

C. Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı

Geoteknik mühendisliğinde tüm problemleri çözmek için sonlu elemanlar yöntemi uygulanabilmektedir. Lineer davranış problemlerini çözmek için ilk kez sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin gelişmesiyle birlikte nonlinear problemlere ve böylece zemin yapılarına ve zemin ile etkileşim içinde olan üst yapı elemanların çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemin

uygulanmasında malzemenin davranışı şekil değiştirme ile toplam gerilmeler arasındaki değişimler formülize edilir. Malzemelerin davranışı efektif gerilme cinsinden ifade edilmekte ve boşluk suyu basıncına ve efektif gerilmelere bağlı olarak bir gerilme tensörü oluşmaktadır. Geoteknik mühendisliği problemleri genellikle yapı ile zemin arasındaki etkileşimdedir ve bu tür problemlerin çözümünde yapı elemanları ile zemin malzemesi arasındaki arayüz kullanılmalıdır. Ayrıca, sınır koşulları ve seçilen sonlu elemanlar ağı sonucun gerçekçi olmasını etkilemektedir.

Sonlu elemanlar analizinde problemin gerçeğe yakın modellenebilmesi için bunun aşamalı inşaat adımları dikkate alınarak yapılması gerekmektedir.

Problemin bu şekilde analiz edilmesinde sağlayacağı faydalar şu şekildedir;

- Model çözülürken, zeminin herhangi bir serbest dolgu yapılması veya kazı ile çıkarılması durumunda modelin geometrisi sürekli değişebilmektedir, bu değişiklikler sonlu elemanlar ağından elemanlar eklenerek veya çıkartılarak modellenebilmektedir.
- Yapılan analizlerde zemin ağırlığı içerisindeki toplam gerilmelerdeki değişime bağlı olarak zemin özellikleri her aşamada değişmektedir.

Problem analizi sonucunda geoteknik mühendisliği için faydalı olan boşluk suyu basıncı, yatay ve düşey yer değiştirme değerleri, efektif gerilmeler ve şev duyarlılığı gibi parametreleri belirleyebilmekteyiz.

D. Plaxis Paket Programı

PLAXIS paket programı, karmaşık ve kompleks problemleri sonlu elemanlar yöntemini kullanarak diferansiyel denklemlerle ifade ederek çözümler geliştiren bir programdır. Dinamik ve statik analizler ile zamana bağlı davranış analizleri yapabilen, oturma analizleri, şev duyarlılığı ve taşıma gücü gibi temel problemleri çözebilen bir paket programdır. PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) ilk olarak 1986 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından yumuşak zeminler üzerindeki nehir dolgularını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmek için geliştirilmiş, zamanla diğer Geoteknik Mühendislik problemlerini çözmek için genişletilmiştir (URL-1). PLAXIS yazılımı sağlamlığı, kullanıcı dostu olması ve yüksek kalitesi ile

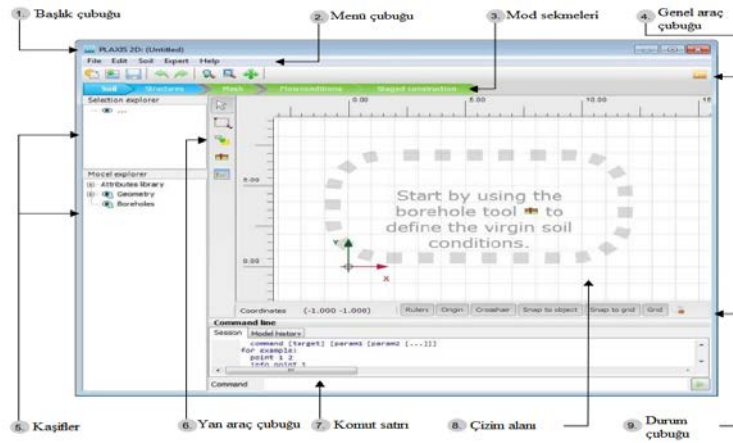
bilinmiştir. Bu çalışmada PLAXIS 20 versiyonu kullanılmıştır. Analizler iki boyutlu düzlemsel deformasyon olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde PLAXIS yazılımının genel kullanım ilkeleri anlatılmıştır ve PLAXIS yazılımında yer alan zemin modelleri sunulmuştur.

E. Plaxis Yazılımı Genel Kullanım İlkeleri

PLAXIS yazılımı iki ayrı modülden oluşmaktadır (Brinkgreve vd., 2019):

1. Girdi programı (Input program) : Girdi programı geometri modları (Geometry modes) ve hesaplama (Calculation modes) modlarından oluşmaktadır. Buradan 6 düğümlü veya 15 düğümlü bir sonlu eleman ağı seçilmektedir, 15 düğümlü sonlu eleman ağı seçilirse gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayabilmektedir. Şekil 3 Girdi programını göstermektedir.
 - a. Geometri modları (Geometry modes) : Projenin geometrik konfigürasyonu, Girdi programında mavi renkli sekmelerle gösterilen Geometri modlarında tanımlanmaktadır. Tüm geometri değişiklikleri yalnızca Geometri modlarında mümkündür. Yapılar (plakalar, kirişler), arayüzler veya yükler gibi unsurlar, yalnızca Yapılar modunda (Structures mode) geometrik objelere atanabilmektedir. Geometri modları şunlardır:
 - i. Zemin (Soil) : Zemin stratigrafisi, genel su seviyeleri ve zemin katmanlarının başlangıç koşulları Zemin modunda tanımlanmaktadır. Geometride zemin malzemesi ve stratigrafiyi tanımlamak için gerekli özellikler mevcuttur.
 - ii. Yapılar (Structures) : Projedeki yapısal elemanlar ve kuvvetlerin yanı sıra geometrik objeler, Yapılar modunda tanımlanmaktadır.
 - b. Hesaplama modları (Calculation modes) : Hesaplama işlemi, Girdi programında yeşil renkli sekmelerle gösterilen Hesaplama modlarında tanımlanmaktadır. Hesaplama modları şunlardır:
 - i. Ağ (Mesh) : Geometri modeli ayrıklaştırılmakta ve ağ modunda bir sonlu eleman ağı oluşturulmaktadır. Geometrik konfigürasyon bu modda değiştirilemez. Ağ, projenin geometrisi her değiştirildiğinde yeniden oluşturulmalıdır.

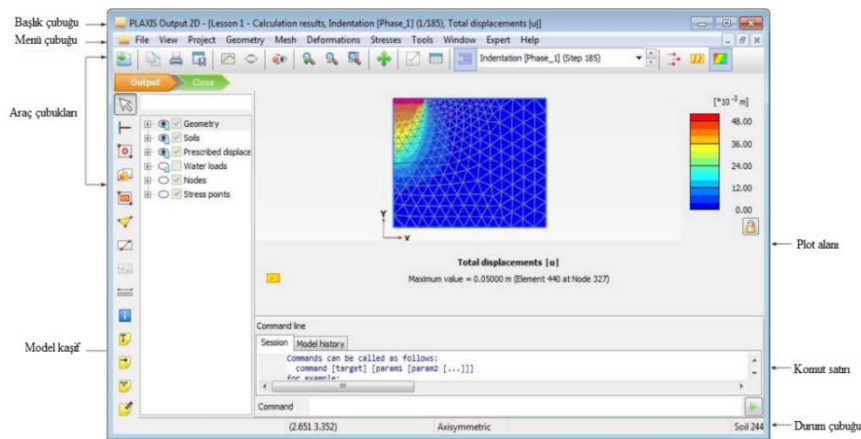
- ii. Akış koşulları (Flow conditions) : Zemin modunda tanımlanan su koşullarından üretilen su seviyelerinin yanı sıra, bu modda su seviyeleri belirlenebilip değiştirilebilmektedir.
- iii. Aşamalı inşaat (Staged construction) : Geometri modelinin parçaları etkinleştirilebilmekte/devre dışı bırakılabilmekte ve özellikler değiştirilebilmektedir. Proje Aşamalı inşaat modunda hesaplanmaktadır.



Şekil 3. Girdi programı

Kaynak: (Brinkgreve vd., 2019)

- 2. Çıktı programı (Output program) : Çıktı programında, Girdi programında oluşturulan geometrik konfigürasyonundan elde edilen tüm sonuçlar görüntülenmektedir. Yer değiştirmelerin, basınçların, deformasyonların ve eğrilerin görüntülenebilmektedir. Şekil 4 Çıktı programını göstermektedir.



Şekil 4. Çıktı programı

Kaynak: (Brinkgreve vd., 2019)

F. Zemin Modelleri

PLAXIS yazılımında 16 farklı zemin modeli vardır . Bunlar şu şekildedir;

- Lineer Elastik Modeli (Linear Elastic Model)
- Mohr-Coulomb Modeli (Mohr-Coulomb Model)
- Sertleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model)
- Küçük Gerinim Sertliğine Sahip Sertleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness)
- Yumuşak Zemin Modeli (Soft Soil Model)
- Yumuşak Zemin Sürünme Modeli (Soft Soil Creep Model)
- Eklemlili Kaya Modeli (Jointed Rock Model)
- Modifiye Cam-Kil Modeli (Modified Cam-Kil Model)
- NGI-ADP Modeli (NGI-ADP Model)
- UDCAM-S Modeli (UDCAM-S Model)
- Hoek-Brown Modeli (Hoek-Brown Model)
- UBC3D-PLM Modeli (UBC3D-PLM Model)
- Beton Modeli (Concrete Model)
- Viskoz olmayan Sekiguchi-Ohta Modeli (Sekiguchi-Ohta Model Inviscid)
- Viskoz olan Sekiguchi-Ohta Modeli (Sekiguchi-Ohta Model Viscid)
- Kullanıcı Tanımlı Zemin Modelleri (User-Defined Soil Models)

olarak sıralanabilir (Brinkgreve vd., 2019).

1. Lineer Elastik Modeli (Linear Elastic Model)

Lineer elastik modeli (LE): Bu model, Hooke'un izotropik lineer esneklik kanununu temsil eder. Lineer elastik model, zemin davranışının simülasyonu için çok sınırlıdır. Öncelikle zemindeki rijit yapılar için kullanılır. Model, etkin Young modülü (E') ve etkin Poisson oranı (ν') olmak üzere iki elastik rijitlik parametresi içerir. Lineer Elastik modelin girişi sırasında, kayma modülü (G) ve

ödometre modülü (E_{oed}) değerleri yardımcı parametreler (alternatifler) olarak sunulur (Brinkgreve vd., 2019).

2. Mohr-Coulomb Modeli (Mohr-Coulomb Model)

Mohr-Coulomb modeli (MC): Bu iyi bilinen lineer elastik mükemmel plastik model, genel olarak zemin davranışının ilk yaklaşımı olarak kullanılır. Ele alınan sorunun ilk analizi için bu modeli kullanması önerilir. Zemin tabakası için sabit bir ortalama rijitlik tahmin edilmektedir. Bu sabit rijitlik nedeniyle, hesaplamalar nispeten hızlı olma eğilimindedir ve deformasyonların ilk tahmini elde edilebilir. Mohr-Coulomb modeli, genel olarak toplam beş parametre (iki rijitlik parametresi ve üç mukavemet parametresi) gerektirir. Rijitlik parametreleri etkin Young modülü (E') ve etkin Poisson oranı (ν')'dır. Mukavemet parametreleri etkin Kohezyon (c'_{ref}), etkin İçsel sürtünme açısı (ϕ') ve Dilatasyon açısı (ψ)'dır (Brinkgreve vd., 2019).

3. Sertleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model)

Sertleşen zemin modeli (HS): Bu, zemin davranışının simülasyonu için gelişmiş bir modeldir. Sertleşen Zemin modeli, elastoplastik tipte bir hiperbolik modeldir. Model ayrıca zemin basıncını simüle etmek için basınç sertliğini de içerir. Bu model, kum ve çakılın yanı sıra killer ve siltler gibi daha yumuşak zemin türlerinin davranışını simüle etmek için kullanılabilir. Sertleşen Zemin modelinde rijitlik parametreleri Sekant rijitliği (E_{50}^{ref}), Teğet rijitliği (E_{oed}^{ref}), Boşaltma / yeniden yükleme rijitliği (E_{ur}^{ref}) ve Stres seviyesi için güç (m)'dir (Brinkgreve vd., 2019).

4. Küçük Gerinim Sertliğine Sahip Sertleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness)

Küçük gerinim sertliğine sahip sertleşen zemin modeli (HSsmall): Bu, Sertleşen Zemin modeline benzer, elastoplastik tipte bir hiperbolik modeldir. Ayrıca bu model, küçük gerinimlerden büyük gerinimlere kadar zeminlerin farklı reaksiyonlarını simüle eden gerinime bağlı rijitlik modüllerini içerir. rijitlik parametreleri Sekant rijitliği (E_{50}^{ref}), Teğet rijitliği (E_{oed}^{ref}), Boşaltma / yeniden yükleme rijitliği (E_{ur}^{ref}) ve Stres seviyesi için güç (m)'dir (Brinkgreve vd., 2019).

5. Yumuşak Zemin Modeli (Soft Soil Model)

Yumuşak zemin modeli (SS): Bu, normalde konsolide killer ve turba gibi yumuşak zeminlerin davranışını simüle etmek için kullanılabilen Cam-Kil tipi bir modeldir. Model, birincil sıkıştırma durumlarında en iyi performansı gösterir. Bu modelde rijitlik parametreleri Modifiye sıkıştırma indeksi (λ^*) ve Modifiye şişme indeksi (κ^*)'dır. Mukavemet parametreleri etkin Kohezyon (c'_{ref}), etkin İçsel sürtünme açısı (ϕ') ve Dilatasyon açısı (ψ)'dır (Brinkgreve vd., 2019).

6. Yumuşak Zemin Sürünme Modeli (Soft Soil Creep Model)

Yumuşak zemin sürünme modeli (SSC): Bu, viskoplastisite çerçevesinde formüle edilmiş ikinci dereceden bir modeldir. Model, normal konsolide killer ve turba gibi yumuşak zeminlerin zamana bağlı davranışını simüle etmek için kullanılabilir. Model, logaritmik birincil ve ikincil sıkıştırmayı içerir. Bu modelde rijitlik parametreleri Modifiye sıkıştırma indeksi (λ^*), Modifiye şişme indeksi (κ^*) ve Modifiye sürünme indeksi (μ^*)'dır. Mukavemet parametreleri Kohezyon (c'_{ref}), İçsel sürtünme açısı (ϕ') ve Dilatasyon açısı (ψ)'dır (Brinkgreve vd., 2019).

7. Eklemlili Kaya Modeli (Jointed Rock Model)

Eklemlili kaya modeli (JR): Bu, plastik kesmenin yalnızca sınırlı sayıda kesme yönünde meydana gelebildiği, anizotropik elastik-mükemmel plastik bir modeldir. Bu model, katmanlı veya eklemlili kayanın anizotropik davranışını simüle etmek için kullanılabilir. Jointed Rock modelinde rijitlik parametreleri Kaya için Young modülü (E_1), Kaya için Poisson oranı (ν_1), 'Düzlem 1' yönüne dik Young modülü (E_2), 'Düzlem 1' yönüne dik kayma modülü (G_2) ve 'Düzlem 1' yönüne dik Poisson oranı (ν_2)'dır. Mukavemet parametreleri Kohezyon (c'_{ref}), İçsel sürtünme açısı (ϕ'), Dilatasyon açısı (ψ) ve Gerilme direnci ($\sigma_{t,i}$)'dır (Brinkgreve vd., 2019).

8. Modifiye Cam-Kil Modeli (Modified Cam-Kil Model)

Modifiye Cam-Kil modeli (MCC): Bu iyi bilinen kritik durum modeli, normal konsolide yumuşak zeminlerin davranışını simüle etmek için kullanılabilir. Model, boşluk oranı ile ortalama etkin gerilim arasında logaritmik bir ilişki olduğunu varsayar. Bu modelde rijitlik parametreleri Cam-Kil sıkıştırma indeksi (λ), Cam-Kil şişme indeksi (κ), Poisson oranı (ν) ve Yükleme için ilk

boşluk oranı (e_{init})'dır. Mukavemet parametreleri Kritik durum çizgisinin teğeti (M) ve Normal konsolidasyondaki yanal gerilme katsayısı (K_0^{nc})'dır (Brinkgreve vd., 2019).

9. NGI-ADP Modeli (NGI-ADP Model)

NGI-ADP modeli (NGI-ADP): NGI-ADP modeli, kil tipi malzemelerin drenajsız yüklenmesini içeren kapasite, deformasyon ve zemin-yapı etkileşimi analizi için kullanılabilir. Farklı gerilme yolları için belirgin anizotropik kesme mukavemetleri tanımlanabilir. NGI-ADP modelinde rijitlik parametreleri Boşaltma/yeniden yükleme kesme modülünün aktif kesme mukavemetine oranı (G_{ur}/S_u^A), Üç eksenli sıkıştırmada kesme gerilmesi (γ_f^C), Üç eksenli uzatmada kesme gerilmesi (γ_f^E) ve Direkt basit kesmede kesme gerilimi (γ_f^{DSS})'dır. Mukavemet parametreleri Referans aktif kesme kuvveti ($S_u^{A,ref}$), Üç eksenli basınç kesme kuvveti oranı ile aktif kesme mukavemeti ($S_u^{C,TX}/S_u^A$), Referans derinliği (y_{ref}), Derinlik ile kesme mukavemetinin artması ($S_{u,inc}^A$), Pasif kesme kuvvetinin aktif kesme mukavemetine oranı (S_u^P/S_u^A), İlk mobilizasyon (τ_0/S_u^A) ve Direkt basit kesme kuvvetinin aktif kesme mukavemetine oranı (S_u^{DSS}/S_u^A)'dır (Brinkgreve vd., 2019).

10. UDCAM-S Modeli (UDCAM-S Model)

UDCAM-S modeli (UDCAM-S): UDCAM-S modeli, kil veya çok düşük geçirimli siltli zeminlerin döngüsel yüklemelerinde drenajsız zemin davranışı ve mukavemet ve rijitliğin bozulması ile ilgilenmek için türetilmiş bir NGI-ADP model modelidir (Brinkgreve vd., 2019).

11. Hoek-Brown Modeli (Hoek-Brown Model)

Hoek-Brown modeli (HB): Bu iyi bilinen elastik mükemmel plastik model, kayanın izotropik davranışını simüle etmek için kullanılır. Kaya kütlesi için sabit

bir rijitlik kullanılır. Kesme kırılması ve çekme kırılması, lineer olmayan bir mukavemet eğrisi ile tanımlanır (Brinkgreve vd., 2019).

12. UBC3D-PLM Modeli (UBC3D-PLM Model)

UBC3D-PLM modeli (UBC3D-PLM): Bu, dinamik uygulamalarda sıvılaşma davranışının simülasyonu için gelişmiş bir modeldir. Model, döngüsel yükleme sırasında tersinmez gerinimlerin birikmesini içerir. Drenajsız davranışla birlikte, sonunda sıvılaşmaya yol açabilen gözenek basınçlarını biriktirir (Brinkgreve vd., 2019).

13. Beton Modeli (Concrete Model)

Beton modeli (Concrete): Concrete model, beton ve püskürtme beton yapılar için gelişmiş bir elastoplastik modeldir. Betonun zamana bağlı dayanım ve rijitliğini, basma ve çekmede gerinim sertleşme-yumuşama ile sünme ve büzülmeyi simüle eder (Brinkgreve vd., 2019).

14. Viskoz olmayan Sekiguchi-Ohta Modeli (Sekiguchi-Ohta Model Inviscid)

Sekiguchi-Ohta modeli (Viskoz olmayan): Sekiguchi-Ohta modeli (Inviscid), kil tipi zeminlerin zamandan bağımsız davranışı için bir Cam-Kil tipi efektif gerilme modelidir (Brinkgreve vd., 2019).

15. Viskoz olan Sekiguchi-Ohta Modeli (Sekiguchi-Ohta Model Viscid)

Sekiguchi-Ohta modeli (Viskoz olan): Sekiguchi-Ohta modeli (Viscid), kil tipi zeminlerin zamana bağlı davranışı (Sürünme) davranışı için Cam-Kil tipi etkili bir gerilme modelidir (Brinkgreve vd., 2019).

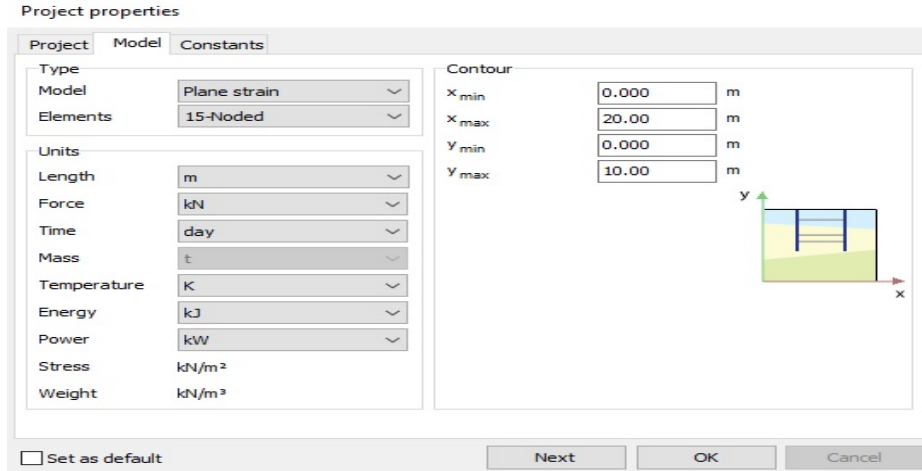
16. Kullanıcı Tanımlı Zemin Modelleri (User-Defined Soil Models)

Kullanıcı tanımlı zemin modelleri (UDSM): Bu seçenek ile standart PLAXIS modellerinden başka modelleri kullanmak mümkündür (Brinkgreve vd., 2019).

IV. ANALİZ

A. Analiz Metodolojisi

Bu çalışmada, kumlu killi zeminde meydana gelen toplam oturmayı hesaplamak için PLAXIS 2D v20 paket programı kullanılarak statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Çimento ile stabilize edilmiş zeminin toplam yer değiştirmesi doğrulanmıştır. Genel olarak düzgün bir kesit, yükleme şeması ve büyük ölçüde z yönünde olan düzlemsel gerilme modeli uygulama için uygundur. Normal gerilmeler tamamen z-yönünde kabul edilir, ancak yer değiştirmeler ve gerinimlerin sıfır olduğu varsayılır. Bu çalışmada 15 düğümlü bir ağ ele alınmıştır. Ayrıca malzemeler, yükler ve sınır koşulları belirtilmiş ve düzgün yayılı yük (50, 100, 150 ve 200 kPa) zeminin üst kısmına (4 m) ölçülerde uygulanmıştır. Modellerde, farklı yüzdelerde (%5, %10 ve %15) çimento ilavesi ile bir kat kumlu killi zemin kullanılmıştır. su seviyesi zemin seviyesi ile aynı konumda alınmıştır. Plaxis programında, bir konsolidasyon, plastik ve dinamik modeli kullanılarak bir sonlu eleman modelinin oluşturulması, geometrik bir modelle başlar. Bir geometri modeli oluşturmak, geometriyi çizmekle başlar. Şekil 5'te proje özelliklerini göstermektedir. sınır koşullar yatay düzlemde, minimum (xmin) 0 m, maksimum (xmax) 20 m, düşey düzlemde ise minimum (ymin) 0 m, maksimum (ymax) 10 m, alınmıştır.



Şekil 5. proje özellikleri

B. Mohr-Coulomb Modeli

Mohr-Coulomb, zemin elastikliği için Young modülü (E) ve Poisson oranı (ν), Zemin plastisitesi için zemin içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c) ve dilatasyon açısı (ψ) için beş girdi parametresi içeren bir elastik-plastik modeldir. İlk deformasyonların değerlendirilmesi için Mohr-Coulomb kullanılması tavsiye edilir. Bunun nedeni, diğer gelişmiş modellerin Mohr-Coulomb'dan daha fazla yer verisine ihtiyaç duymasındır. Analizlerde, Mohr-Coulomb modeli ile konsolidasyon, plastik ve dinamik hesap tipi yapılmıştır.

C. Plaxis'te Kullanılan Zemin Özellikleri

Mohr-coulomb modeli, gerçek zemin davranışının birinci dereceden bir yaklaşımı olarak kabul edilir. Bu elastik mükemmel plastik model beş temel girdi parametresi gerektirir: E, ν , ϕ , c, ve ψ . Bu numunede sürtünme açısı 30 derecenin altında olduğu için, ψ değeri sıfır alınmıştır. Çizelge 1'de modellemede kullanılan tüm parametreler verilmiştir.

Çizelge 1. Zemin parametre özellikleri

Parametre	Sembol	Kumlu killi zemin	Kumlu killi zemin + %5 çimento	Kumlu killi zemin + %10 çimento	Kumlu killi zemin + %15 çimento	Referans
Malzeme modeli		Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	
Davranış tipi		Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	
Kuru birim hacim ağırlığı (KN/m ³)	γ_k	16,2	16,2	16,2	16,2	(İnan, 2019)
Doygun birim hacim ağırlığı (KN/m ³)	γ_d	19,73	19,73	19,73	19,73	(-)
X yönünde geçirgenlik (m/gün)	k_x	4,275*10 ⁻⁷	4,98*10 ⁻⁷	3,54*10 ⁻⁷	4,439*10 ⁻⁷	(-)
Y yönünde geçirgenlik (m/gün)	K_y	4,275*10 ⁻⁷	4,98*10 ⁻⁷	3,54*10 ⁻⁷	4,439*10 ⁻⁷	(-)
Young modülü (KN/m ²)	E'	5000	5500	6000	7000	(Paudel vd., 2016)
Poisson oranı (-)	$\nu'_{(nu)}$	0,33	0,32	0,31	0,30	(Obrzud & Truty, 2012)
Kohezyon (KN/m ²)	c'_{ref}	66,1	138,15	62,63	55,8	(İnan, 2019)
İçsel sürtünme açısı (°)	ϕ	18,53	19,9	22,13	21	(İnan, 2019)
Dilatasyon açısı (°)	Ψ	0	0	0	0	(-)
Boşluk oranı	e	0,562	0,562	0,562	0,562	(-)
Hacimsel sıkışma (m ² /KN)	M_v	5,31*10 ⁻⁴	4,31*10 ⁻⁴	4,18*10 ⁻⁴	4,19*10 ⁻⁴	(İnan, 2019)
Konsolidasyon katsayısı (m ² /gün)	C_v	8,208*10 ⁻⁵	1,18*10 ⁻⁴	8,64*10 ⁻⁵	1,08*10 ⁻⁴	(İnan, 2019)
Kayma dalga hızı (m/s)	V_s	33,74	35,52	37,24	40,38	(-)

Boşluk oranı (e), Doygun birim hacim ağırlık (γ_d), X yönünde ve y yönünde geçirgenlik katsayısı (k_x ve k_y), sırasıyla denklem (1), (2) ve (3)'den hesaplanmıştır.

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_k} - 1 \quad \text{formül 1}$$

bu denklemde:

e = Boşluk oranı

G_s = Zemin katılarının özgül ağırlığı

γ_w = Suyun birim hacim ağırlığı

γ_k = Kuru birim hacim ağırlığı

$$e = \frac{2,58 \cdot 9,81}{16,2} - 1 = 0,562$$

$$\gamma_d = \frac{(G_s + e) \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad \text{formül 2}$$

γ_d = Doygun birim hacim ağırlığı

$$\gamma_d = \frac{(2,58 + 0,562) \cdot 9,81}{1 + 0,562} = 19,73 \frac{kN}{m^3}$$

$$k = C_v \cdot M_v \cdot \gamma_w \quad \text{formül 3}$$

k = Geçirgenlik katsayısı

C_v = Konsolidasyon katsayısı

M_v = Hacimsel sıkışma katsayısı

İyileştirilmemiş zemin için Geçirgenlik katsayısı

$$k = 8,208 \cdot 10^{-5} * 5,31 \cdot 10^{-4} * 9,81 = 4,275 \cdot 10^{-7} \frac{m}{day}$$

%5 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Geçirgenlik katsayısı

$$k = 1,18 \cdot 10^{-4} * 4,31 \cdot 10^{-4} * 9,81 = 4,98 \cdot 10^{-7} \frac{m}{day}$$

%10 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Geçirgenlik katsayısı

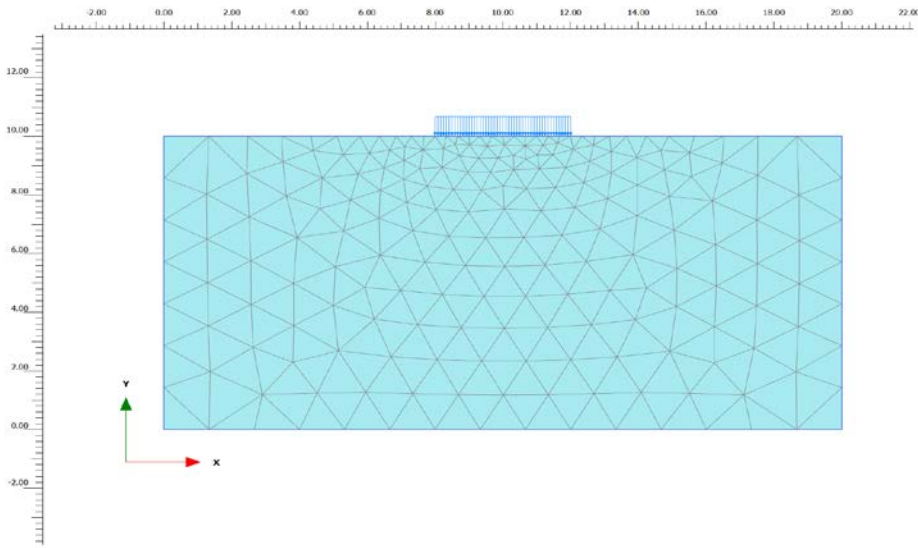
$$k = 8,64 \cdot 10^{-5} * 4,18 \cdot 10^{-4} * 9,81 = 3,54 \cdot 10^{-7} \frac{m}{day}$$

%15 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Geçirgenlik katsayısı

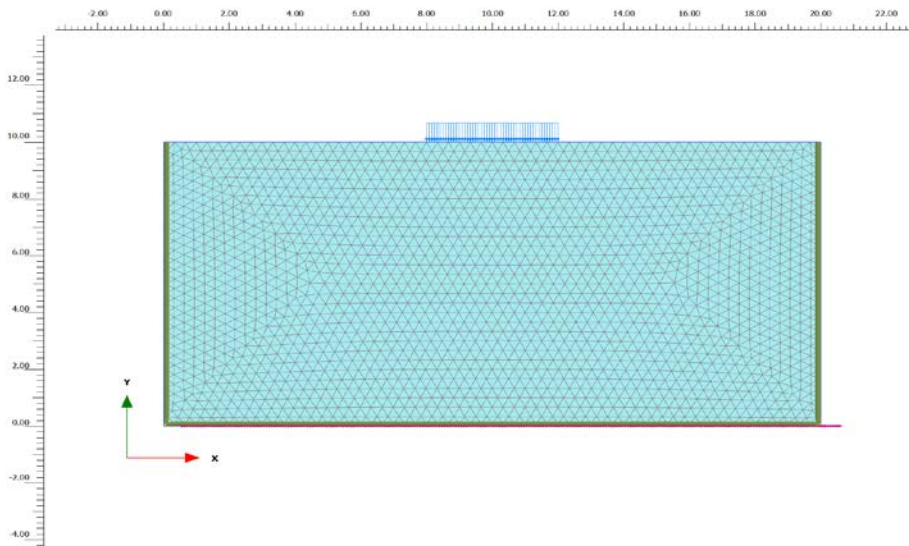
$$k = 1,08 \cdot 10^{-4} * 4,19 \cdot 10^{-4} * 9,81 = 4,439 \cdot 10^{-7} \frac{m}{day}$$

D. Ayrıklaştırma veya Ağ (Mesh)

Ayrıklaştırma veya ağ oluşturma, malzeme özelliklerinin ve sınır koşullarının tanımı ile birlikte, sonlu eleman modellemesinin temel bir yönüdür. Ağ boyutu, sonlu eleman analizinin doğruluğuna önemli bir katkıda bulunur. Bu çalışmada orta üçgen ağ kullanılmıştır. Şekil 6 a ve b, statik ve dinamik analizi için ağ oluşturmalarını göstermektedir.



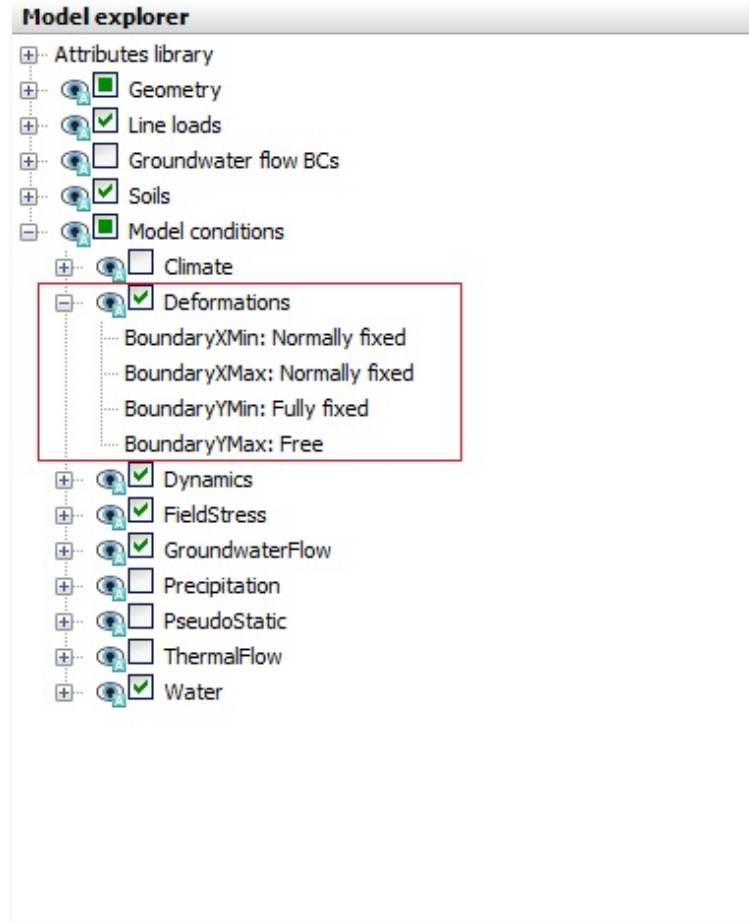
Şekil 6. Statik analizde ağ oluşturma



Şekil 7. Dinamik analizde ağ oluşturma

E. Statik Analizi

Statik analizde plastik tip hesaplama ve konsolidasyon kullanılmıştır. Konsolidasyon türünü hesaplarken, 7 gün olarak belirtilen interval parametresi için bir değer belirtmek gerekir. Plastik tip hesaplanırken, bir zaman aralığı belirlenebilse de, bir plastik hesaplamasında zaman etkileri dikkate alınmaz. Sonlu elemanlar analizinde, bir sınır değer problemini çözmek için sınır koşulları gereklidir. Bu nedenle PLAXIS geometrinin tabanında yer değiştirmenin hem düşey hem de yatay bileşenleri sabittir ($U_x = U_y = 0$), ayrıca, geometrinin düşey sınırlarının iki kenarı, yatay yer değiştirme olmadan (sıfır x yer değiştirme) düşey yer değiştirme serbest olarak ayarlanmıştır. Şekil 7 statik analizde Kullanılan sınır koşullarını göstermektedir. Çizelge 2 statik analizde kullanılan hesaplama aşamalarını göstermektedir.



Şekil 8. statik analizde Kullanılan sınır koşulları

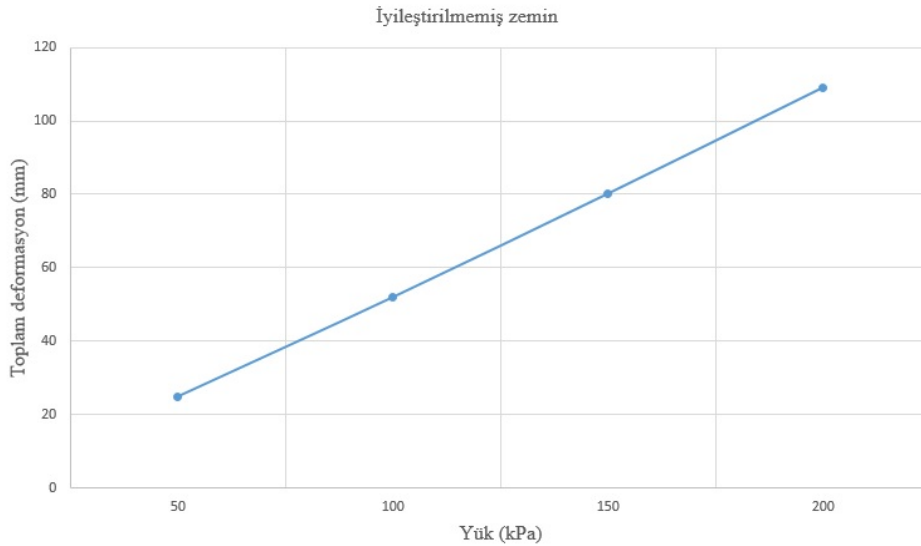
Çizelge 2. statik analizde kullanılan hesaplama aşamaları a) konsolidasyon b) plastik hesaplama işlemi.

a		
Aşama	Analiz	Açıklama
İlk aşama	K0 prosedürü	K0 prosedürü sadece yatay tabakalı geometriler için yatay bir zemin yüzeyi ve ,eğer uygulanacaksa, yatay bir yeraltı suyu seviyesiyle birlikte kullanılabilir. İlk aşamadan başlamış. 7 gün konsolidasyon analizi, deplasmanları sıfıra resetle seçeneğini işaretlenmiştir.
Aşama 1	konsolidasyon	
b		
Aşama	Analiz	Açıklama
İlk aşama	K0 prosedürü	K0 prosedürü sadece yatay tabakalı geometriler için yatay bir zemin yüzeyi ve ,eğer uygulanacaksa, yatay bir yeraltı suyu seviyesiyle birlikte kullanılabilir. İlk aşamadan başlamış. Plastik hesaplamasında zaman etkileri dikkate alınmaz, deplasmanları sıfıra resetle seçeneğini işaretlenmiştir.
Aşama 1	plastik	

F. Statik Analizinden Elde Edilen Sonuçlar

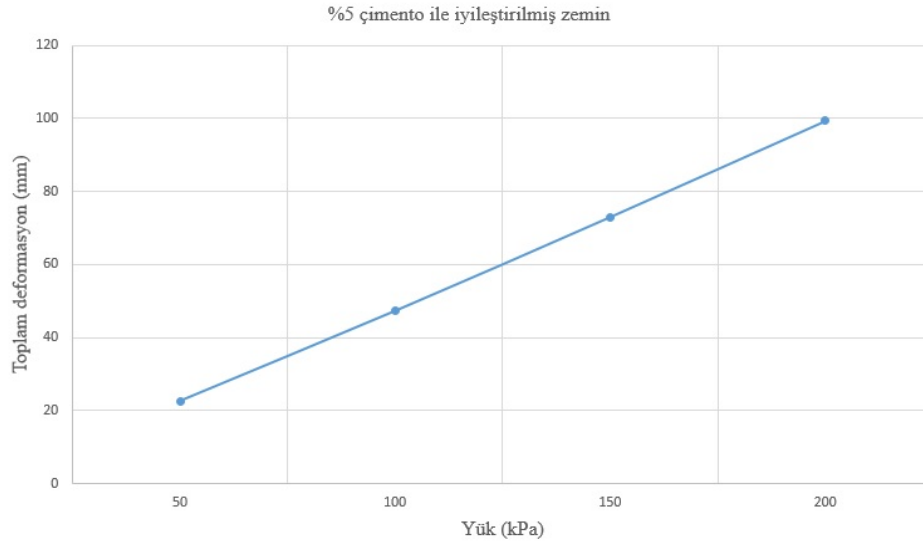
1. Konsolidasyon Hesap Türü Sonuçları

Şekil 8 ve Çizelge 3, iyileştirilmemiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Farklı yükleme aralıkları 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa iyileştirilmemiş zemin için elde edilen toplam yer değiştirmesi sırasıyla 24,97 mm, 51,99 mm, 80,13 mm ve 109 mm'dir. Sonuç, zeminde sürşarj yükü arttıkça deformasyonun arttığını ortaya koymuştur. EK A.1 PLAXIS yazılımında konsolidasyon sonuçları.



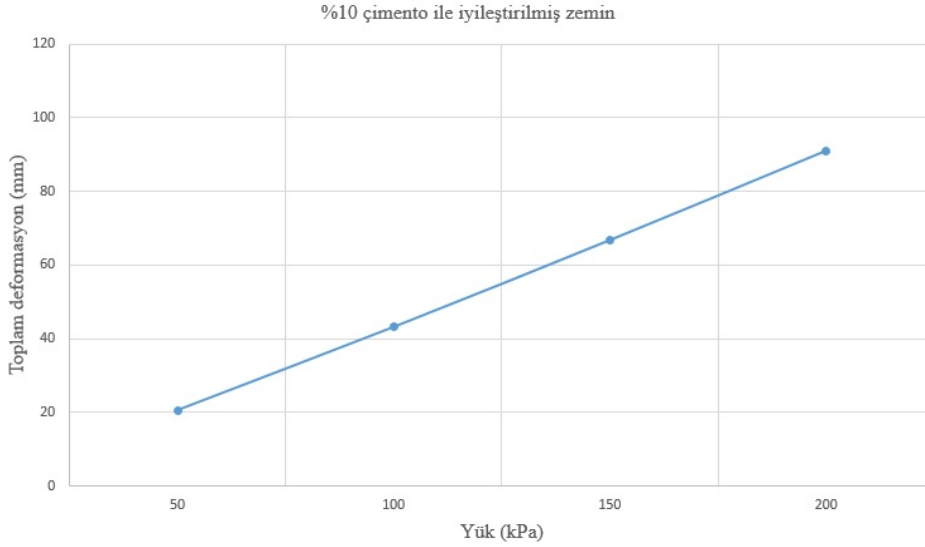
Şekil 9. iyileştirilmemiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Konsolidasyon hesap türü)

Şekil 9 ve Çizelge 3, %5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafikten, uygulanan yük arttıkça oturma da artar, ancak iyileştirilmemiş zemin ile karşılaştırıldığında, son uygulanan yükte (200 kPa) toplam oturma büyüklüğü 99,31 mm'dir. 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa için ortalama oturma %5 çimento ile stabilize edilmiş zemin, iyileştirilmemiş zeminden sırasıyla %9,77; %9,14; %8,94 ve %8,89 düşmüştür. Grafiğin zemin-çimento reaksiyonu nedeniyle düşük değerlerde oturma ile lineer ölçekte arttığı da açıkça gösterilmiştir.



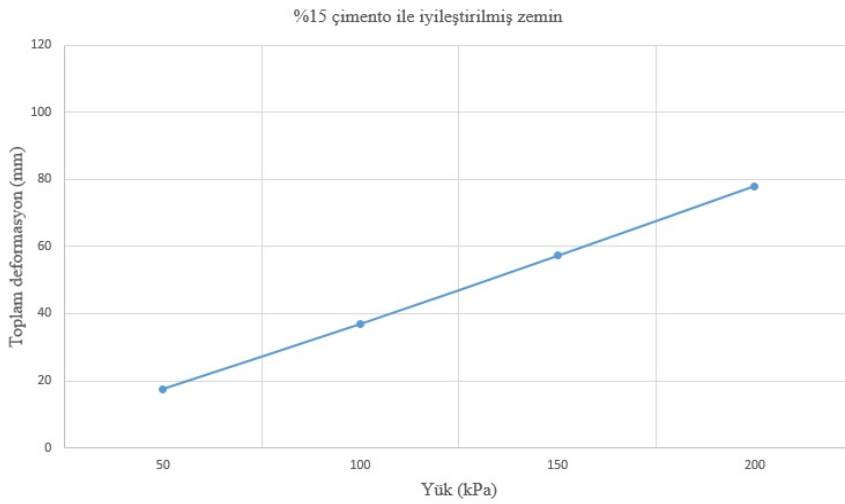
Şekil 10. %5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Konsolidasyon hesap türü)

Şekil 10 ve Çizelge 3, %10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa için ortalama oturma %10 çimento ile stabilize edilmiş zemin, iyileştirilmemiş zeminden sırasıyla %17,34; %16,85; %16,62 ve %16,43 düşmüştür. Çimento stabilize edilmiş zeminin %5'ine kıyasla taşıma kapasitesinin yüksek değerinden dolayı oturma değerleri daha az olmuştur.



Şekil 11. %10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Konsolidasyon hesap türü)

Şekil 11 ve Çizelge 3, %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa için ortalama oturma %15 çimento ile stabilize edilmiş zemin, iyileştirilmemiş zeminden sırasıyla %29,52; %28,97; %28,58 ve %28,40 düşmüştür. %15'te oturma değeri, çimento stabilize edilmiş zeminin %5 ve %10'una göre daha az olmuştur. Bu, zeminin oturmasının iyileştirilmesinin, optimum %15 çimento yüzdesinde önemli olduğunu göstermektedir. Ayrıca zemin-çimento reaksiyonu ve yüksek taşıma kapasitesi değeri nedeniyle grafiğin lineer ölçekte düşük değerlerle arttığı da açıkça görülmektedir.



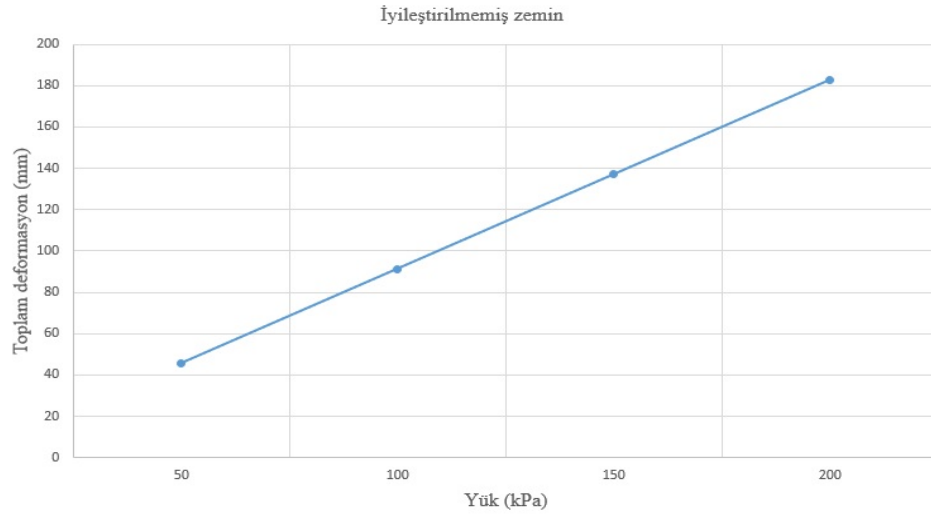
Şekil 12. %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Konsolidasyon hesap türü)

Çizelge 3. Konsolidasyon hesaplama tipi sonuçları

Yük (kPa)	Kumlu killi zemin (mm)	Kumlu killi zemin + %5 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %10 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %15 çimento (mm)	% olarak azalma
50	24,97	22,53	9,77	20,64	17,34	17,6	29,52
100	51,99	47,24	9,14	43,23	16,85	36,93	28,97
150	80,13	72,97	8,94	66,81	16,62	57,23	28,58
200	109	99,31	8,89	91,09	16,43	78,04	28,40

2. Plastik Hesap Türü Sonuçları

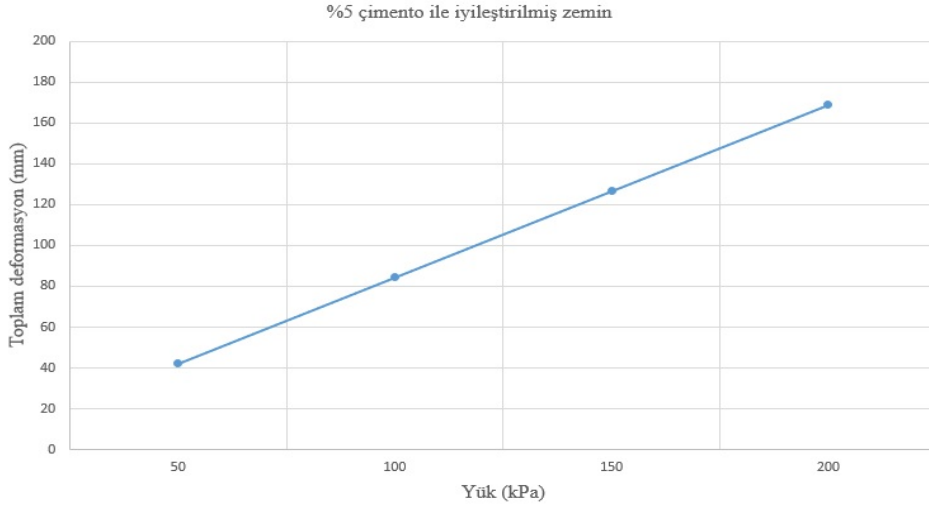
Şekil 12 ve Çizelge 4, iyileştirilmemiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Farklı yükleme aralıkları 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa iyileştirilmemiş zemin için elde edilen toplam yer değiştirmesi sırasıyla 45,64 mm, 91,31 mm, 137 mm ve 182,7 mm'dir. Sonuç, zeminde sürşarj yükü arttıkça deformasyonun arttığını ortaya koymuştur. EK A.2 PLAXIS yazılımında plastik sonuçları.



Şekil 13. iyileştirilmemiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Plastik hesap türü)

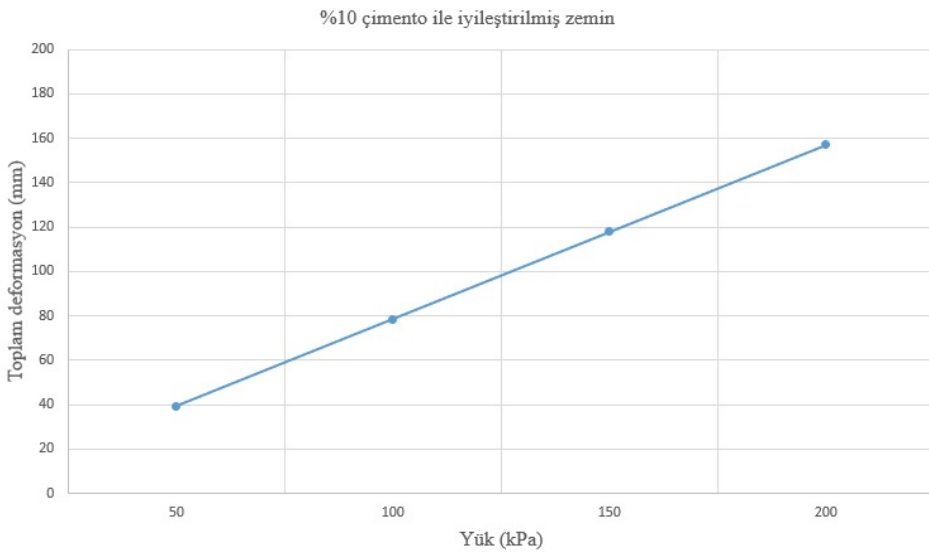
Şekil 13 ve Çizelge 4, %5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafikten, uygulanan yük arttıkça oturma da artar, ancak iyileştirilmemiş zemin ile karşılaştırıldığında, son uygulanan yükte (200 kPa) toplam oturma büyüklüğü 168,8 mm'dir. 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa için ortalama oturma %5 çimento ile stabilize

edilmiş zemin, iyileştirilmemiş zeminden %7,60 düşmüştür. Grafiğin zemin-çimento reaksiyonu nedeniyle düşük değerlerde oturma ile lineer ölçekte arttığı da açıkça gösterilmiştir.



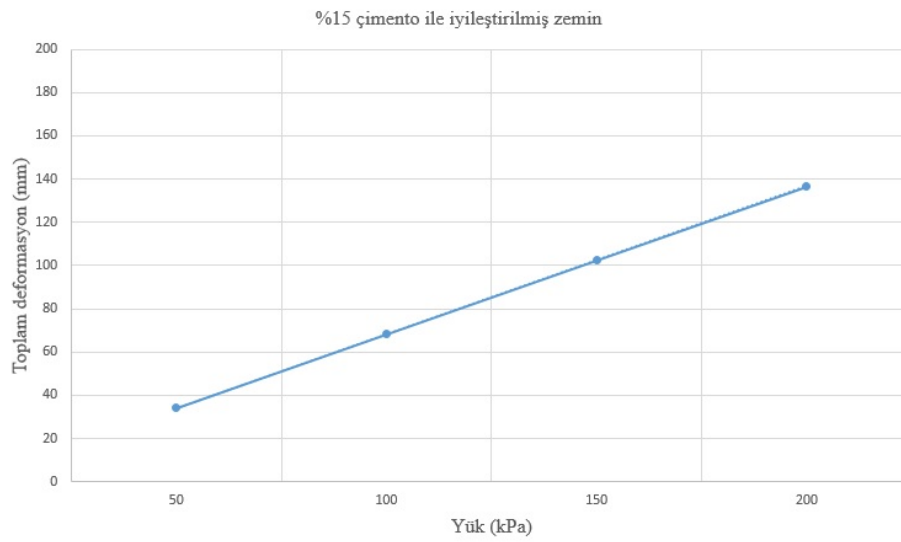
Şekil 14. %5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Plastik hesap türü)

Şekil 14 ve Çizelge 4, %10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa için ortalama oturma %10 çimento ile stabilize edilmiş zemin, iyileştirilmemiş zeminden %14 düşmüştür. Çimento stabilize edilmiş zeminin %5'ine kıyasla taşıma kapasitesinin yüksek değerinden dolayı oturma değerleri daha az olmuştur.



Şekil 15. %10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Plastik hesap türü)

Şekil 15 ve Çizelge 4, %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa için ortalama oturma %15 çimento ile stabilize edilmiş zemin, iyileştirilmemiş zeminden sırasıyla %25,22; %25,21; %25,20 ve %25,23 düşmüştür. %15'te oturma değeri, çimento stabilize edilmiş zeminin %5 ve %10'una göre daha az olmuştur. Bu, zeminin oturmasının iyileştirilmesinin, optimum %15 çimento yüzdesinde önemli olduğunu göstermektedir. Ayrıca zemin-çimento reaksiyonu ve yüksek taşıma kapasitesi değeri nedeniyle grafiğin lineer ölçekte düşük değerlerle arttığı da açıkça görülmektedir.



Şekil 16. %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde yük ve toplam deformasyon arasındaki ilişki (Plastik hesap türü)

Çizelge 4. Plastik hesaplama tipi sonuçları

Yük (kPa)	Kumlu killi zemin (mm)	Kumlu killi zemin + %5 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %10 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %15 çimento (mm)	% olarak azalma
50	45,64	42,17	7,60	39,25	14	34,13	25,22
100	91,31	84,37	7,60	78,53	14	68,29	25,21
150	137	126,6	7,60	117,8	14	102,5	25,20
200	182,7	168,8	7,60	157,1	14	136,6	25,23

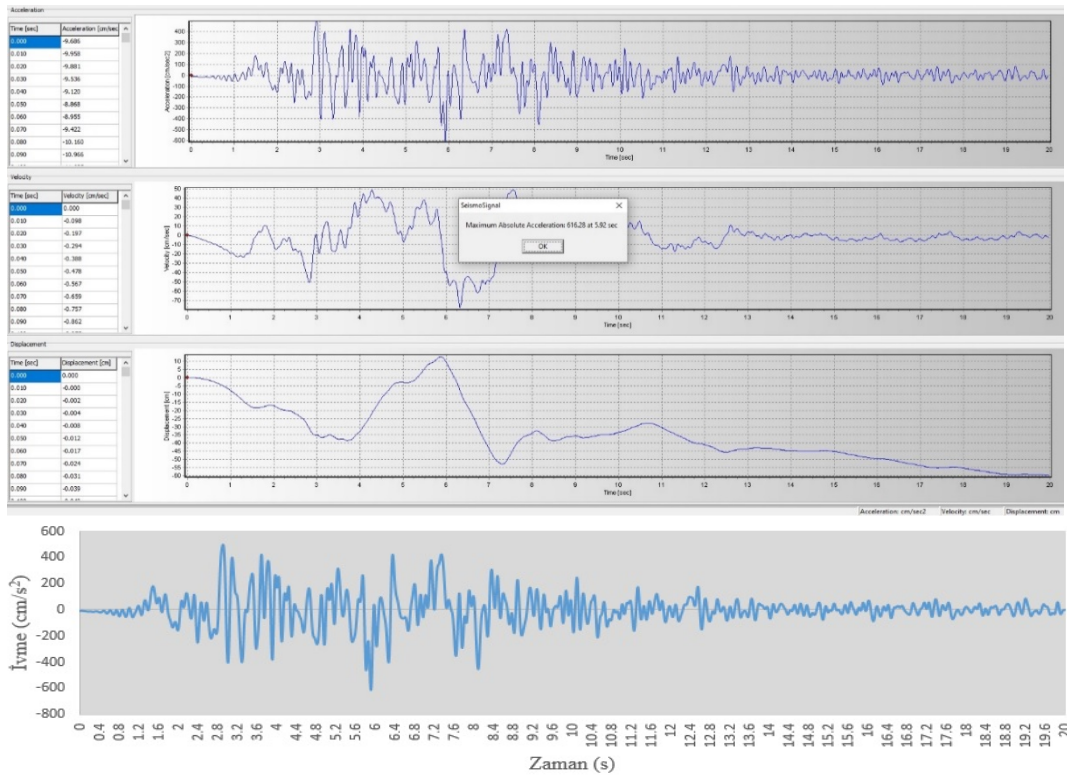
G. Dinamik Analizi

Bu çalışmada, dinamik analizi gerçekleştirmek için yerel ve uluslararası bir sismik kayıt kullanılmıştır. Yerel deprem, Türkiye'de İzmit şehrine yakınlığı nedeniyle bu şekilde adlandırılan İzmit depremidir. 17 Ağustos 1999'da yerel saatle 03:01'de Türkiye'nin Kocaeli ilinde meydana gelen 7,6 büyüklüğündeki yıkıcı deprem, ağır hasara ve 17,127-18,373 ölüme neden olmuştur

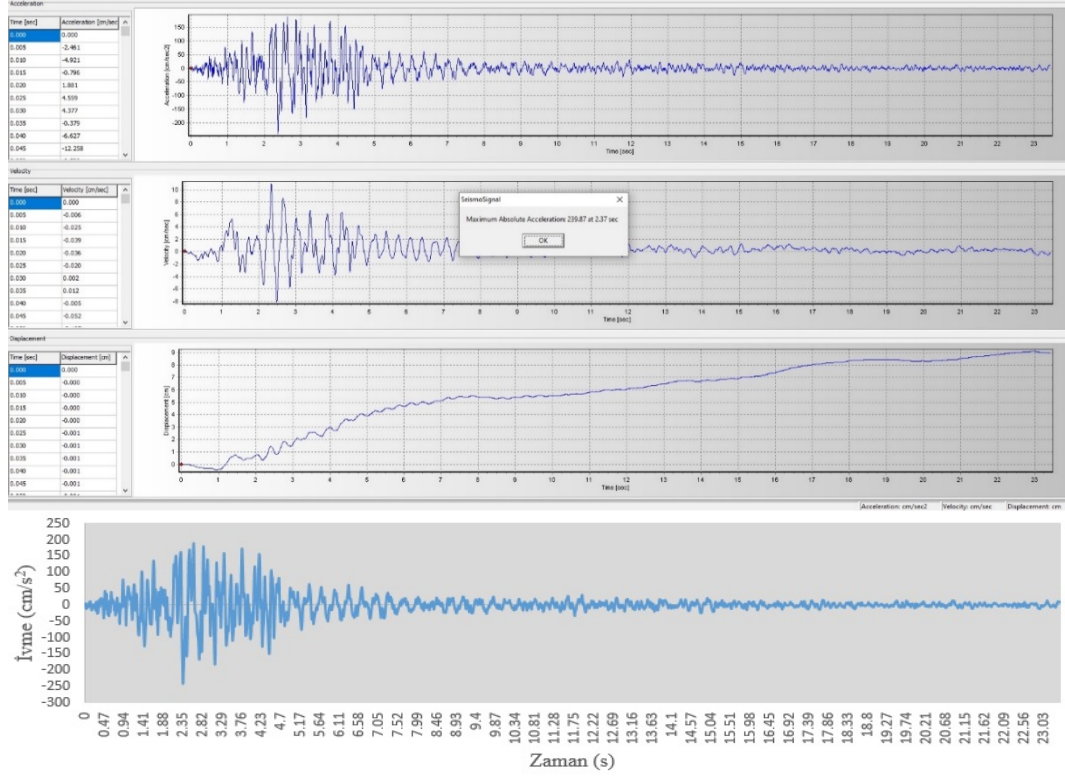
(Wikipedia.org,2023). Maksimum yer ivmesi, Sakarya Kayıt İstasyonunda 0,628 g'ye eşdeğer 5,92 saniyede 616,28 cm/s² olarak ölçülmüştür. Uluslararası deprem, Upland depremidir. Upland depremi 1990 yılında ABD'de 28 Şubat yerel saatle 15:43:37'de meydana gelmiş ve anlık büyüklüğü 5,7 olmuştur. Bu sol yanal doğrultu atımlı deprem, San Andreas fay sisteminin batısında meydana gelmiş ve toplam 12,7 milyon dolarlık kayıpla otuz kişiyi yaralamıştır (Wikipedia.org,2022). Maksimum yer ivmesi USGS tarafından Plaxis yazılım arşivinde kaydedilen 0,244 g'ye eşdeğer 2,37 saniyede 239,87 cm/s² olarak ölçülmüştür. İzmit ve Upland depremleri için maksimum yer ivmesini hesaplamak için SeismoSignal yazılımı kullanılmıştır. Şekil 16, iki depremden elde edilen maksimum yer ivmesini göstermektedir. Çizelge 5 İzmit ve Upland depremleri için ivme, hız ve süre değerlerini göstermektedir.

Çizelge 5. İzmit ve Upland depremleri için ivme, hız ve süre değerleri

Deprem	Deprem derinliği (Km)	Süre (s)	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	PGV/PGA (1/s)
İzmit depremi	15	20	616,28	77,41	0,125
Upland depremi	10	23,43	239,87	10,91	0,045



Şekil 17. İzmit depremden elde edilen maksimum yer ivmesi



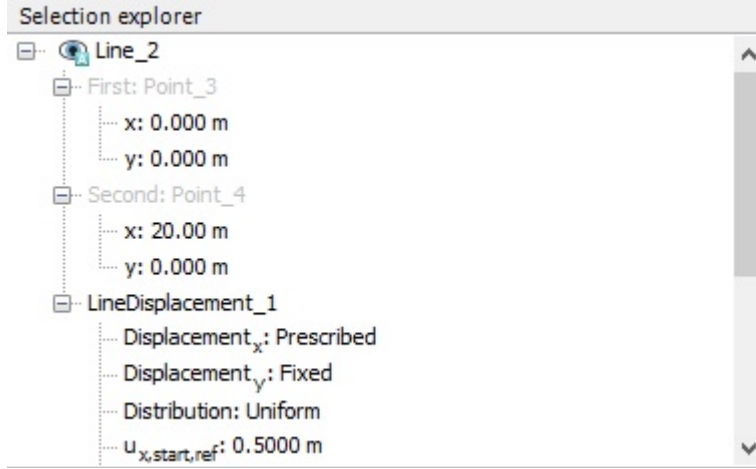
Şekil 18. Upland depremden elde edilen maksimum yer ivmesi

İki deprem kaydı kullanmanın amacı, sismik yükler ve farklı çevre koşulları altında zeminin mukavemetini ve özelliklerini incelemektir.

Dinamik analizde serbest saha (free field) sınır koşulu kullanılmıştır.

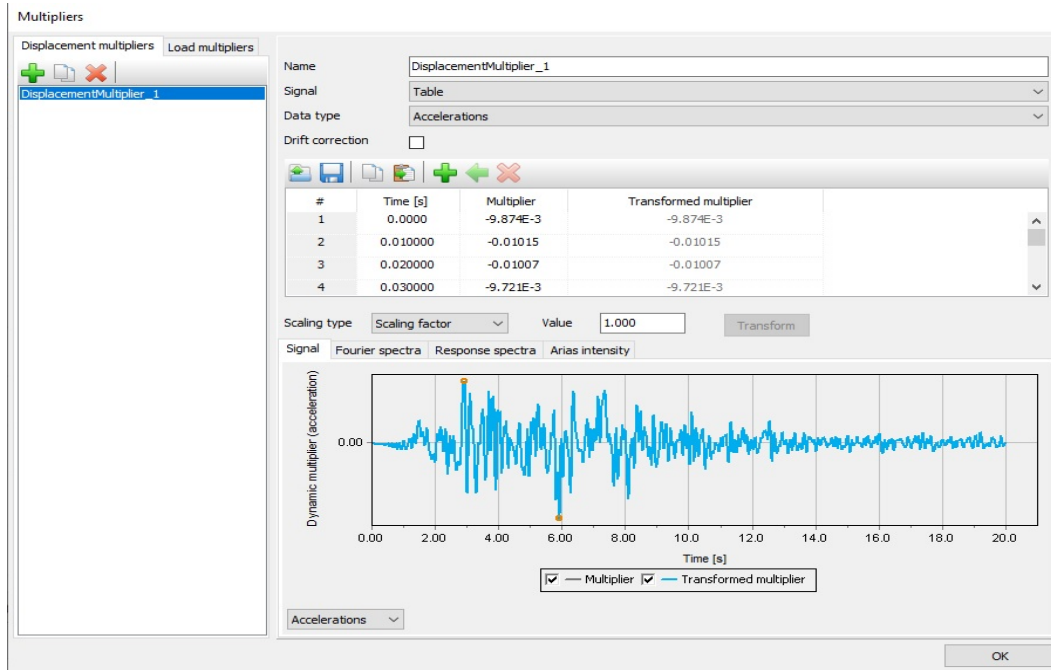
Modelin alt kısmında (0.0,0.0) ve (20.0,0.0) aracılığıyla öntanımlı deplasmanı tanımlanmaktadır. Öntanımlı deplasmanın x bileşenini öntanım (prescribed) olarak ayarlamaktadır ve 0,5 m'lik bir değer atamaktadır. Öntanımlı deplasmanın y bileşeni Sabit (fixed) olarak ayarlamaktadır. Yük dağılımı, düzgün yayılı yük olarak olmaktadır. Şekil 17, İzmit ve Upland depreminde kullanılan seçeneklerini göstermektedir.

$u_{x,start,ref} = 0,5$ m kullanımı, bu özel durumda, modelin tabanına çıkıntı yapan bir kaya hareketinin uygulandığı gerçeğini açıklamaktadır; dalga yayılım teorisi tarafından tanımlandığı gibi, belirli bir cisim dalgası serbest bir yüzeye ulaştığında, gerilimleri iletmenin imkansızlığından dolayı, hareketin genliğinin gelen dalganın genliğinin iki katı olduğunu anlatmaktadır (Sloot, 2019).



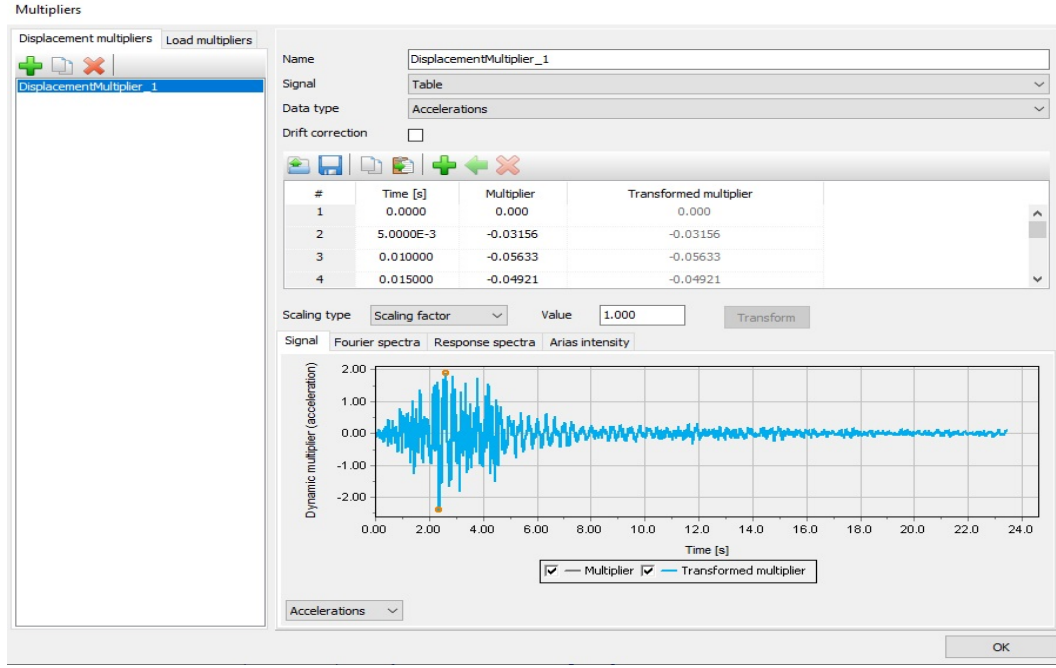
Şekil 19. İzmit ve Upland depreminde kullanılan seçenekleri

Plaxis dinamik modülü gerçek İzmit deprem kaydı (.txt) kullanarak analiz yapmaktadır. (.txt)'da ivme değerleri "g" olarak verilmiştir. Şekil 18 Plaxis yazılımına girilen İzmit deprem kaydını göstermektedir.



Şekil 20. Plaxis yazılımına girilen İzmit deprem kaydı

Plaxis dinamik modülü gerçek Upland deprem kaydı (.smc) kullanarak analiz yapmaktadır. (.smc)'da ivme değerleri " cm/s^2 " olarak verilmiştir. Şekil 19 Plaxis yazılımına girilen Upland deprem kaydını göstermektedir.



Şekil 21. Plaxis yazılımına girilen Upland deprem kaydı

Dinamik analizde dinamik hesap tipi kullanılmıştır. İzmit ve Upland depreminde dinamik zaman aralığı 20s olarak ayarlanmıştır. Çizelge 6, dinamik analizinde kullanılan hesaplama aşamalarını göstermektedir.

Çizelge 6. Dinamik analizinde kullanılan hesaplama aşamaları

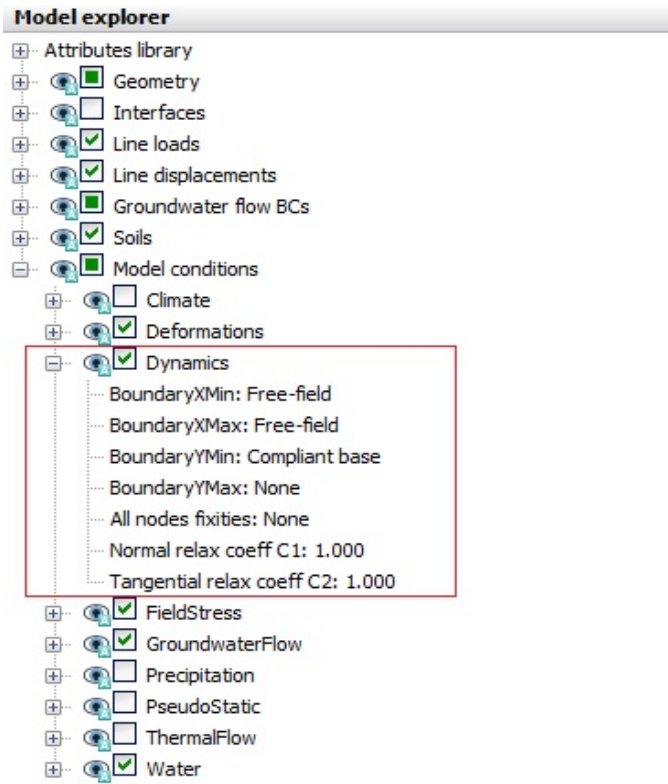
Aşama	Analiz	Açıklama
İlk aşama	K0 prosedürü	K0 prosedürü sadece yatay tabakalı geometriler için yatay bir zemin yüzeyi ve ,eğer uygulanacaksa, yatay bir yeraltı suyu seviyesiyle birlikte kullanılabilir.
Aşama 1	Plastik	İlk aşamadan başlamış. Deplasmanları sıfıra resetle seçeneğini işaretlenmiştir.
Aşama 2	Dinamik	Aşama 1'den başlamış. İzmit ve Upland depreminde dinamik zaman aralığı 20s olarak ayarlanmıştır.

H. Dinamik Analizde Serbest Saha (free field) Kullanım

Serbest saha sınır koşulu yalnızca yanal sınırlar için mevcuttur (yani x_{min} ve x_{max}) ve sınırda minimum yansıma ile dalgaların uzak alana yayılmasını simüle eder. Serbest saha elemanları, ana alanın her iki tarafında da modellenabilir ve ağ içindeki toprak katmanlarıyla aynı özelliklerle karakterize

edilir. Bu seçenek, Yapılar modunda dikey model sınırları boyunca arayüz öğelerinin oluşturulmasını gerektirir. Arayüz öğeleri modelin içine eklenmelidir, aksi takdirde Serbest saha sınır koşulu dikkate alınmaz. Bu seçenek dikey model sınırlarından biri için seçilirse, karşıt dikey model sınırı için de seçilmelidir. Bu seçenek, dinamik girdinin model alt sınırı boyunca uygulandığı deprem analizi için tercih edilir. Girdi hareketi daha sonra serbest saha elemanlarının tabanında da uygulanır (Brinkgreve vd., 2019). Şekil 20 serbest saha sınır koşulu kullanımını göstermektedir.

Tüm modellemeler için (etkin olmayan) bir arayüz (interface) ile uyumlu bir temel (compliant base) kullanılmaktadır.



Şekil 22. serbest saha sınır koşulu kullanımı

İ. Modelde yayılan dalgaların sönümlenmesi

Dalgaların zemin altında yayılmasıyla, yol boyunca enerji dağılmaktadır. Bu sönümlenmeye neden olan farklı faktörler vardır ve bunların çoğu frekansa bağlıdır. Bu tezdeki önemli sönümlenme faktörleri aşağıda özetlenmiştir:

- Malzeme sönümlenmesi, ya zeminler tarafından / yapısal rijitlik ve dayanım özellikleri;

- Kesinlikle lineer olmayan kazık ve zemin arasındaki arayüzden sönümleme;
- Toprak radyasyonu sönümleme, enerjinin uzak alana taşınması;
- Kırılma.

Bu faktörlerin dışında, FE modelinde kullanılan matematiksel modele dahil edilmesi gereken birçok başka faktör vardır. Bununla birlikte, bu faktörlerin çoğunun fiziksel arka planı hala bilinmediğinden, sistemin sönümünü yaklaşık olarak tahmin etmek için FE modelinde iki tür sönüm kullanılmaktadır. PLAXIS için bu iki yöntem, Newmark zaman entegrasyonlu sönümleme ve Rayleigh sönümlemeden oluşmaktadır. Newmark zaman entegrasyon sönümleme parametreleri bu tezde değiştirilmemiş ve varsayılan değerlere bırakılmıştır.

Rayleigh sönümlemesi frekansa bağlıdır ve iki hedef frekans için belirli bir sönümleme yüzdesi ile tanımlanmaktadır. Rayleigh sönümlemesi, α ve β gibi iki parametre içermektedir.

α , sistemin sönümlemesindeki kütlelerin etkisini belirleyen parametredir. α ne kadar yüksek olursa, daha düşük frekanslar o kadar sönümlenmektedir. β Sistemin sönümlemesindeki sertliğin etkisini belirleyen parametredir. β ne kadar yüksek olursa, o kadar yüksek frekanslar sönümlenmektedir (Brinkgreve vd., 2019).

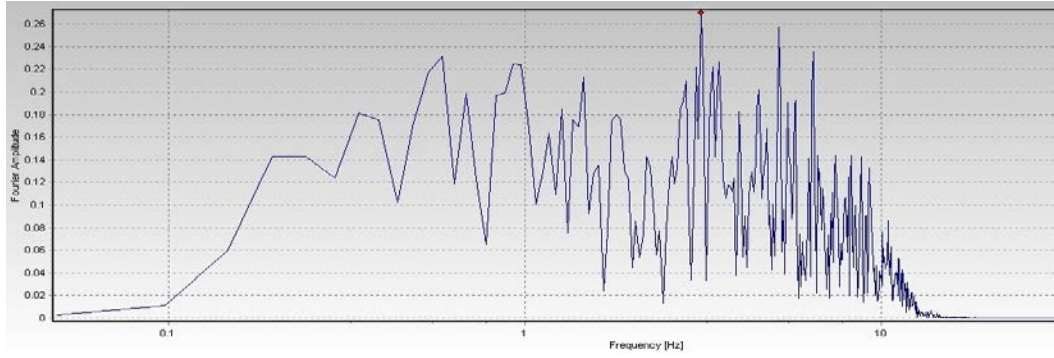
Bu çalışmada ilk hesaplamalar, Hudson ve diğerleri (1994) tarafından belirtilen birinci hedef frekansın zemin profilinin temel frekansına eşit olduğu ve ikinci frekansın oranının ilk tek sayısı olduğu yöntemine dayalı olarak yapılmıştır: giriş sinyalinin temel frekansı / zemin profilinin temel frekansı (Kottke & Rathje, 2009). Şekil 21'de 0,27 maksimum fourier genliğinde İzmit deprem sinyalinin temel frekansı 3,125 Hz olduğunu göstermektedir. Şekil 22'de 119,1 maksimum fourier genliğinde Upland deprem sinyalinin temel frekansı 2,905 Hz olduğunu göstermektedir. Çizelge 7 ve 8, İzmit ve Upland deprem için rayleigh sönümleme parametrelerini belirtmektedir.

Hedef 1'in frekansı şu şekilde verilmektedir:

$$f = \frac{V_s}{4H} \dots \quad \text{formül 4}$$

V_s = Kayma dalga hızı

H = Zemin tabakasının kalınlığı



Şekil 23. İzmit deprem için Fourier genliği ile frekans arasındaki ilişki

Çizelge 7. İzmit deprem için Rayleigh sönümlenme parametresinin belirlenmesi

	Kumlu killi zemin	Kumlu killi zemin + %5 çimento	Kumlu killi zemin + %10 çimento	Kumlu killi zemin + %15 çimento
Hedef 1 (Hz)	0,84	0,88	0,93	1,01
Hedef 2 (Hz)	5	5	5	5
Sönümlenme (%)	5	5	5	5
Rayleigh α (-)	0,4519	0,4702	0,4927	0,5280
Rayleigh β (-)	$2,725 \cdot 10^{-3}$	$2,707 \cdot 10^{-3}$	$2,684 \cdot 10^{-3}$	$2,648 \cdot 10^{-3}$

Denklem (4)'ten Hedef 1'in frekansını hesaplanmıştır.

İyileştirilmemiş zemin için Hedef 1'in frekansı

$$f_1 = \frac{33,74}{4 * 10} = 0,84 \text{ Hz}$$

İyileştirilmemiş zemin için Hedef 2'in frekansı

$$f_2 = \frac{3,125}{0,84} = 3,72 \text{ Hz} \text{ sonraki tek sayı} = 5 \text{ Hz}$$

%5 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 1'in frekansı

$$f_1 = \frac{35,52}{4 * 10} = 0,88 \text{ Hz}$$

%5 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 2'in frekansı

$$f_2 = \frac{3,125}{0,88} = 3,55 \text{ Hz} \text{ sonraki tek sayı} = 5 \text{ Hz}$$

%10 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 1'in frekansı

$$f_1 = \frac{37,24}{4 * 10} = 0,93 \text{ Hz}$$

%10 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 2'in frekansı

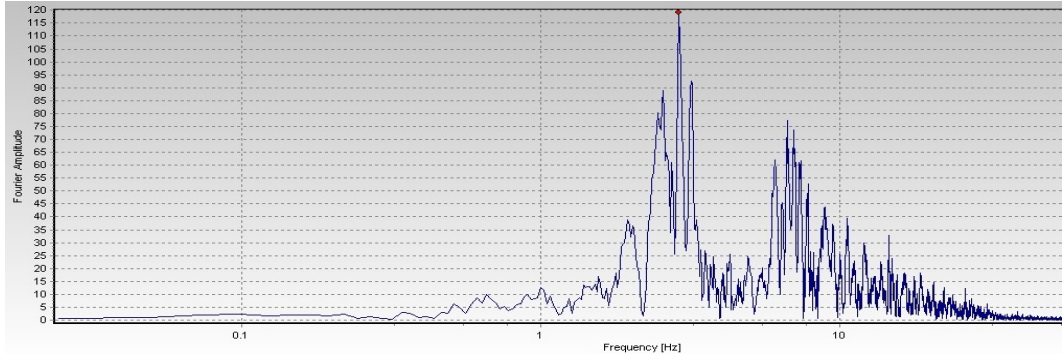
$$f_2 = \frac{3,125}{0,93} = 3,36 \text{ Hz} \text{ sonraki tek sayı} = 5 \text{ Hz}$$

%15 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 1'in frekansı

$$f_1 = \frac{40,38}{4 * 10} = 1,01 \text{ Hz}$$

%15 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 2'in frekansı

$$f_2 = \frac{3,125}{1,01} = 3,09 \text{ Hz} \text{ sonraki tek sayı} = 5 \text{ Hz}$$



Şekil 24. Upland deprem için Fourier genliği ile frekans arasındaki ilişki

Çizelge 8. Upland deprem için Rayleigh sönümlenme parametresinin belirlenmesi

	Kumlu killi zemin	Kumlu killi zemin + %5 çimento	Kumlu killi zemin + %10 çimento	Kumlu killi zemin + %15 çimento
Hedef 1 (Hz)	0,84	0,88	0,93	1,01
Hedef 2 (Hz)	5	5	5	3
Sönümlenme (%)	5	5	5	5
Rayleigh α (-)	0,4519	0,4702	0,4927	0,4748
Rayleigh β (-)	$2,725 * 10^{-3}$	$2,707 * 10^{-3}$	$2,684 * 10^{-3}$	$3,969 * 10^{-3}$

Denklem (4)'ten Hedef 1'in frekansını hesaplanmıştır.

İyileştirilmemiş zemin için Hedef 1'in frekansı

$$f_1 = \frac{33,74}{4 * 10} = 0,84 \text{ Hz}$$

İyileştirilmemiş zemin için Hedef 2'in frekansı

$$f_2 = \frac{2,905}{0,84} = 3,54 \text{ Hz} \text{ sonraki tek sayı} = 5 \text{ Hz}$$

%5 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 1'in frekansı

$$f_1 = \frac{35,52}{4 * 10} = 0,88 \text{ Hz}$$

%5 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 2'in frekansı

$$f_2 = \frac{2,905}{0,88} = 3,3 \text{ Hz} \text{ sonraki tek sayı} = 5 \text{ Hz}$$

%10 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 1'in frekansı

$$f_1 = \frac{37,24}{4 * 10} = 0,93 \text{ Hz}$$

%10 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 2'in frekansı

$$f_2 = \frac{2,905}{0,93} = 3,12 \text{ Hz} \text{ sonraki tek sayı} = 5 \text{ Hz}$$

%15 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 1'in frekansı

$$f_1 = \frac{40,38}{4 * 10} = 1,01 \text{ Hz}$$

%15 çimento ile iyileştirilmiş zemin için Hedef 2'in frekansı

$$f_2 = \frac{2,905}{1,01} = 2,87 \text{ Hz} \text{ sonraki tek sayı} = 3 \text{ Hz}$$

J. Sönümlenme Etkisi Olmadan Serbest Saha Sınır Koşulundan Elde Edilen Toplam Yer Değiştirmesinin Sonuçları.

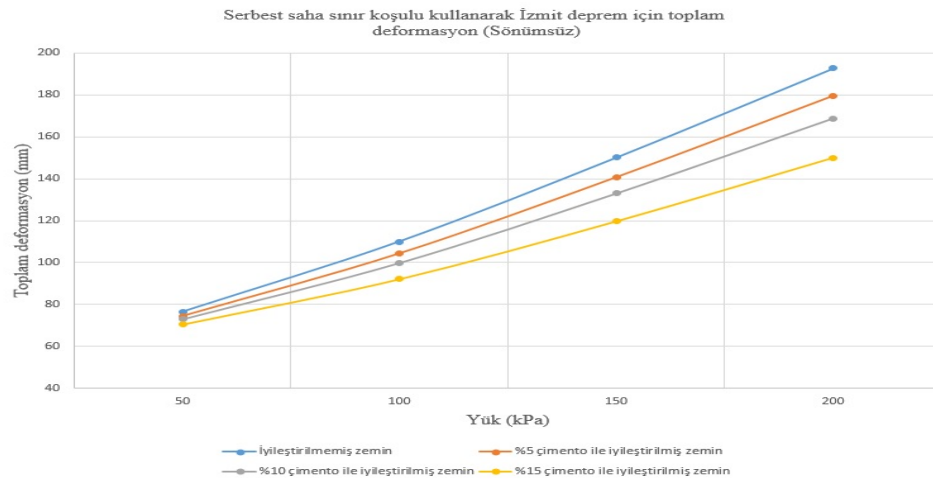
1. İzmit Depremden Gelen Sonuçlar

Şekil 23 ve Çizelge 9, Dinamik analizde Serbest saha sınır koşulu kullanarak zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sismik yükün yanı sıra 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa farklı yükleme aralıkları iyileştirilmemiş kumlu killi zeminden elde edilen toplam deformasyon sırasıyla 76,41 mm, 110 mm, 150,1 mm ve 192,7 mm'dir. Sonuç, kumlu killi zemin için sismik yükü altında sürşarj yükü arttıkça deformasyonun

arttığını ortaya koymuştur. %5 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminde son uygulanan yükte (200 kPa) toplam deformasyonun büyüklüğü 179,7 mm'dir. %5 çimento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %2,53; %5,1; %6,2 ve %6,75 düşmüştür. %10 çimento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %4,5; %9,3; %11,4 ve %12,4 düşmüştür. %10 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminin %5'ine kıyasla zemin taşıma kapasitesinin yüksek değerinden dolayı toplam deformasyon değerleri daha az olmuştur. %15 çimento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %7,8; %16,3; %20,3 ve %22,2 düşmüştür. 200 kPa yükünde %15 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemin için toplam deformasyon değeri (150 mm), %5 (179,7 mm) ve %10 (168,8 mm) çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemine göre daha az çıkmıştır. EK B.1 Sönümsüz olarak İzmit deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar.

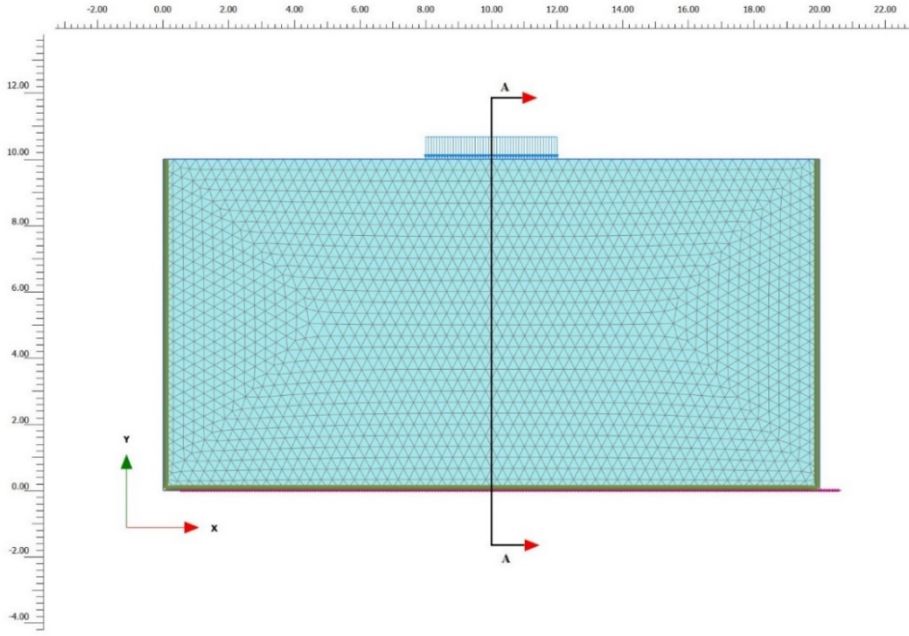
Çizelge 9. Dinamik analizde İzmit deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (Sönümsüz)

Yük (kPa)	Kumlu killi zemin (mm)	Kumlu killi zemin + %5 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %10 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %15 çimento (mm)	% olarak azalma
50	76,41	74,48	2,53	72,98	4,5	70,47	7,8
100	110	104,4	5,1	99,82	9,3	92,08	16,3
150	150,1	140,8	6,2	133	11,4	119,7	20,3
200	192,7	179,7	6,75	168,8	12,4	150	22,2

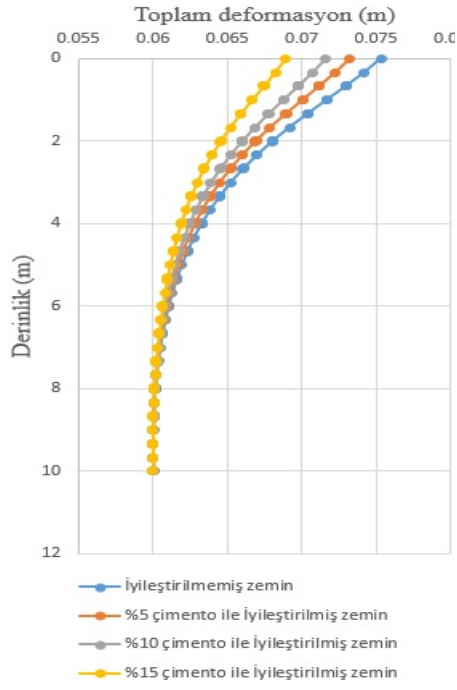


Şekil 25. Dinamik analizde İzmit deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (Sönümsüz)

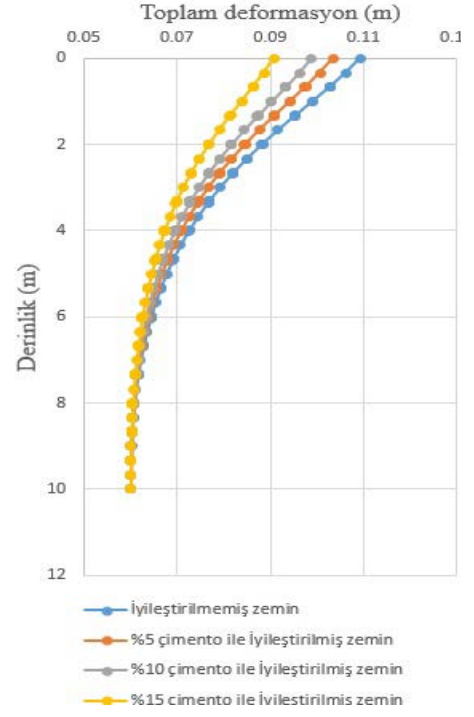
Şekil 24'daki gibi zeminin enine kesitini alırken, Şekil 25'deki gibi İzmit deprem kaydı kullanarak, farklı yükler altında farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonunun karşılaştırabilmektedir. Tüm şekillerde deformasyon derinlikle azaltmaktadır. Yeryüzünde en düşük deformasyonu %15 çimento zemin vermiş olup maksimum deformasyonu iyileştirilmemiş zemin vermektedir. Yük artışıyla beraber yeryüzündeki deformasyonu artmaktadır.



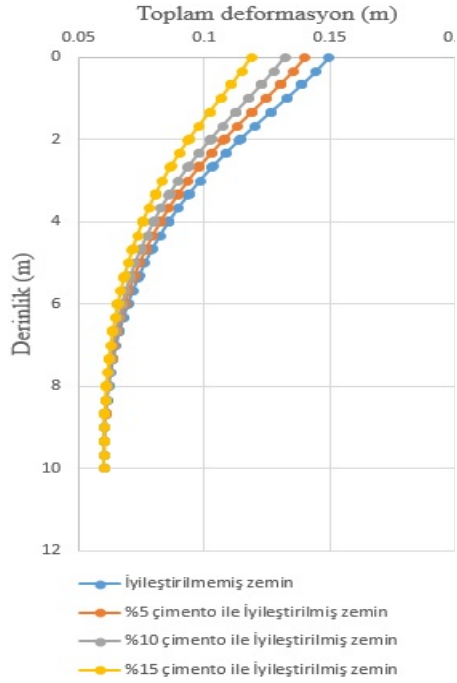
Şekil 26. zeminin enine kesiti



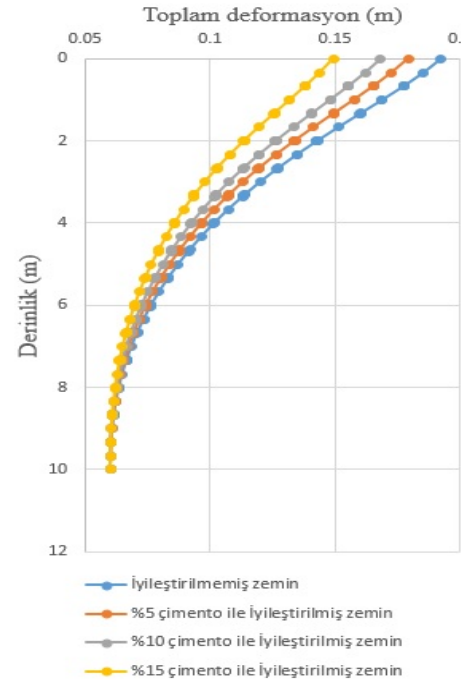
a



b



c



d

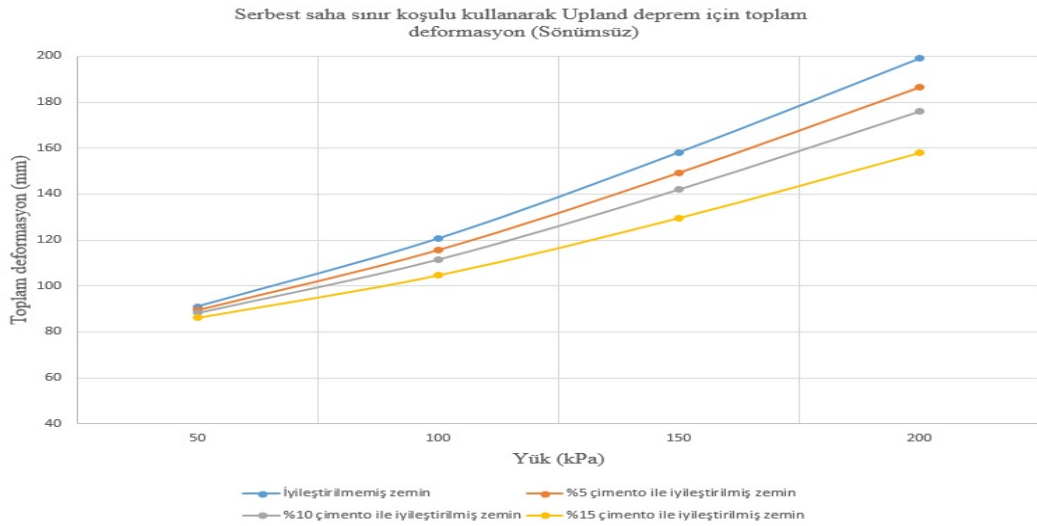
Şekil 27. İzmit deprem ve farklı yükler altında farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonunun karşılaştırması (Sönümsüz) a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

2. Upland Depremden Gelen Sonuçlar

Şekil 26 ve izelge 10, Dinamik analizde Serbest saha sınır koşulu kullanarak zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sismik yükün yanı sıra 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa farklı yükleme aralıkları iyileştirilmemiş kumlu killi zeminden elde edilen toplam deformasyon sırasıyla 91,02 mm, 120,6 mm, 158,1 mm ve 199 mm'dir. Sonuç, kumlu killi zemin için sismik yükü altında sürşarj yükü arttıkça deformasyonun arttığını ortaya koymuştur. %5 imento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminde son uygulanan yükte (200 kPa) toplam deformasyonun büyüklüğü 186,4 mm'dir. %5 imento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %1,74; %4,15; %5,63 ve %6,33 düşmüştür. %10 imento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %3,1; %7,55; %10,2 ve %11,6 düşmüştür. %10 imento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminin %5'ine kıyasla zemin taşıma kapasitesinin yüksek değeriinden dolayı toplam deformasyon değeri daha az olmuştur. %15 imento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %5,44; %13,3; %18 ve %20,6 düşmüştür. 200 kPa yknda %15 imento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemin için toplam deformasyon değeri (158 mm), %5 (186,4 mm) ve %10 (176 mm) imento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemine göre daha az çıkmıştır. EK B.2 Sönümsüz olarak Upland deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar.

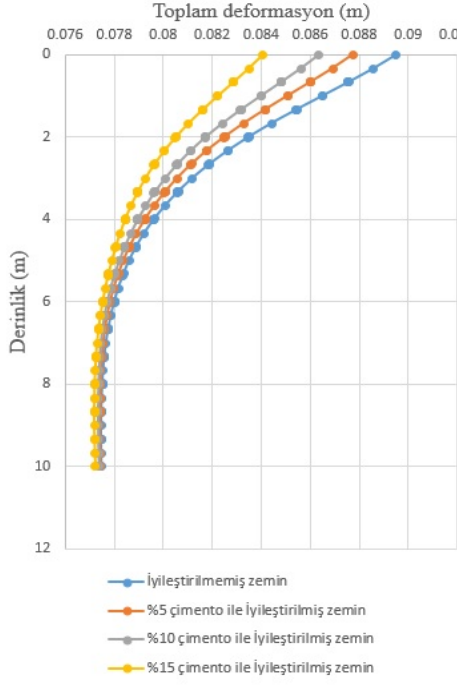
Çizelge 10. Dinamik analizde Upland deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (Sönümsüz)

Yük (kPa)	Kumlu killi zemin (mm)	Kumlu killi zemin + %5 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %10 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %15 çimento (mm)	% olarak azalma
50	91,02	89,44	1,74	88,20	3,1	86,07	5,44
100	120,6	115,6	4,15	111,5	7,55	104,6	13,3
150	158,1	149,2	5,63	142	10,2	129,6	18
200	199	186,4	6,33	176	11,6	158	20,6

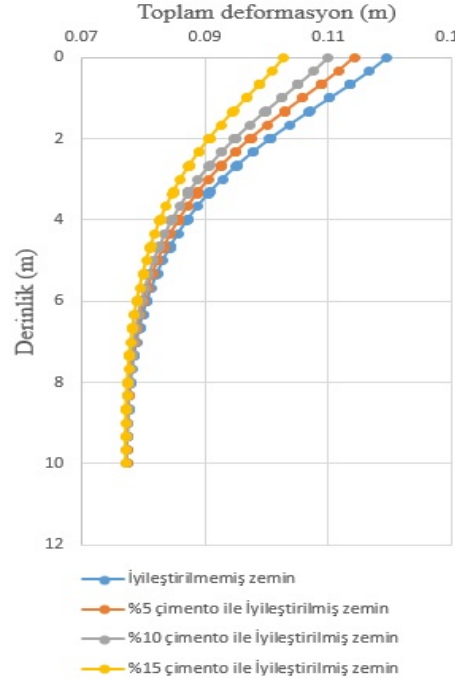


Şekil 28. Dinamik analizde Upland deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (Sönümsüz)

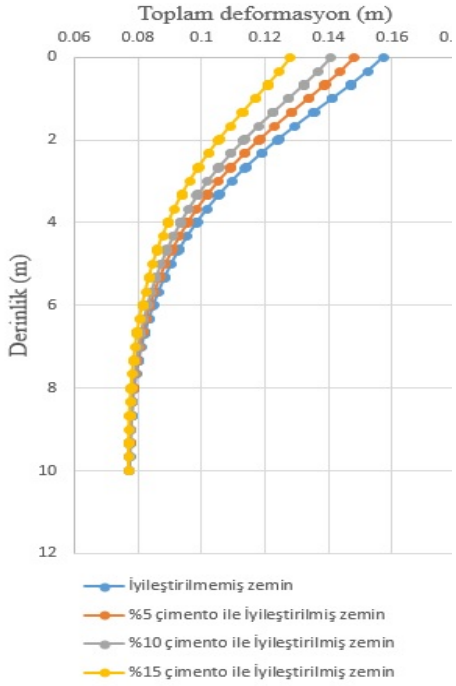
Şekil 27'de sönümsüz zeminde Upland deprem kaydı kullanarak tüm şekillerde deformasyon derinlikle azalttığını fark edilmektedir. Yeryüzünde en düşük deformasyonu %15 çimento zemin vermiş olup maksimum deformasyonu iyileştirilmemiş zemin vermektedir. Yük artışıyla beraber yeryüzündeki deformasyonu artmaktadır.



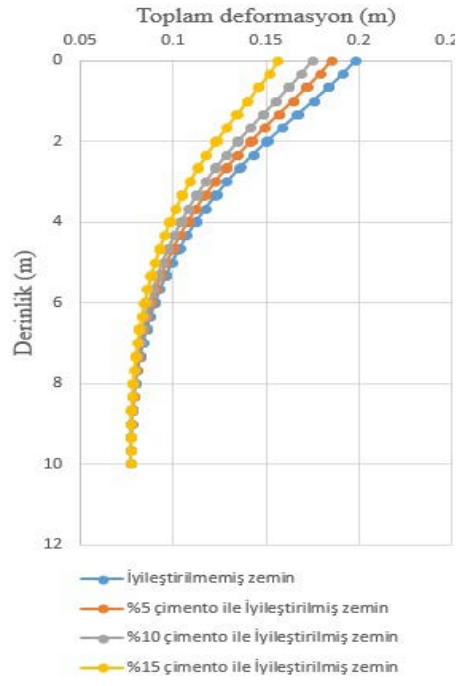
a



b



c



d

Şekil 29. Upland deprem ve farklı yükler altında farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonunun karşılaştırması (Sönümsüz) a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

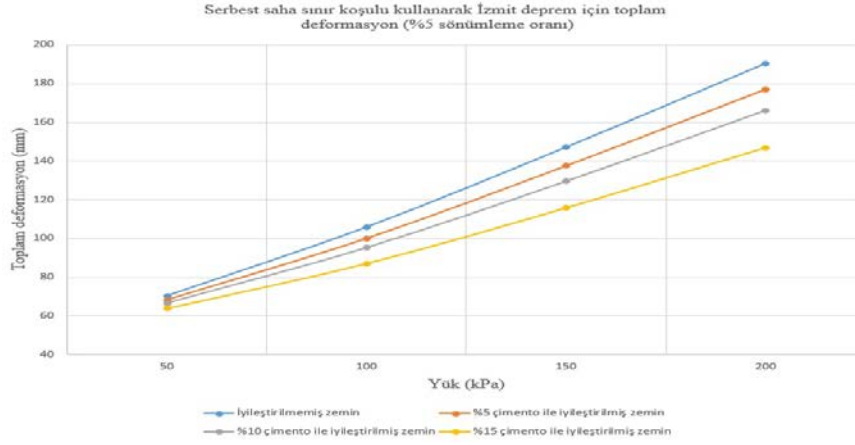
K. Sönümlenme Oranı %5 Olduğunda Serbest Saha Sınır Koşulundan Elde Edilen Toplam Yer Değıştirmesinin Sonuçları.

1. İzmit Depremden Gelen Sonuçlar

Şekil 28 ve Çizelge 11, Dinamik analizde Serbest saha sınır koşulu kullanarak zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sismik yükün yanı sıra 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa farklı yükleme aralıkları iyileştirilmemiş kumlu killi zeminden elde edilen toplam deformasyon sırasıyla 70,25 mm, 105,8 mm, 147,1 mm ve 190,4 mm'dir. Sonuç, kumlu killi zemin için sismik yükü altında sürşarj yükü arttıkça deformasyonun arttığını ortaya koymuştur. %5 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminde son uygulanan yükte (200 kPa) toplam deformasyonun büyüklüğü 177,1 mm'dir. %5 çimento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %2,92; %5,5; %6,53 ve %7 düşmüştür. %10 çimento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %5,3; %10; %12 ve %12,8 düşmüştür. %10 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminin %5'ine kıyasla zemin taşıma kapasitesinin yüksek değerinden dolayı toplam deformasyon değerleri daha az olmuştur. %15 çimento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %9,2; %17,7; %21,3 ve %23 düşmüştür. 200 kPa yükünde %15 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemin için toplam deformasyon değeri (146,9 mm), %5 (177,1 mm) ve %10 (166,1 mm) çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemine göre daha az çıkmıştır. EK B.3 %5 sönümlü olarak İzmit deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar.

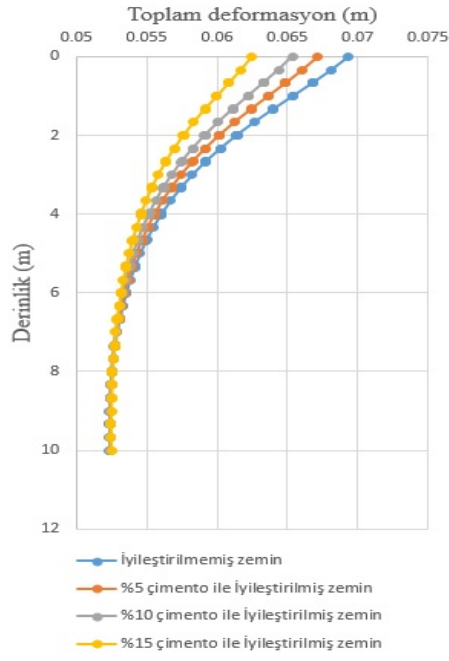
Çizelge 11. Dinamik analizde İzmit deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (%5 Sönümlleme oranı)

Yük (kPa)	Kumlu killi zemin (mm)	Kumlu killi zemin + %5 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %10 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %15 çimento (mm)	% olarak azalma
50	70,25	68,20	2,92	66,53	5,3	63,81	9,2
100	105,8	99,99	5,5	95,19	10	87,06	17,7
150	147,1	137,5	6,53	129,5	12	115,8	21,3
200	190,4	177,1	7	166,1	12,8	146,9	23

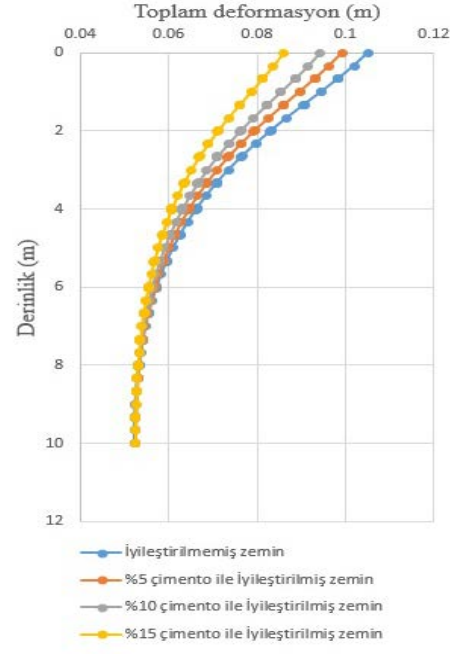


Şekil 30. Dinamik analizde İzmit deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (%5 Sönümlleme oranı)

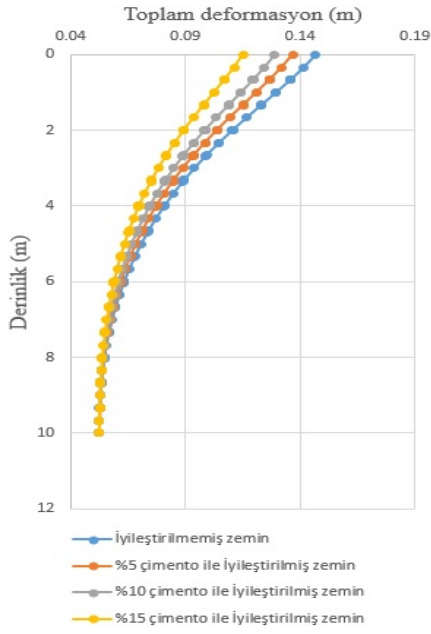
Şekil 29'da %5 sönümlü zeminde İzmit deprem kaydı kullanarak tüm şekillerde deformasyon derinlikle azalttığını fark edilmektedir. Yeryüzünde en düşük deformasyonu %15 çimento zemin vermiş olup maksimum deformasyonu iyileştirilmemiş zemin vermektedir. Yük artışıyla beraber yeryüzündeki deformasyonu artmaktadır.



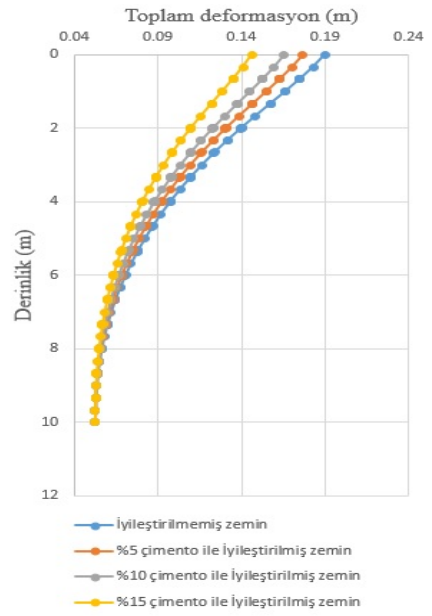
a



b



c



d

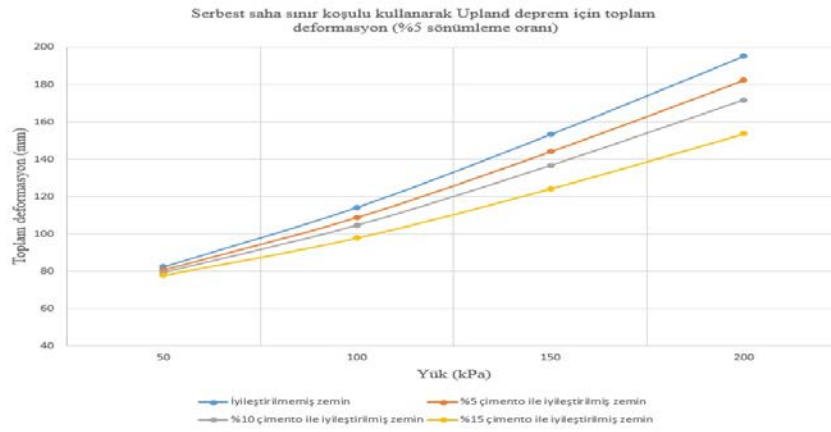
Şekil 31. İzmit deprem ve farklı yükler altında farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonunun karşılaştırması (%5 sönümlenme oranı) a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

2. Upland depremden gelen sonuçlar

Şekil 30 ve Çizelge 12, Dinamik analizde Serbest saha sınır koşulu kullanarak zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sismik yükün yanı sıra 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa farklı yükleme aralıkları iyileştirilmemiş kumlu killi zeminden elde edilen toplam deformasyon sırasıyla 82,41 mm, 114,3 mm, 153,3 mm ve 195,2 mm'dir. Sonuç, kumlu killi zemin için sismik yükü altında sürşarj yükü arttıkça deformasyonun arttığını ortaya koymuştur. %5 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminde son uygulanan yükte (200 kPa) toplam deformasyonun büyüklüğü 182,4 mm'dir. %5 çimento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %2,1; %5; %6 ve %6,6 düşmüştür. %10 çimento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %4; %8,5; %11 ve %12 düşmüştür. %10 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminin %5'ine kıyasla zemin taşıma kapasitesinin yüksek değerinden dolayı toplam deformasyon değerleri daha az olmuştur. %15 çimento ile iyileştirilmiş zemin, iyileştirilmemiş zemine göre farklı yükler altında toplam deformasyon sırasıyla %5,5; %14,4; %19 ve %21,3 düşmüştür. 200 kPa yükünde %15 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemin için toplam deformasyon değeri (153,6 mm), %5 (182,4 mm) ve %10 (171,7 mm) çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemine göre daha az çıkmıştır. EK B.4 %5 sönümlü olarak Upland deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar.

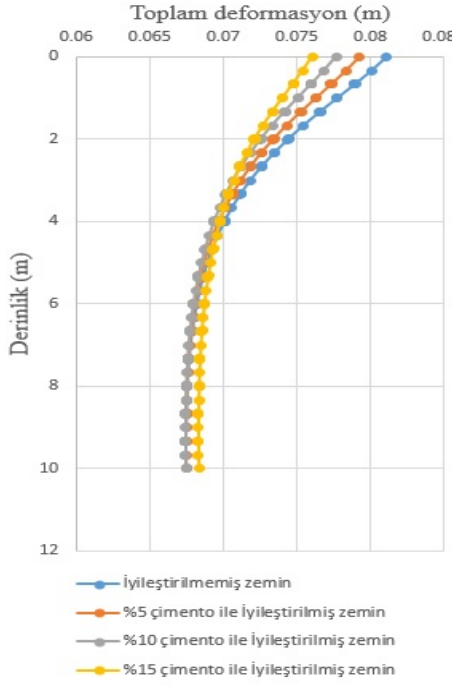
Çizelge 12. Dinamik analizde Upland deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (%5 Sönümlleme oranı)

Yük (kPa)	Kumlu killi zemin (mm)	Kumlu killi zemin + %5 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %10 çimento (mm)	% olarak azalma	Kumlu killi zemin + %15 çimento (mm)	% olarak azalma
50	82,41	80,71	2,1	79,32	4	77,88	5,5
100	114,3	108,9	5	104,6	8,5	97,88	14,4
150	153,3	144,1	6	136,6	11	124,2	19
200	195,2	182,4	6,6	171,7	12	153,6	21,3

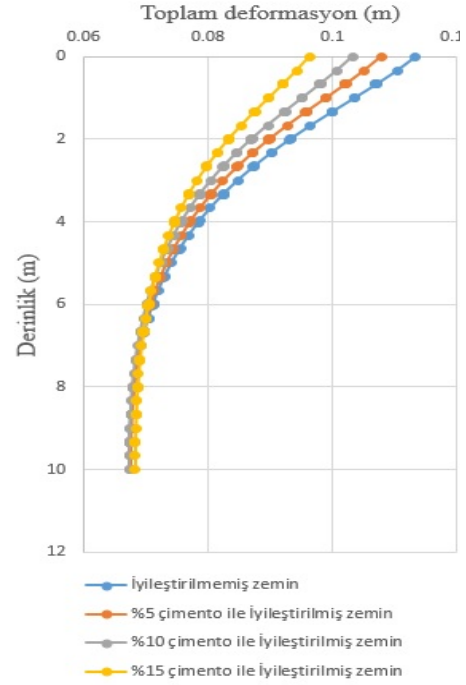


Şekil 32. Dinamik analizde Upland deprem için zeminde farklı yükler ile toplam deformasyon arasındaki ilişki (%5 Sönümlleme oranı)

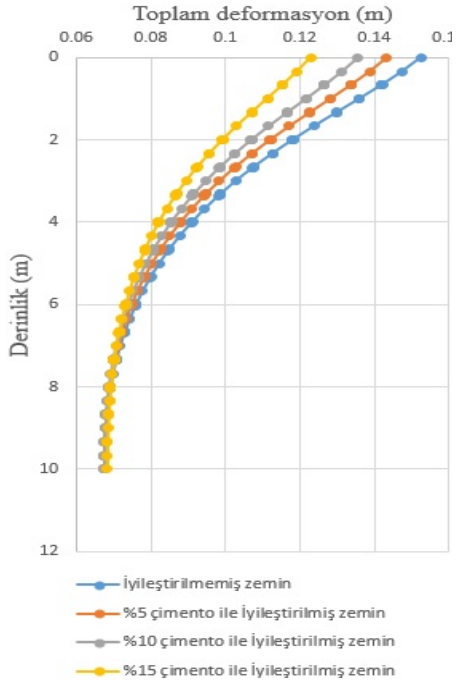
Şekil 31'de %5 sönümlü zeminde Upland deprem kaydı kullanarak tüm şekillerde deformasyon derinlikle azalttığını fark edilmektedir. Yeryüzünde en düşük deformasyonu %15 çimento zemin vermiş olup maksimum deformasyonu iyileştirilmemiş zemin vermektedir. Yük artışıyla beraber yeryüzündeki deformasyonu artmaktadır.



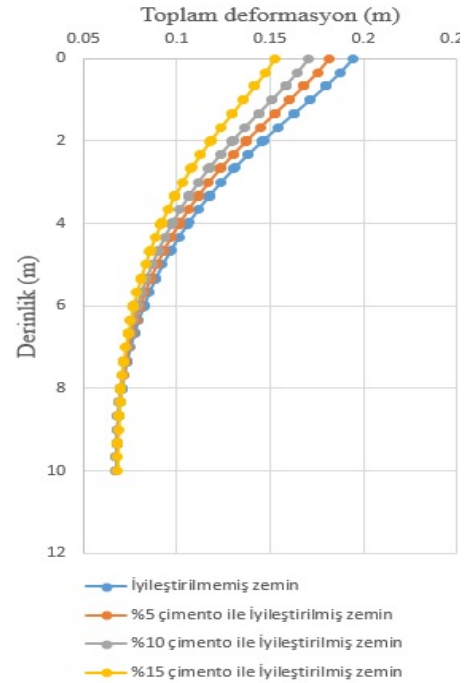
a



b



c



d

Şekil 33. Upland deprem ve farklı yükler altında farklı çimento oranları ile iyileştirilmiş zeminin toplam deformasyonunun karşılaştırması (%5 sönümleme oranı) a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

L. Tek Boyutlu Zemin Tepki Analizi

PLAXIS'teki Zemin tepki özelliği, dinamik bir hesaplamadan önce 1 Boyutlu Zemin tepki analizi gerçekleştirilmek için kullanılmaktadır. Bir zemin tabakasının zemin tepki analizi, yapının dinamik analizi için gerekli bir ön çalışma olarak kabul edilebilmektedir, çünkü yapının sismik tepkisi destekleyici zeminin geoteknik özelliklerinden etkilenmektedir. Zemin tepki analizi, hem standart hem de kullanıcı tanımlı modeller olmak üzere herhangi bir zemin modeli için çalışmaktadır.

Depremler, ana kayadan yüzeye, bir filtre görevi gören ve yer hareketi özelliklerini değiştiren üstteki zemin birikintisi yoluyla yayılmaktadır. Sismik dalgaların herhangi bir derinlikte genlik, süre ve frekans içeriği açısından değişimi, bir zemin tepkisi analizi ile değerlendirilebilmektedir. Yerel zemin stratigrafisi, malzeme özellikleri, saha topografyası, yeraltı suyu tablası derinliği ve deprem (örneğin, süre, en yüksek ivme, frekans içeriği) zemin tepkisi ve modelleme stratejisi üzerinde yüksek etkiye sahiptir.

Filtre etkisinden dolayı, zemin birikintisi sismik dalgaları, sinyali bazı belirli frekanslarda yükselterek ve bazılarında sönümleyerek değiştirmektedir.

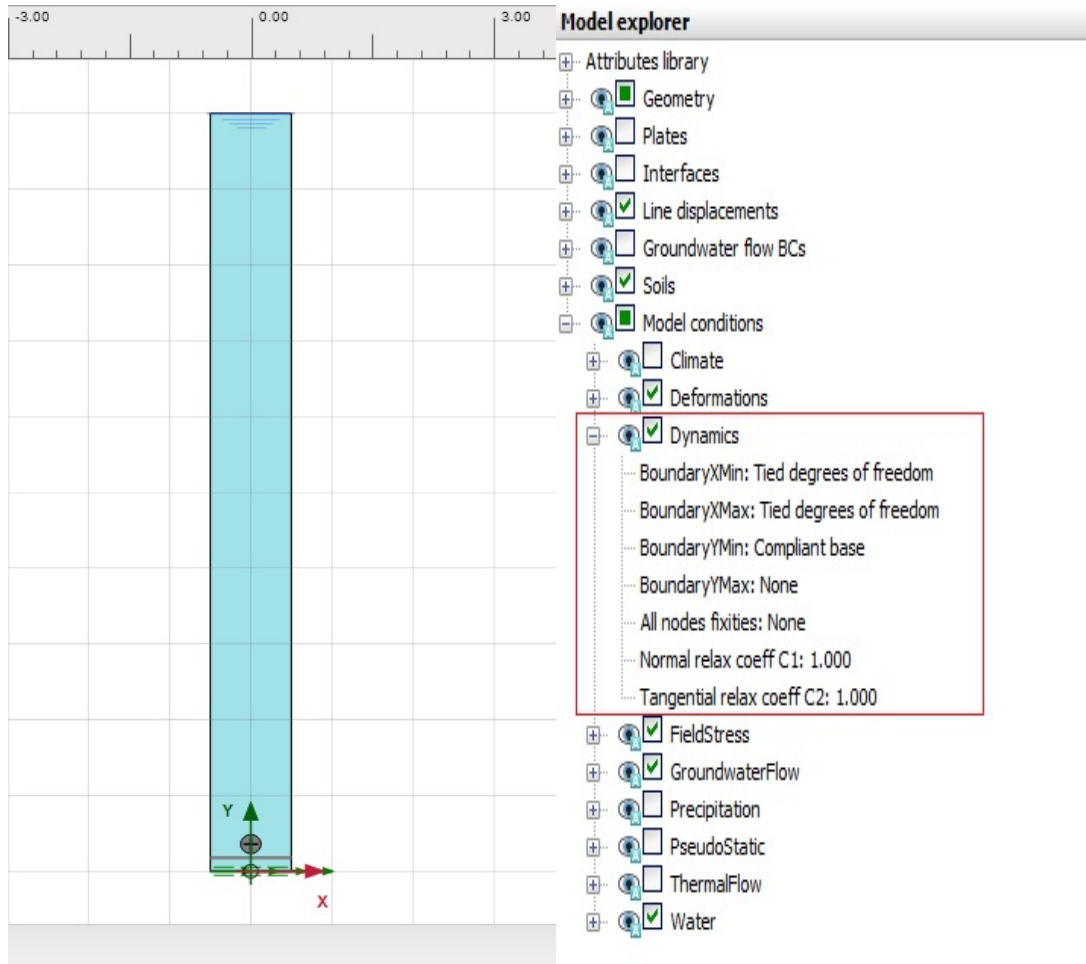
Yer hareketinin maksimum amplifikasyonunun meydana geldiği frekans, üstteki yapının doğal frekansına yakınsa, bina ve yer hareketi birbiriyle rezonans halindedir. Bu, sistemin binada büyük hasarlara neden olabilecek çok yüksek genliklerle salınması anlamına gelmektedir.

Belirli bir saha için, olabilecek tüm olası sismik olayları belirlemek için olasılıksal bir çalışma gereklidir.

Tek boyutlu analiz, zemin katmanları ve ana kaya yüzeyi yatay olduğunda ve sonsuza kadar uzandığında ve sismik dalgalar, alttaki ana kayadan dikey olarak yayılan kayma dalgaları ile çakıştığında yapılabilmektedir. Bu son varsayım, deprem kaynağından zemine yayılan sismik dalgaların, ardışık kırılmalarla neredeyse dikey bir yola (Snell'in kırılma yasasına göre) büküldüğü göz önüne alındığında doğrulanabilmektedir.

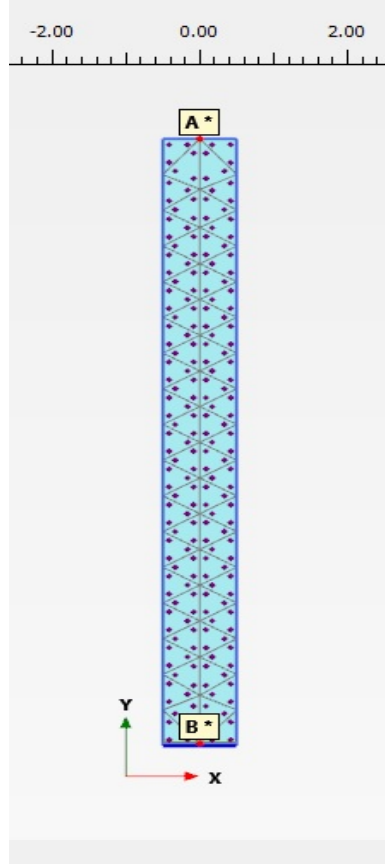
Bağlı serbestlik derecesi yalnızca yanal sınırlar için mevcuttur (yani, x_{min} ve x_{max}). Bu seçenek, sol ve sağ model sınırlarında aynı yükseklikteki

düğümleri, aynı dikey ve yatay yer değiştirme ile karakterize edilecek şekilde birbirine bağlamaktadır. Bu seçenek, bir zemin tepki analizi gerçekleştirmek üzere tek boyutlu bir zemin kolonu modellemek için seçilebilmektedir. Bu seçenek dikey model sınırlarından biri için seçilirse, diğer dikey model sınırı için de seçilmelidir. Bağlı serbestlik dereceleri yalnızca sınırlar serbestçe hareket ettiğinde çalışmaktadır, yani dikey sınırlara hiçbir sabitlik uygulanmamalıdır. Şekil 32 Tek boyutlu PLAXIS modelinin genişliği 1 m (-0,5 m ila 0,5 m arasında) ve Bağlı serbestlik derecesi sınır koşulu göstermektedir.



Şekil 34. Tek boyutlu PLAXIS modeli (solda) ve Bağlı serbestlik derecesi sınır koşulu (sağda)

Zemin parametreleri bölüm 4.3'de verildiği gibi kullanılmaktadır. Sonucu gözlemlemek için oluşturulan ağdan biri ana kaya seviyesinde ve diğeri yüzeyde olmak üzere iki düğüm seçilmektedir. Şekil 33 Seçilen düğümler ile oluşturulan ağ göstermektedir. Çizelge 13 Seçilen düğümlerin koordinatlarını göstermektedir.



Şekil 35. Seçilen düğümlerle oluşturulan ağ

Çizelge 13. Seçilen düğümlerin koordinatları

Düğümler	Koordinat	Konum
A	(0,10)	Yüzey seviyesi
B	(0,0)	Zemin tabakasının alt kısmında

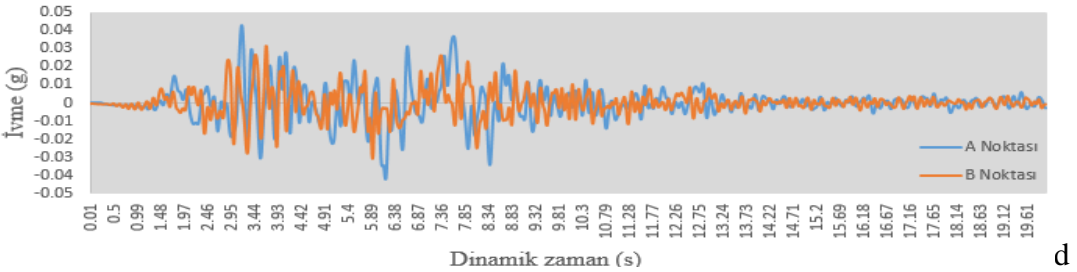
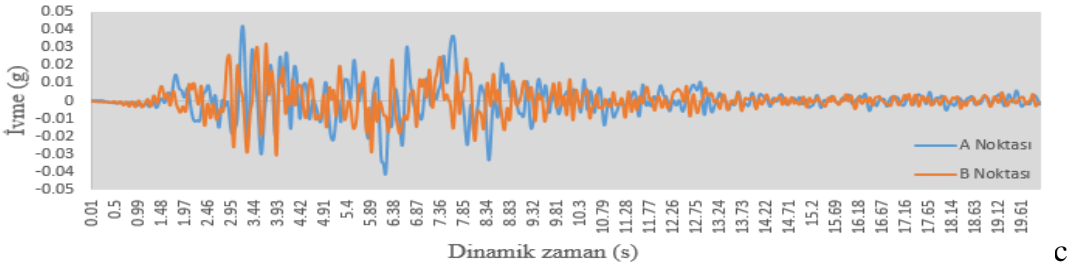
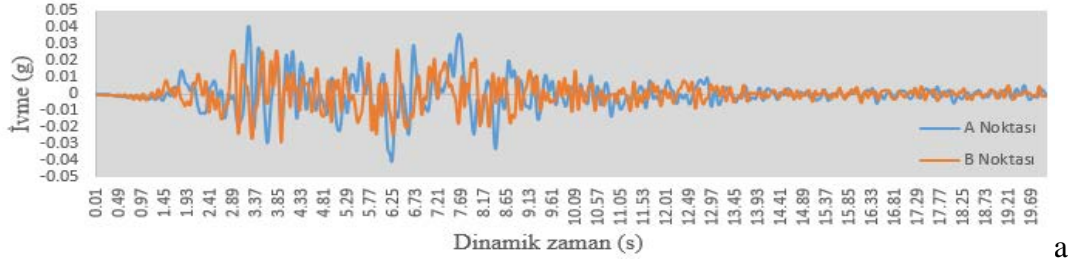
İzmit deprem için ana kaya seviyesinde (B noktasında giriş hareketi) ve yüzeydeki bir noktada (A) elde edilen ivme kaydı. Şekil 34'den, giriş ivmesinin katmanın yüzeyine çarptığında arttığı görülmektedir.

- İyileştirilmemiş zeminde giriş hareketinin maksimum ivmesi ana kayada 0,029 g iken, yüzeyde 0,041 g'ye yükseltilmektedir.
- %5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde giriş hareketinin maksimum ivmesi ana kayada 0,032 g iken, yüzeyde 0,0418 g'ye yükseltilmektedir.
- %10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde giriş hareketinin maksimum ivmesi ana kayada 0,0324 g iken, yüzeyde 0,042 g'ye yükseltilmektedir.

- %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde giriş hareketinin maksimum ivmesi ana kayada 0,0315 g iken, yüzeyde 0,043 g'ye yükseltilmektedir.

Bu, sinyalin giriş sinyalinden 1.3 kat daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Site amplifikasyon faktörü şu şekilde hesaplanabilmektedir:

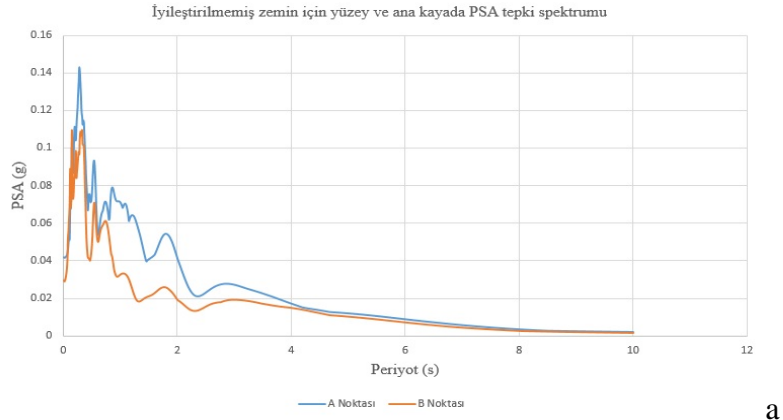
$$\text{Amplifikasyon faktörü} = \frac{\text{pik yüzey ivmesi}}{\text{pik yer ivmesi}} = \frac{a_{\text{max}}(H,t)}{a_{\text{max}}(0,t)}$$



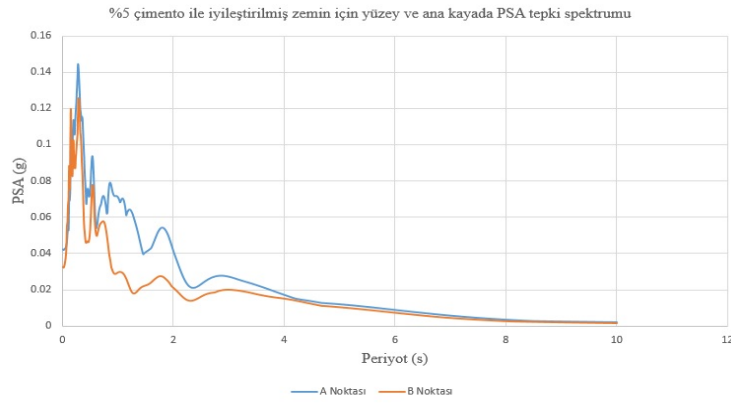
Şekil 36. İzmit deprem için zeminde İvme ile Dinamik zaman arasındaki ilişki a-) İyileştirilmemiş zemin b-) %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin c-) %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin d-) %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin

Şekil 35 İzmit deprem için A ve B noktasında pik spektral ivme tepki spektrumunu göstermektedir. Bu pik ivme tepki spektrumunu, betonarme yapılar için yaygın olan sönümün %5'i içindir.

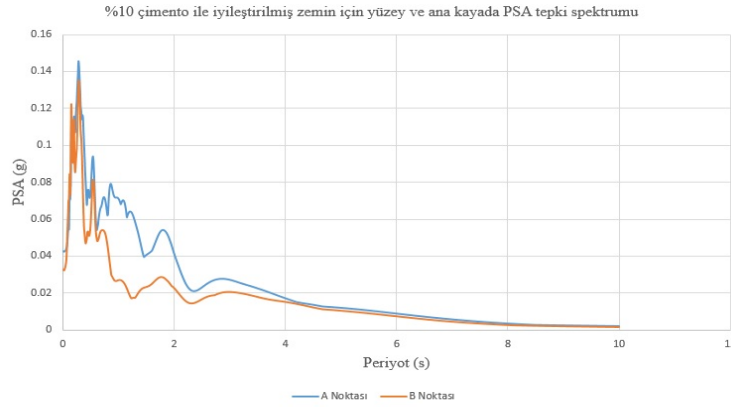
- İyileştirilmemiş zeminde pik spektral ivme tepki spektrumunu, yüzeyde (A noktası) meydana gelen maksimum ivmenin 0,28 s periyodunda 0,143 g, ana kayada (B noktası) ise 0,33 s periyodunda 0,109 g olduğunu göstermektedir.
- %5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde pik spektral ivme tepki spektrumunu, yüzeyde (A noktası) meydana gelen maksimum ivmenin 0,28 s periyodunda 0,144 g, ana kayada (B noktası) ise 0,29 s periyodunda 0,126 g olduğunu göstermektedir.
- %10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde Pik spektral ivme tepki spektrumunu, yüzeyde (A noktası) meydana gelen maksimum ivmenin 0,28 s periyodunda 0,145 g, ana kayada (B noktası) ise 0,29 s periyodunda 0,135 g olduğunu göstermektedir.
- %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde Pik spektral ivme tepki spektrumunu, yüzeyde (A noktası) meydana gelen maksimum ivmenin 0,28 s periyodunda 0,147 g, ana kayada (B noktası) ise 0,27 s periyodunda 0,132 g olduğunu göstermektedir.



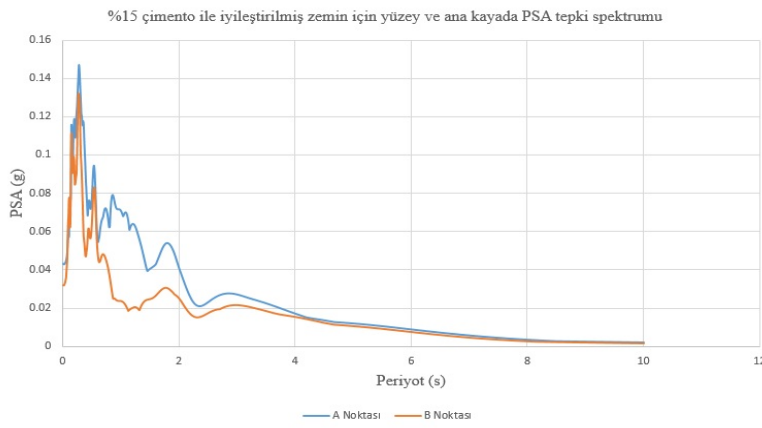
a



b



c



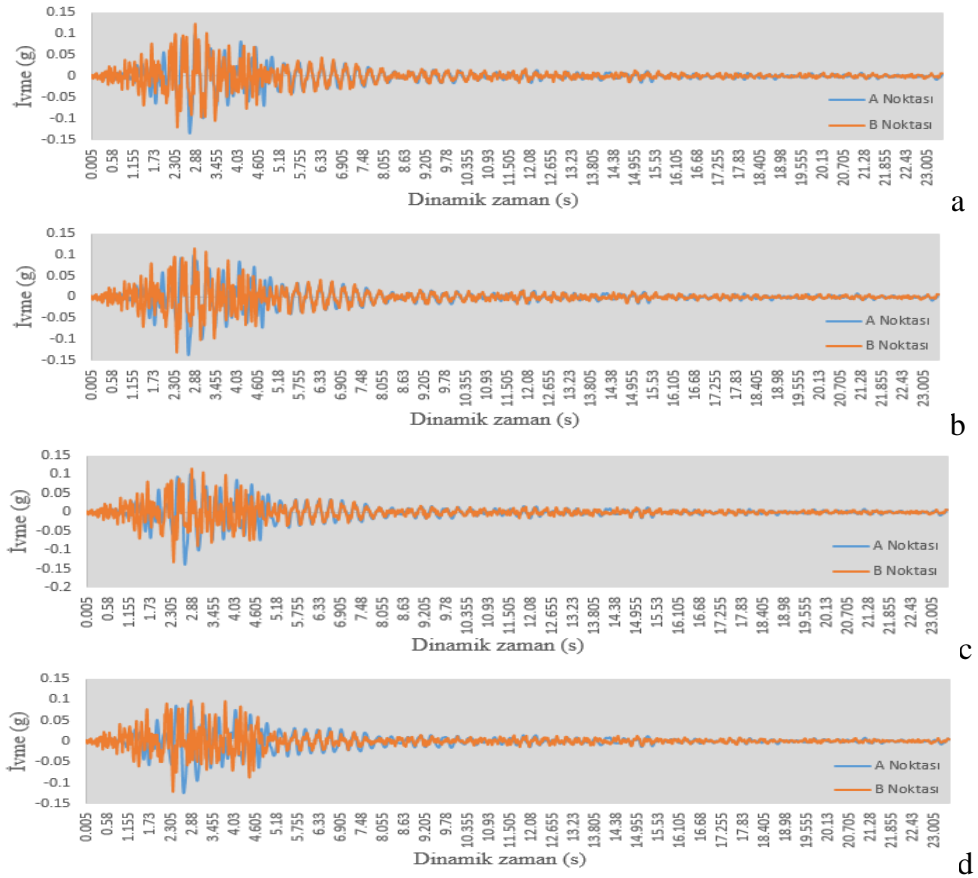
d

Şekil 37. İzmit deprem için A ve B noktasında Pik spektral ivme tepki spektrumu a-) İyileştirilmemiş zemin b-) %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin c-) %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin d-) %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin

Upland deprem için ana kaya seviyesinde (B noktasında giriş hareketi) ve yüzeydeki bir noktada (A) elde edilen ivme kaydı. Şekil 36'dan, giriş ivmesinin katmanın yüzeyine çarptığında arttığı görülmektedir.

- İyileştirilmemiş zeminde giriş hareketinin maksimum ivmesi ana kayada 0,123 g iken, yüzeyde 0,134 g'ye yükseltilmektedir.
- %5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde giriş hareketinin maksimum ivmesi ana kayada 0,132 g iken, yüzeyde 0,136 g'ye yükseltilmektedir.
- %10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde giriş hareketinin maksimum ivmesi ana kayada 0,133 g iken, yüzeyde 0,138 g'ye yükseltilmektedir.
- %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde giriş hareketinin maksimum ivmesi ana kayada 0,123 g iken, yüzeyde 0,125 g'ye yükseltilmektedir.

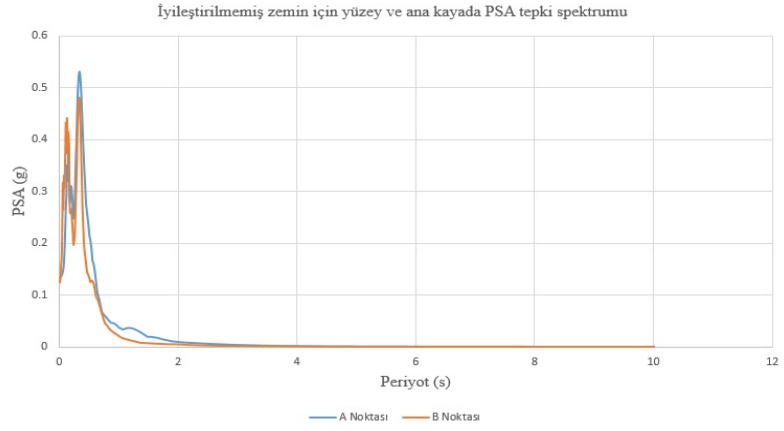
Bu, sinyalin giriş sinyalinden 1 kat daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



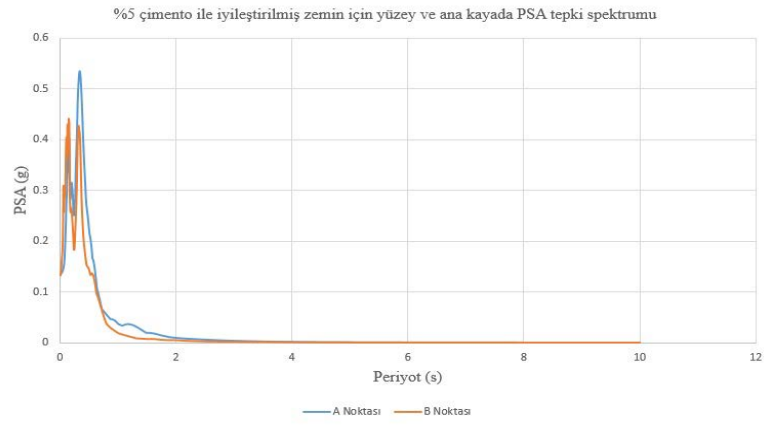
Şekil 38. Upland deprem için zeminde İvme ile Dinamik zaman arasındaki ilişki a-) İyileştirilmemiş zemin b-) %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin c-) %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin d-) %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin

Şekil 37 Upland deprem için A ve B noktasında pik spektral ivme tepki spektrumu göstermektedir.

- İyileştirilmemiş zeminde pik spektral ivme tepki spektrumu, yüzeyde (A noktası) meydana gelen maksimum ivmenin 0,34 s periyodunda 0,53 g, ana kayada (B noktası) ise 0,34 s periyodunda 0,481 g olduğunu göstermektedir.
- %5 çimento ile iyileştirilmiş zeminde pik spektral ivme tepki spektrumu, yüzeyde (A noktası) meydana gelen maksimum ivmenin 0,34 s periyodunda 0,535 g, ana kayada (B noktası) ise 0,15 s periyodunda 0,441 g olduğunu göstermektedir.
- %10 çimento ile iyileştirilmiş zeminde pik spektral ivme tepki spektrumu, yüzeyde (A noktası) meydana gelen maksimum ivmenin 0,34 s periyodunda 0,538 g, ana kayada (B noktası) ise 0,14 s periyodunda 0,423 g olduğunu göstermektedir.
- %15 çimento ile iyileştirilmiş zeminde pik spektral ivme tepki spektrumu, yüzeyde (A noktası) meydana gelen maksimum ivmenin 0,34 s periyodunda 0,517 g, ana kayada (B noktası) ise 0,14 s periyodunda 0,422 g olduğunu göstermektedir.



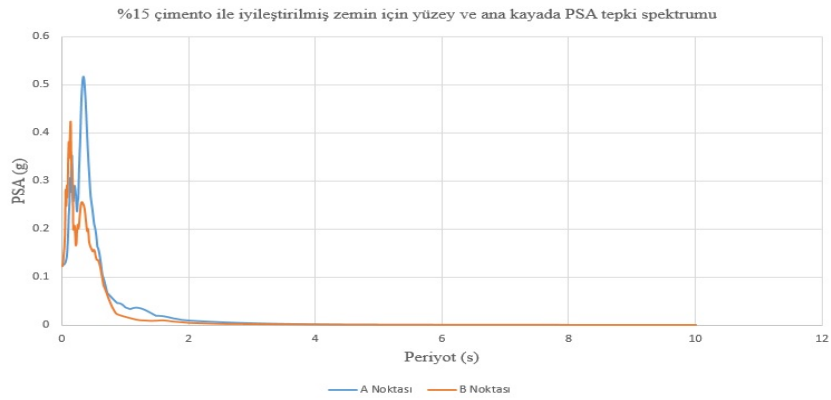
a



b



c



d

Şekil 39. Upland deprem için A ve B noktasında Pik spektral ivme tepki spektrumu
a-) İyileştirilmemiş zemin b-) %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin c-) %10 çimento
ile İyileştirilmiş zemin d-) %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin

V.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde bu çalışmanın sonuçları ve amaçları açıklanacaktır.

Bu Araştırma çalışmasında, farklı oranlarda çimento ile iyileştirilmiş ve farklı yüklere maruz kalan kumlu killi zemin, Mohr-Coulomb modelinde bulunan (Elastisite modülü, Kohezyon faktörü, Poisson oranı, İçsel sürtünme açısı ve Dilatasyon açısı) gibi farklı mühendislik parametreleri kullanarak incelenmiştir. Statik ve dinamik analizlerden elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki açıklamalar yapılabilir:

- **Statik analizde**

Geoteknik mühendisliğinde oturma, zeminin yüzeyine aşırı bir yük uygulandığında, içindeki gerilmelerdeki değişiklikler nedeniyle zeminin veya toprağın aşağı doğru dikey hareketi olarak tanımlanmaktadır. Oturma, zemin koşullarına ve hareketin nedenine bağlı olarak, bir yük uygulandıktan hemen sonra veya yıllar sonra meydana gelebilmektedir. Aşırı yer hareketleri, köprüler ve tünellerden yol kaplamaları ve demiryollarına kadar binalarda, yapılarda ve ulaşım altyapısında hasara neden olmaktadır. Zemin modelinin analiz sonuçlarına göre :

200 kPa yükteki iyileştirilmemiş kumlu killi zeminde görülen oturma, konsolidasyon ve plastik analiz için sırasıyla 109 mm ve 182,7 mm'dir. %5 çimento ile iyileştirilmiş zemin için, 200 kPa yükteki toplam oturmanın büyüklüğü, iyileştirilmemiş kumlu killi zemine kıyasla konsolidasyon ve plastik analiz için sırasıyla 99,31 mm ve 168,8 mm düşmüştür. %10 Çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemin, %5 çimento ile iyileştirilmiş zemine göre daha düşük oturma değerlerine sahip olmuştur. %15 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminin toplam oturmasının değeri , konsolidasyon ve plastik analiz için sırasıyla 78,04 mm ve 136,6 mm düşmüştür. Statik yüklerden kaynaklanan toplam deformasyonunda, %15 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zemin, iyileştirilmemiş zemine göre konsolidasyon ve plastik hesap tipi için sırasıyla

%28 ve %25 daha az oturma göstermiştir. Sonuçları göre, %15 Çimento ile stabilize edilmiş kumlu killi zemin, %5 ve %10 çimento ile stabilize edilmiş zemininden daha düşük oturma değerlerine sahiptir. İyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş kumlu killi zeminin taşıma kapasitesinde büyük bir fark vardır. %15 çimento ile kumlu killi zeminin iyileştirilmesinin oturmayı daha da iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu da çimento oranı arttıkça oturma değerinin düştüğünü göstermektedir. Ayrıca, zemin tabakasının derinliği arttıkça oturma yoğunluğu azalmaktadır. Çimento ile iyileştirilmiş ve çimento ile iyileştirilmemiş zemin için yük arttıkça oturmalar artmaktadır. Plastik hesabında oturma değeri konsolidasyon oturmasına göre daha yüksek çıkmıştır. Buradan, konsolidasyon oturması , plastik oturmaya göre zamana bağlı olduğu için killi zeminlerde daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu sonuçların doğrultusunda gelecekte oturmayı önlemek ve temelde bölgesel oturmayı azaltmak için inşaattan önce oturma analizleri yapmaktadır.

- **Dinamik analizde**

Zeminin dinamik bir yük altındaki davranışı, zemin üzerine inşa edilen herhangi bir bina için kritik öneme sahiptir. Dinamik yükler esas olarak depremlerden, ağır makinelerin çalışmasından, patlamalardan ve dalga veya rüzgar kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Zeminlerin dinamik davranışını anlamak, deprem yükleri altında herhangi bir yapısal veya zemin göçmesini önlemek için kritik öneme sahiptir. Zemin modelinin dinamik analiz sonuçlarına göre :

İzmit deprem için 200 kPa yükteki iyileştirilmemiş kumlu killi zeminde görülen toplam deformasyon, sönümsüz ve sönümlü zemin için sırasıyla 192,7 mm ve 190,4 mm'dir. %5 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminde son uygulanan yükte (200 kPa) toplam deformasyonun büyüklüğü sönümsüz zemin için 179,7 mm ve sönümlü zemin için 177,1 mm'dir. %5 çimento oranında toplam deformasyon değerinin iyileştirilmemiş zemine kıyasla sönümsüz zemin için %6,75 ve sönümlü zemin için %7 düştüğünü gözlemlenmektedir. %10 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminin %5'ine kıyasla zemin taşıma kapasitesinin yüksek değerinden dolayı toplam deformasyon değerleri daha az olmuştur. %15 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminin toplam deformasyonun değeri , sönümsüz ve sönümlü zemin için sırasıyla 150 mm ve 146,9 mm düşmüştür. %15

çimento oranında toplam deformasyon değerinin iyileştirilmemiş zemine kıyasla sönümsüz zemin için %22,2 ve sönümlü zemin için %23 düştüğünü gözlemlenmektedir.

Upland deprem için 200 kPa yükteki iyileştirilmemiş kumlu killi zeminde görülen toplam deformasyon, sönümsüz ve sönümlü zemin için sırasıyla 199 mm ve 195,2 mm'dir. %5 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminde son uygulanan yükte (200 kPa) toplam deformasyonun büyüklüğü sönümsüz zemin için 186,4 mm ve sönümlü zemin için 182,4 mm'dir. %5 çimento oranında toplam deformasyon değerinin iyileştirilmemiş zemine kıyasla sönümsüz zemin için %6,33 ve sönümlü zemin için %6,6 düştüğünü gözlemlenmektedir. %10 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminin %5'ine kıyasla zemin taşıma kapasitesinin yüksek değerinden dolayı toplam deformasyon değerleri daha az olmuştur. %15 çimento ile iyileştirilmiş kumlu killi zeminin toplam deformasyonun değeri , sönümsüz ve sönümlü zemin için sırasıyla 158 mm ve 153,6 mm düşmüştür. %15 çimento oranında toplam deformasyon değerinin iyileştirilmemiş zemine kıyasla sönümsüz zemin için %20,6 ve sönümlü zemin için %21,3 düştüğünü gözlemlenmektedir.

Sönümlü zeminin toplam deformasyon değerlerinin sönümsüz zemine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu, zeminin deformasyonu hesaplanırken sönüm değerlerinin girilmesinin önemini göstermektedir. İzmit depreminin büyüklüğünün (7,6 Mw) Upland depreminin büyüklüğünden (5,7 Mw) daha yüksek olmasına rağmen, Upland depreminden elde edilen toplam deformasyon değerlerinin İzmit depreminden elde edilen deformasyon değerlerinden daha yüksek olduğu fark etmektedir. Bunun nedeni, zemin özelliklerini etkileyen (Deprem derinliği, PGA, PGV) gibi birçok farklı parametreden kaynaklanmaktadır.

- **Tek Boyutlu Zemin Tepki Analizde**

Zemin tepki analizini gerçekleştirmek için, PLAXIS'in ayarları ve sınır koşulları ile birlikte kullanımına ilişkin çeşitli Araştırmalar yapılmıştır. Bu kısım için SeismoSignal yazılımı kullanılmış, İzmit ve Upland deprem sinyali 10 m derinlikte girdi olarak ölçülmüştür. Temel sınır koşulunu belirlemek için PLAXIS'te Mohr-Coulomb modeli benimsenmiştir. Ölçülen dalgalar yukarı ve

aşağı hareket dalgaları içerdiğinden, PLAXIS'te sinyal üzerinde 0,5'lik bir faktör ile uyumlu bir temel (compliant base) sınır koşullarının kullanılması tavsiye edilmektedir, ancak projede sadece yukarı hareket uygulanmalıdır. Yukarı hareketin ölçülen toplam sinyalin yarısı olduğunu varsayılmaktadır. İzmit depreminde %15 çimento ile iyileştirilmiş zemin profili için, 10 m derinlikteki 0,0315 g'lık maksimum ivme, yer seviyesinde yaklaşık 0,043 g'lık bir ivmeyle sonuçlanacaktır. Upland depreminde %15 çimento ile iyileştirilmiş zemin profili için, 10 m derinlikteki 0,123 g'lık maksimum ivme, yer seviyesinde yaklaşık 0,125 g'lık bir ivmeyle sonuçlanacaktır. Zeminin titreşim frekansı ile binanın öz frekansı aynı ise bu duruma bina rezonansı denmektedir. Binayı titreştiren kuvvet aynı yönde olacağından, aynı yöndeki iki kuvvetin toplamı büyüyeceğinden binanın titreşim genliği artacak, daha çok sallanacak dolayısıyla ivmesi artacaktır. Zemin profilinde ilerleyen sismik dalgalar, sert kayada yumuşak zemine göre daha hızlı hareket etmektedir - dalgalar sert zeminden yumuşak zemine geçerken, genlikleri (veya boyutları) artmaktadır. Kısacası, zemin ne kadar yumuşak ve kalınsa, bir depremin ürettiği dalgaların sallanması veya büyümesi o kadar büyük olmaktadır. Deprem dalgasının yukarı doğru hareket ettikçe amplifikasyonu nedeniyle, zemin yüzeyindeki bir noktadaki maksimum ivme değerlerinin, kayalar üzerindeki bir noktadaki ivme değerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Kayma dalgası hızındaki artışla birlikte PSA değerinin arttığı analizden açıkça görülmektedir.

Gelecek araştırmalarda sismik yükün binalar üzerindeki etkisini incelemek ve serbest titreşim analizi yapabilmek için yükler yerine binaların modellenmesi önerilmektedir.

VI. KAYNAKLAR

KİTAPLAR

BRİNGREVE, R. B. J., KUMARSWAMY, S., SWOLFS, W. M., ZAMPICH, L., & MANOJ, N. R. (2019). **PLAXIS 2D Reference Manual CONNECT Edition V20**. Plaxis.

NELSON, J. D., CHAO, K. C., OVERTON, D. D., & NELSON, E. J. (2015). **Foundation Engineering for Expansive Soils**, John Wiley & Sons, Inc, 1. Baskı.

PAUDEL, E., DOSSA, G. G. O., DE BLÉCOURT, M., BECKSCHÄFER, P., XU, J., & D. HARRISON, R. (2016). **Appendix C. Soil Properties**. Wiley.

MAKALELER

ARULRAJAH, A., PIRATHEEPAN, J., DISFANI, M. M., & BO, M. W. (2012). “Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications”, **Journal of Materials in Civil Engineering**, cilt 25, sayı 8, ss.1077-1088.

AL-JEZNAWI, D., SANCHEZ, M., AL-TAIE, A. J., & ZIELINSKI, M. (2019). “Experimental Studies on Curling Development of Artificial Soils”, **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, cilt 11, sayı 6, ss.1264-1273.

AL-BUSODA, B. S., & AL-TAIE, A. J. (2010). “Statistical Estimation of The Compressibility of Baghdad Cohesive Soil”, **Journal of Engineering**, cilt 16, sayı 4, ss.5863-5876.

AKAN, R., ve KESKİN, S., N. (2014). “Jet Grout Yönteminin Zemin İyileştirmesine Katkısının ve Bu Yöntemde Kullanılan Parametrelerin

Etkilerinin İrdelenmesi”, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, cilt 18, sayı 2, ss.22-26.

ATAPUERCA, E., T., CUENCA, M., S., & DÍAZ, E., C. (2019). “Jet Grouting Applicationsforthe Soil Reinforcement Under Caisson Quay Walls and Mitigation of Seismic Effectsin Gibraltar”, **Geotechnical Engineering in The XXI Century: Lessons Learned and Future Challenges**, ss.1429-1436.

AL-OMARİ, A., KHALİL, A., A., & KHATTAB, S. (2020). “From in Situ Investigation to FEM Analysis: Application of Al-Hadba Minaret Foundation”, **AIP Conference Proceedings 2213, 020132**.

BHAVSAR, S. N., JOSHI, H. B., SHORF, P. K., & PATEL, A. J. (2014). “Effect of Burnt Brick Dust on Engineering Properties on Expansive Soil”, **International Journal of Research in Engineering and Technology**, cilt 3, sayı 4, ss.2319-1163.

BİLDİK, S., SAVAŞERİ, K., DUALE, A. Y., BÜYÜKGÖKÇE, F., ve LAMAN, M. (2019). "İyileştirilmiş Zeminlerin Performansinin Sayısal ve Deneysel Olarak Değerlendirilmesi", **8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu 13 - 15 Kasım 2019, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul**, ss. 555-568.

CHEN, J., J., ZHANG, L., ZHANG, J., F., ZHU, Y., F. & WANG, J., H. (2013). “Field Tests, Modification, and Application of Deep Soil Mixing Method in Soft Clay”, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, cilt 139, sayı 1, ss.24-34.

EBADİ, M., HABİBAGAHİ, G., & HATAF, N. (2015). “Effect of Cement Treatment on Soil Non-Woven Geotextile Interface”, **Sharif University of Technology Scientia Iranica**, cilt 22, sayı 1, ss.69-80.

FU, Z., WANG, G., SONG, W., YU, Y., WEI, P., & WU, T. (2021). “Deformation Behavior of Saturated Soft Clay Under Cyclic Loading with Principal Stress Rotation”, **Applied Sciences**, cilt 11, sayı 19, ss.1-17.

- FU, T., WANG, K., REN, X., ZHU, Z., & WANG, L. (2022). “Jet-Grouting Technology for Reinforcement Strata Disturbance After Sand Mining”, **Frontiers in Built Environment**, cilt 8, sayı 868908, ss.1-10.
- KALANTARI, B. (2012). “Foundations on Expansive Soils: a Review”, **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, cilt 4, sayı 18, ss.3231-3237.
- KAPTAN, E., C., ÇINAR, F., T., ve BOZBEY, İ. (2021). “Derin Karıştırma Yöntemi (DSM) İle İyileştirilen Zeminlerde Elastisite Modülü ve Serbest Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişkinin İncelenmesi”, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi**, cilt 29, sayı 3, ss.286-296.
- KAREEM, R., & AL-ABBAS, K., A. (2022). “Numerical Analysis of Soil Strength Improved by Cement Injection”, **University of Thi -Qar Journal for Engineering Sciences**, cilt 12, sayı 1, ss.38-42.
- MORIWAKI, Y., IDRİSS, I. M., & DOYLE, E. H. (1982). “Earthquake-Induced Deformations of Soft Clay Slopes”, **Journal of The Geotechnical Engineering Division**, cilt 108, sayı 11, ss.12-19.
- MUNGAN, H. ve SÜN BÜL, A. B. (2018). “Sonlu Elemanlara Dayalı Dinamik Analiz; Zemin İyileştirme - Derin Temel Örneği”, **6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science**, ss.206-215.
- MAKARAROTRİT, W., & YOUWAI, S. (2022). “The Application of Deep Mixing Method for a River Wall and Finite Element Simulation”, **Proceedings of The 7th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'22)**, Paper No. ICGRE 183, ss.1-8.
- NGUYEN, L., FATAHI, B., & KHABBAZ, H. (2016). “Predicting The Behaviour of Fibre Reinforced Cement Treated Clay”, **Procedia Engineering**, cilt 143, ss.153-160.

- NGUYEN, T. A., & NGUYEN, T. N. (2020). "Study on Stress Distribution in Soft Ground Consolidated with Deep Cement Mixing Columns Under Road Embankment", **HRPUB Civil Engineering and Architecture**, cilt 8, sayı 6, ss.1251-1265.
- NOGUEIRA, A., CRISTOVAO, A., PINTO, A., HUTCHISON, R., & LINDSAY, W. (2015). "Jet Grout Columns Operating as a Reaction Platform For Christchurch Art Gallery Relevel Uplift and Soil Liquefaction Mitigation", **6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering**.
- OU, C., Y., TENG, F., C., & WANG, I., W. (2008). "Analysis and Design of Partial Ground Improvement in Deep Excavations", **Computers and Geotechnics**, cilt 35, sayı 4, ss.576–584.
- OZENER, P., DULGER, M., & BERİLGEN, M. (2015). "Numerical Study of Effectiveness of Jet-Grout Columns in Liquefaction Mitigation", **6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering**.
- PONGSIVASATHIT, S., HORPIBULSUK, S., & PIYAPHIPAT, S. (2019). "Assessment of Mechanical Properties of Cement Stabilized Soils", **Case Studies in Construction Materials**, cilt 11, ss.1-15.
- SAADELDİN, R., SALEM, M., A., & LOTFİ, H., A. (2011). "Performance of Road Embankment on Cement Stabilized Soft Clay", **2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference**.
- SARGENT, P., HUGHES, P., N., & ROUAİNİA, M. (2016). "a New Low Carbon Cementitious Binder for Stabilising Weak Ground Conditions Through Deep Soil Mixing", **Soils and Foundations**, cilt 56, sayı 6, ss.1021-1034.
- SÜN BÜL, A., B., ve PARLAK, S. (2015). "Sonlu Elemanlara Dayalı Sayısal Analiz; Temel Altı Zemin İyileştirme Örneği", **2nd International Sustainable Buildings Symposium**.

- SERT, S., OZOCAK, A., ve BOL, E. (2015). “Stability and Settlement Problems of Railway Embankments in Alluvial Soils”, **Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development**, ss.2067-2071.
- TEUNISSEN, H., & ZWANENBURG, C. (2017). “Modelling Strains of Soft Soils”, **Procedia Engineering**, cilt 175, ss.165-174.
- TSİGE, D., KORİTA, M., & BEYENE, A. (2022). “Deformation Analysis of Cement Modified Soft Clay Soil Using Finite Element Method (FEM)”, **Heliyon**, cilt 8, sayı 6, ss.1-12.
- TSCHUCHNİGG, F., & SCHWEİGER, H., F. (2008). “Comparison Of Different Models For Analysing Foundations On Jet Grout Columns. Proc”, **12th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics**, ss.3149 - 3157
- TUHAMİ, A., M., & MOHAMED, A., A. (2015). “The Effect of Jet Grouting on The Behavior of Strip Footing Adjacent to Slope Crest”, **International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science**, cilt 3, sayı 1, ss.1494-1503.
- ZAKARİA, M., M., HAFEZ, K., M., EL KAMASH, W., H., & MOUBARAK, A., H. (2020). “Stabilization of Soft Clay Soil by Deep Mixing”, **Life Science Journal**, cilt 17, sayı 3, ss.1-16.
- ZHANG, W., HONG, L., Lİ, Y., ZHANG, R., GOH, A., T., C., & LİU, H. (2021). “Effects of Jet Grouting Slabs on Responses for Deep Braced Excavations”, **Science Direct**, cilt 6, sayı 2, ss.185-194.

ELEKTRONİK KAYNAKLAR

- URL-1 “Plaxis Company Profile”, Plaxis, https://www.plaxis.ru/company/about_nip/company-profile/, (Erişim Tarihi: 15 Şubat 2023)
- URL-2 “1999 İzmit Earthquake”, Wikipedia.org,2023, https://en.wikipedia.org/wiki/1999_%C4%B0zmit_earthquake, (Erişim Tarihi: 15 Şubat 2023)
- URL-3 “1990 Upland Earthquake”, Wikipedia.org,2022, https://en.wikipedia.org/wiki/1990_Upland_earthquake#:~:text=The%

[201990%20Upland%20earthquake%20occurred,total%20losses%20of%20%2412.7%20million](#), (Erişim Tarihi: 15 şubat 2023)

Sloot, M., V., D., “How to Prescribe a Dynamic Displacement”, Bentley Communities, <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/45911/how-to-prescribe-a-dynamic-displacement>, (Erişim Tarihi: 15 şubat 2023)

TEZLER

BERİLGEN, M.M. (1996). “Ankrajlı Perdelerde Zemin Yapı Etkileşiminin İncelenmesi”, (Yayımlanmış doktora tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi.

BİLDİK S. (2013). “Farklı Zemin ve Yükleme Koşullarındaki Gömülü Boru Sistemlerinin Davranışının Araştırılması”, (Yayımlanmış doktora tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi.

CİVELEK S. (2011). “Tabakalı Zeminlere Oturan Yüzeysel Temellerin Taşıma Gücü Analizi”, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi.

İNAN, H. (2019). “Çimento-Kumlu Kil Karışım Oranlarının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Aydın Üniversitesi.

PARLAK, S. (2017). “Temel Altı Zemin İyileştirme Yöntemi Olan Jetgrout Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi”, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bülent Ecevit Üniversitesi.

TATARNİUK, C., M. (2014). “Deep Soil Mixing as a Slope Stabilization Technique in Northland Allochthon Residual Clay Soil”, (Yayımlanmış doktora tezi), Department of Civil Engineering, University of Canterbury.

TEMEL, S. (2020). “Yüksek Modüllü Kolonlarla Zemin İyileştirmesinin Midas Gts Yazılımı ile Üç Boyutlu İrdelenmesi”, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.

TÖREMIŞ, E., İ. (2003). “Geotekstiller ve Plaxis Sonlu Elemanlar Programı”, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.

YILDIRIM, Ü. (2019). “Köprü Yaklaşım Dolgularının İyileştirilmesi”, (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, T.C. İstanbul Gelişim Üniversitesi.

DiĞER KAYNAKLAR

HUDSON, M., IDRİSS, I. M., & BEIKAE, M. (1994). “QUAD4M - A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base”, Center for Geotechnical Modeling. Dept. of Civil & Environmental Engineering, Davis, California.

KOTTKE, A. R., & RATHJE, E. M. (2009). “Technical Manual for Strata”, University of California, College of Engineering. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley.

OBRZUD, R., & TRUTY, A. (2012). “The hardening soil model - A practical guidebook”, Technical Report Z. Soil.PC 100701, revised 31.01.2012.

EKLER

EK A. PLAXIS yazılımından çıkarılan statik analiz sonuçları

EK A.1 Konsolidasyon hesap türü sonuçları

EK A.2 Plastik hesap türü sonuçları

EK B. PLAXIS yazılımından çıkarılan dinamik analiz sonuçları

EK B.1 Sönümsüz olarak İzmit deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar

EK B.2 Sönümsüz olarak Upland deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar

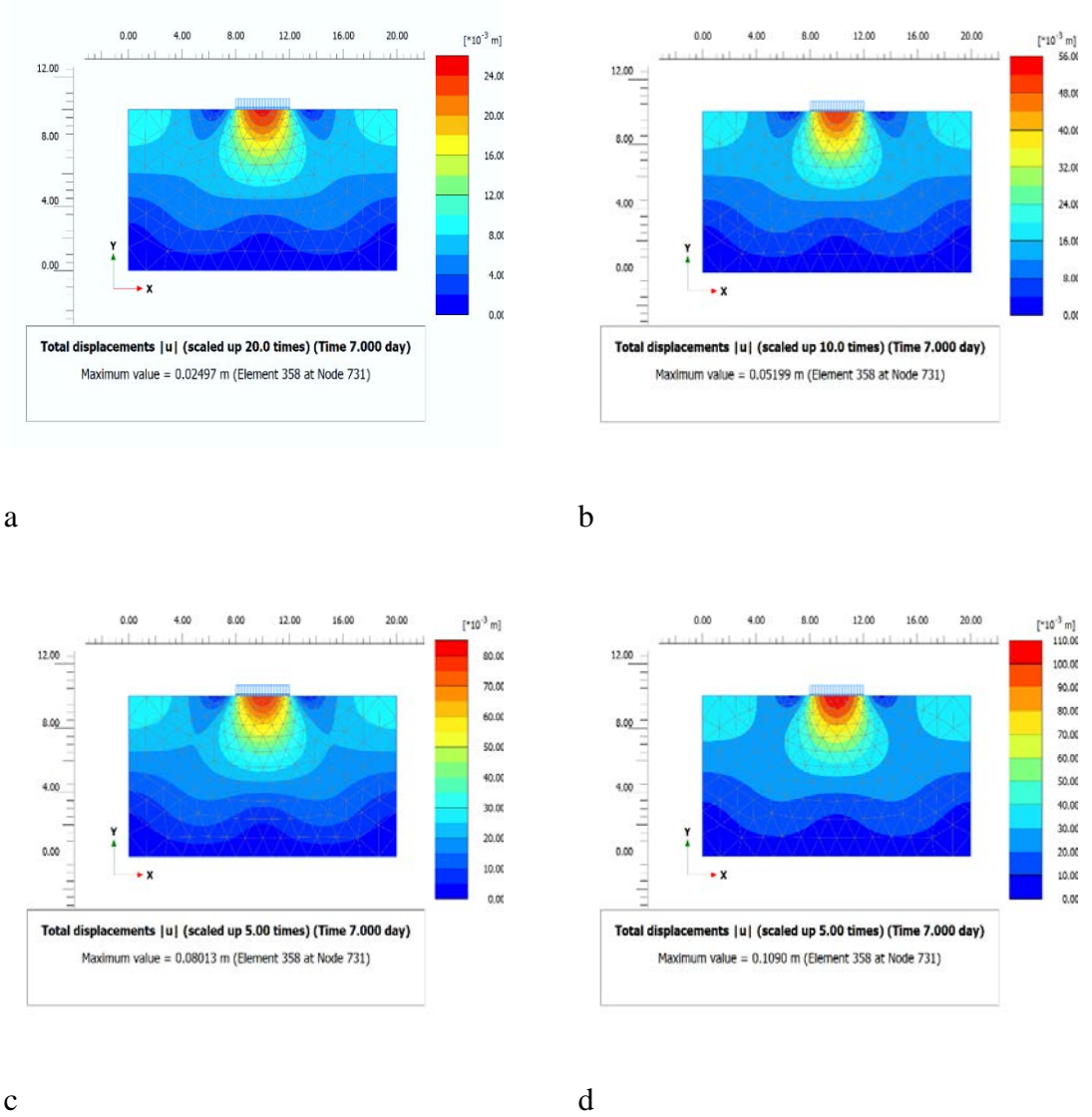
EK B.3 %5 sönümlü olarak İzmit deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar

EK B.4 %5 sönümlü olarak Upland deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar

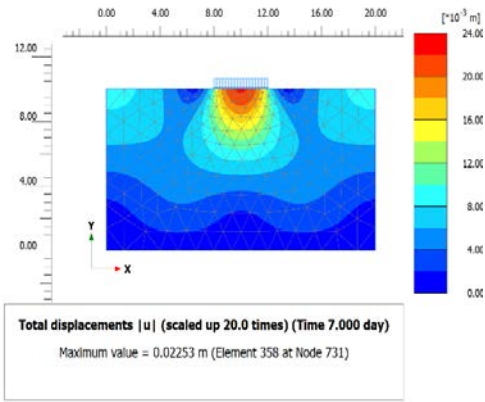
EK A. PLAXIS yazılımından çıkarılan statik analiz sonuçları

PLAXIS yazılımından çıkarılan statik analiz sonuçları aşağıda göstermektedir.

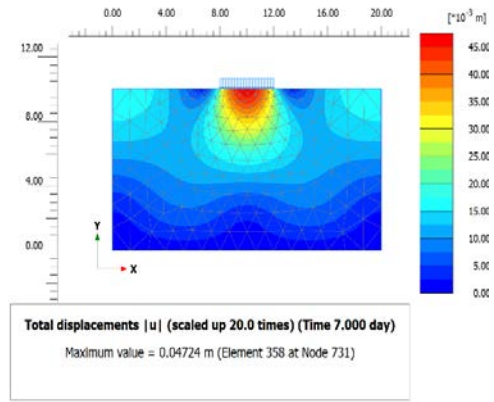
EK A.1 Konsolidasyon hesap türü sonuçları :



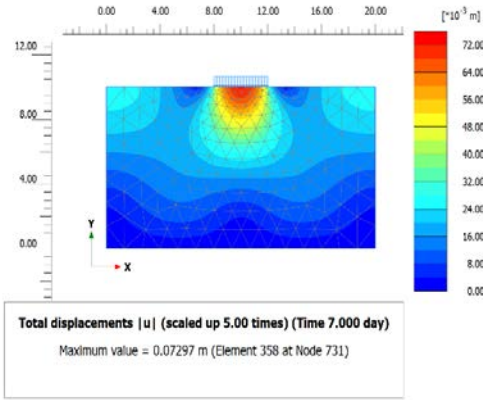
Şekil A.1.1 İyileştirilmemiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



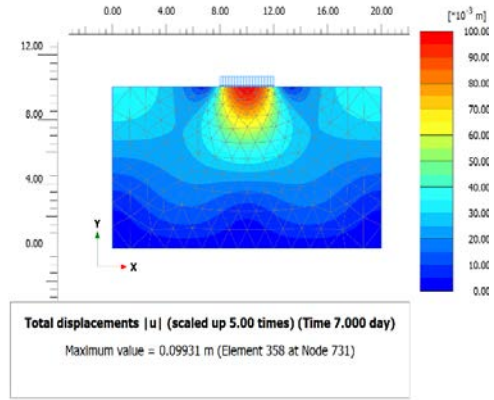
a



b

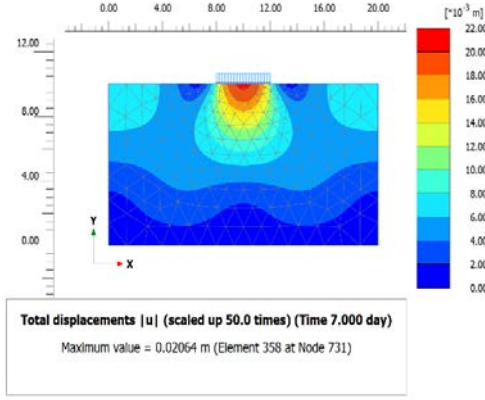


c

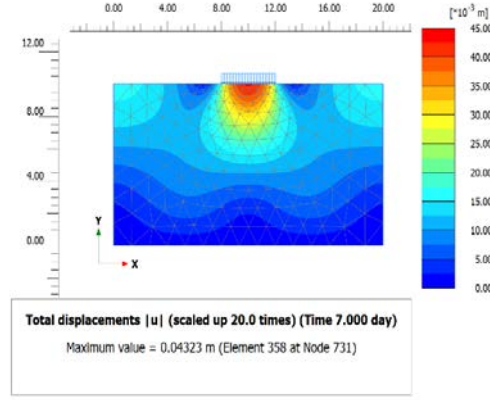


d

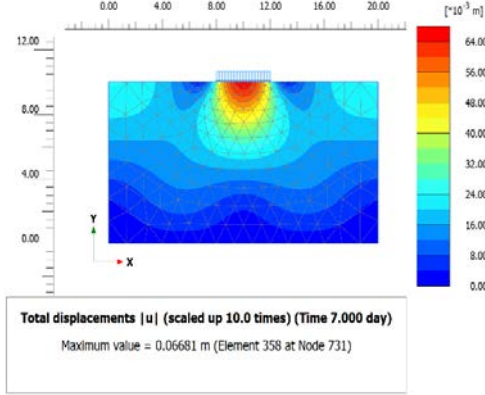
Şekil A.1.2 %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



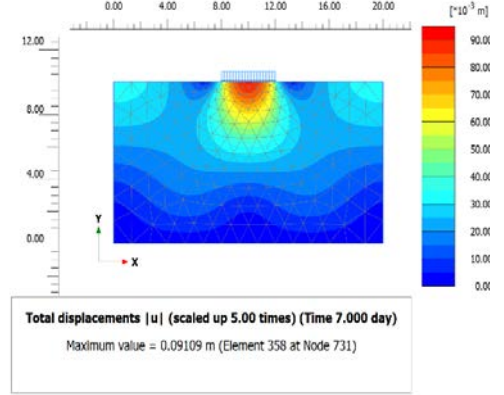
a



b

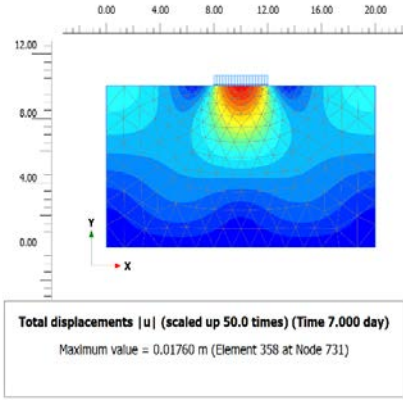


c

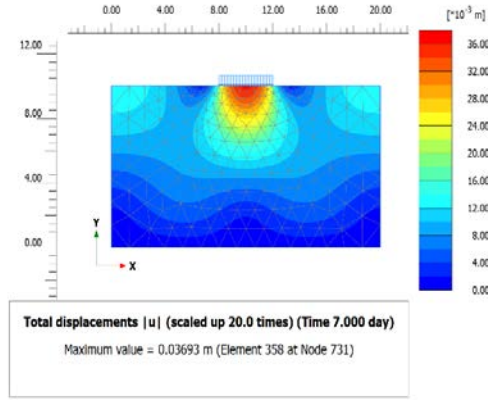


d

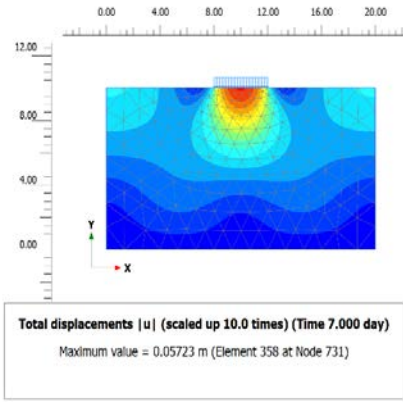
Şekil A.1.3 %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon
a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



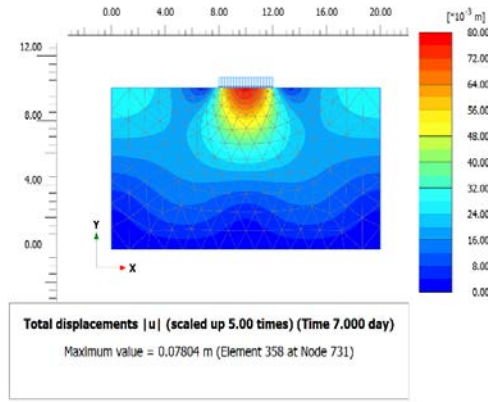
a



b



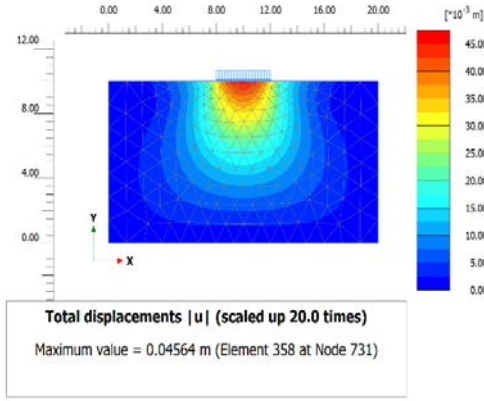
c



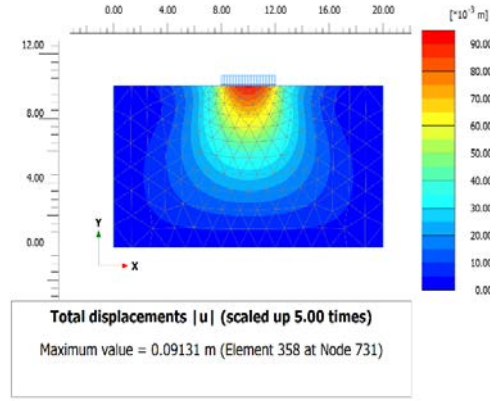
d

Şekil A.1.4 %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon
a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

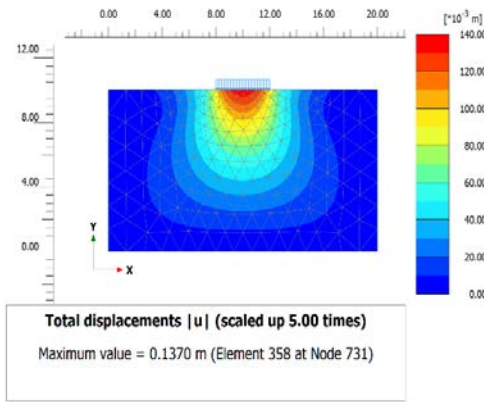
EK A.2 Plastik hesap türü sonuçları :



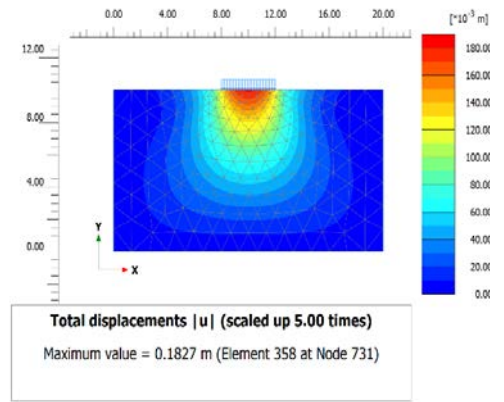
a



b

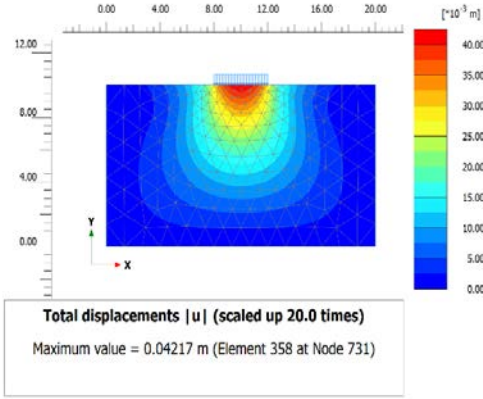


c

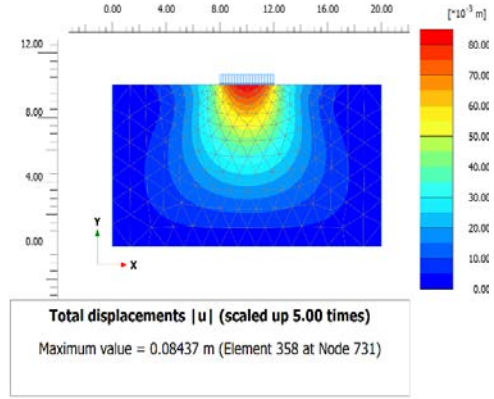


d

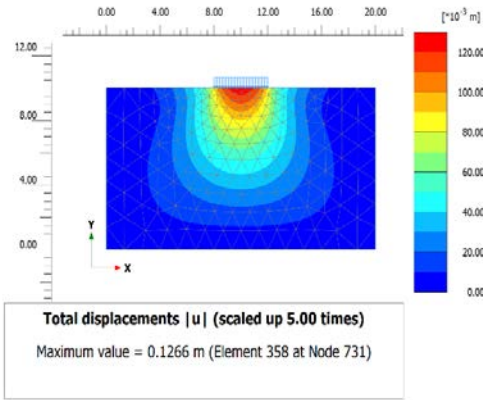
Şekil A.2.1 İyileştirilmemiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



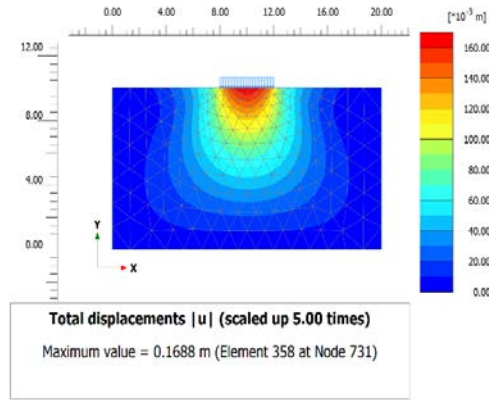
a



b

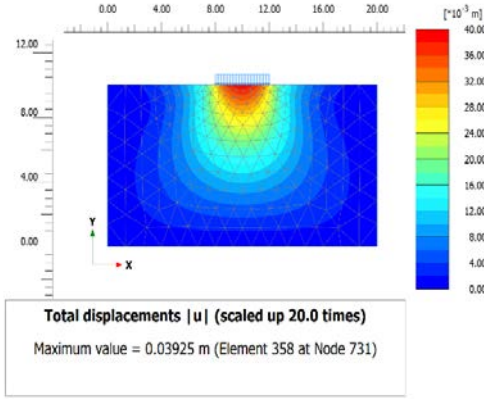


c

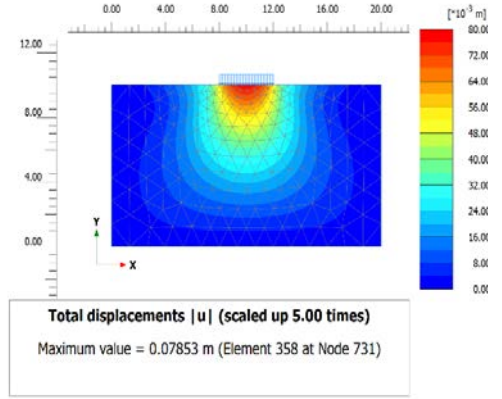


d

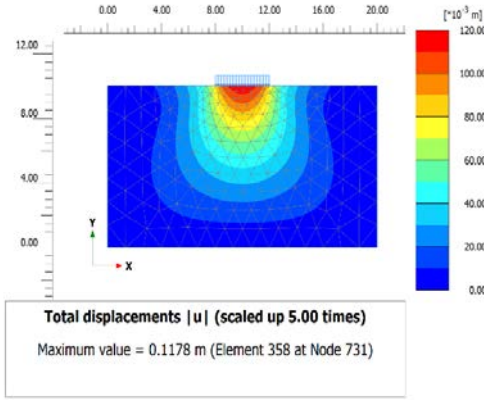
Şekil A.2.2 %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



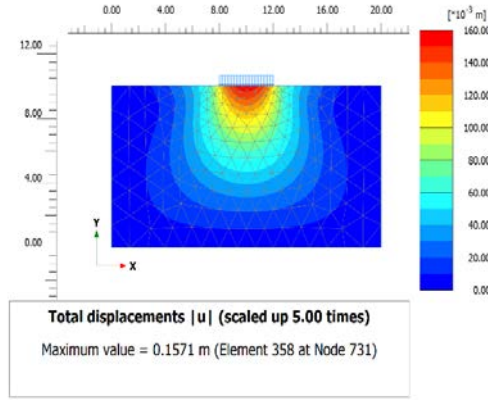
a



b

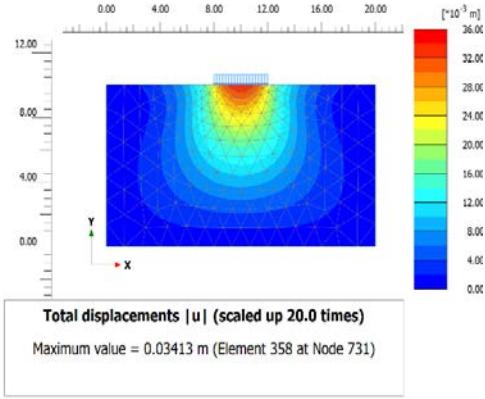


c

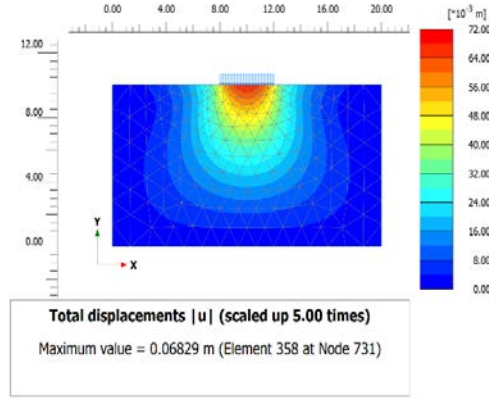


d

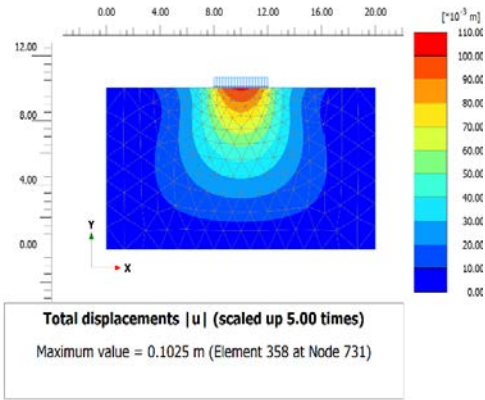
Şekil A.2.3 %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon
a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



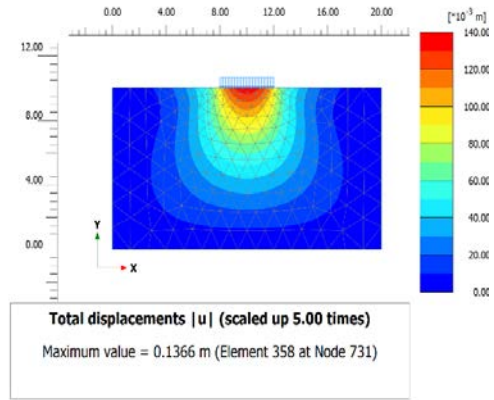
a



b



c

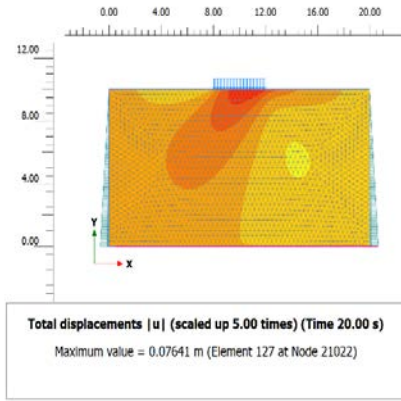


d

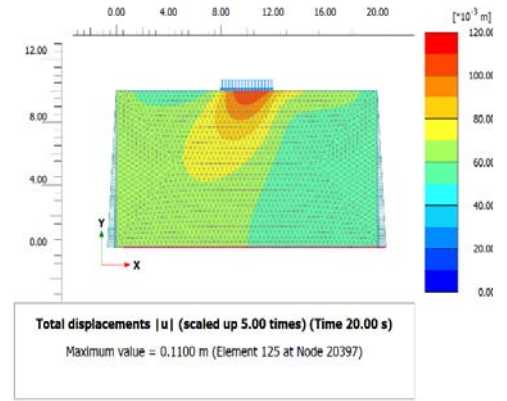
Şekil A.2.4 %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon
a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

EK B. PLAXIS yazılımından çıkarılan dinamik analiz sonuçları

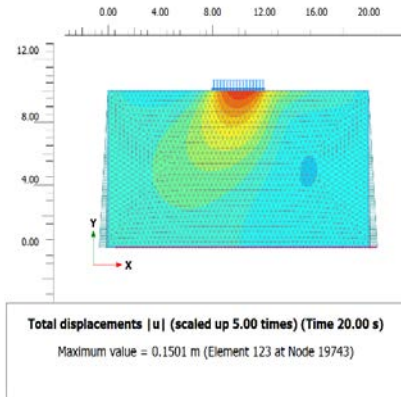
PLAXIS yazılımından çıkarılan dinamik analiz sonuçları sönümsüz olarak aşağıda göstermektedir.



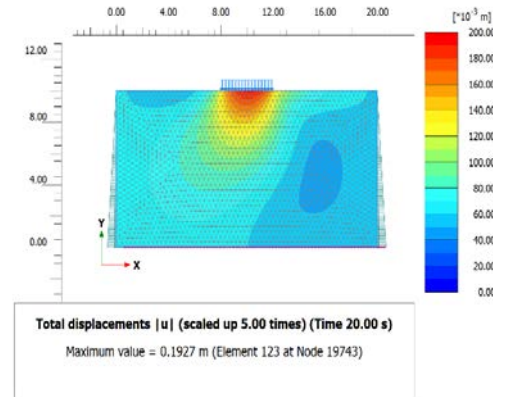
a



b



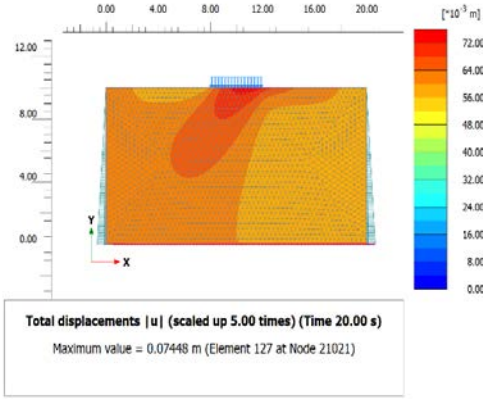
c



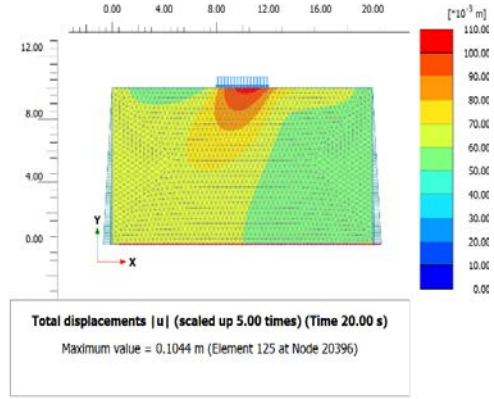
d

EK B.1 Sönümsüz olarak İzmit deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar :

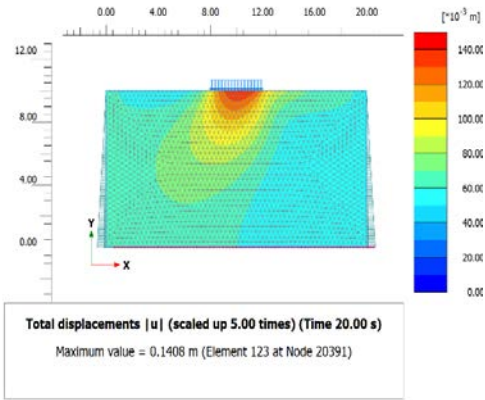
Şekil B.1.1 İyileştirilmemiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



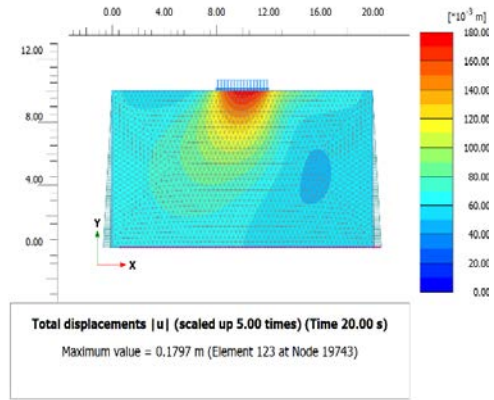
a



b

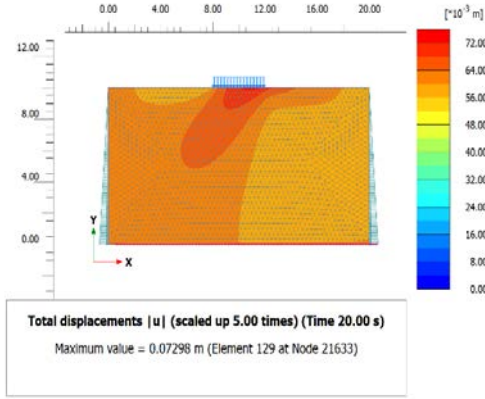


c

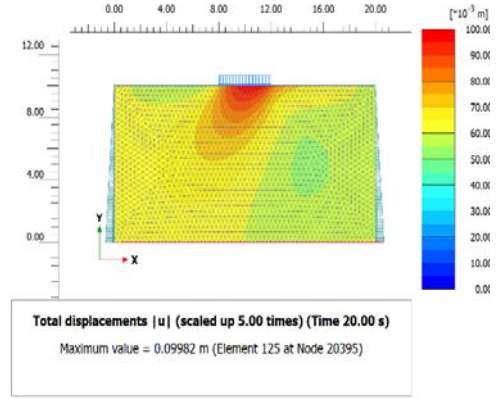


d

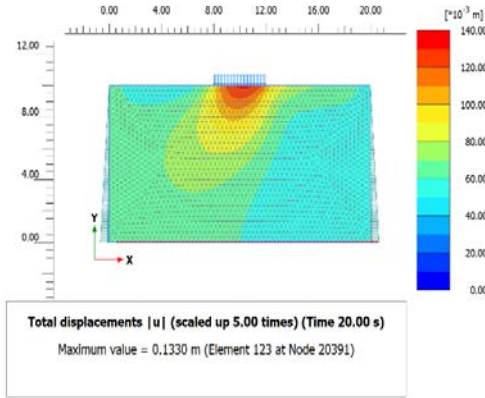
Şekil B.1.2 %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



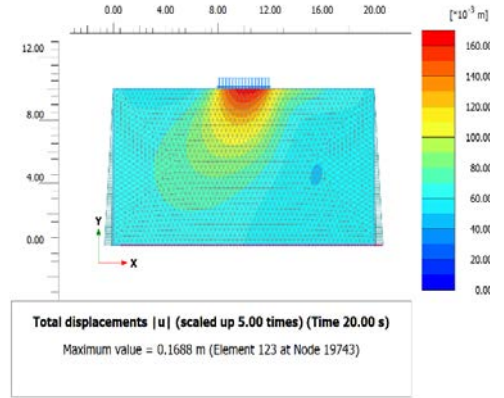
a



b

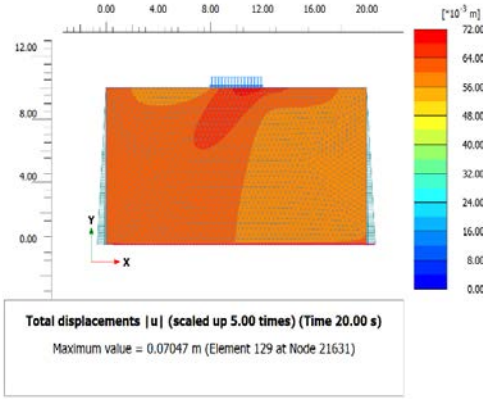


c

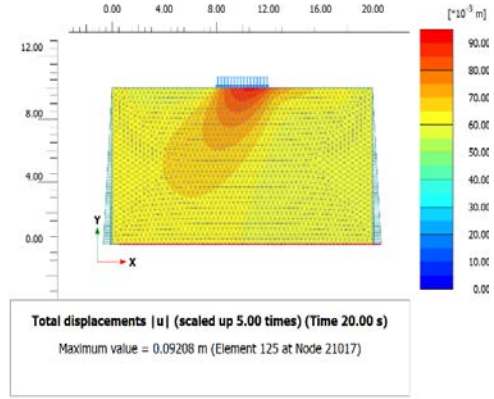


d

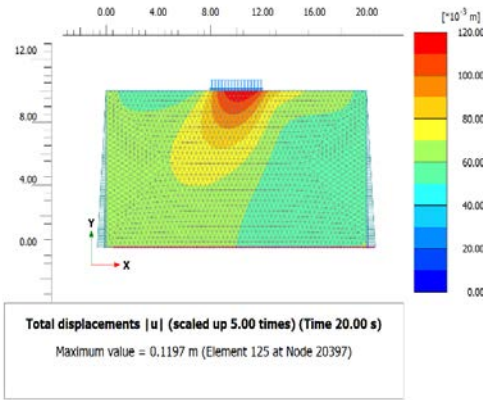
Şekil B.1.3 %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



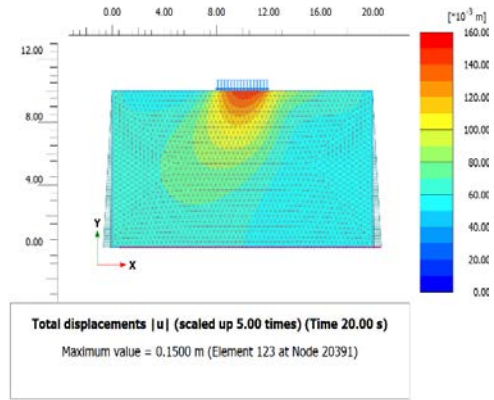
a



b



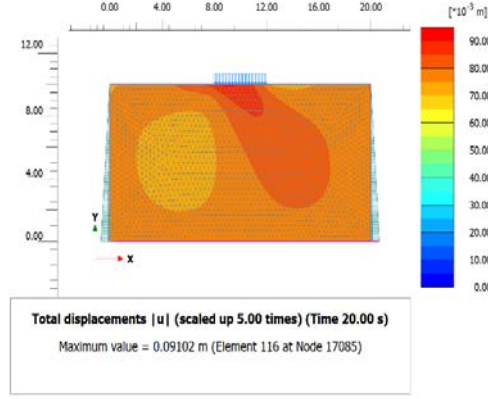
c



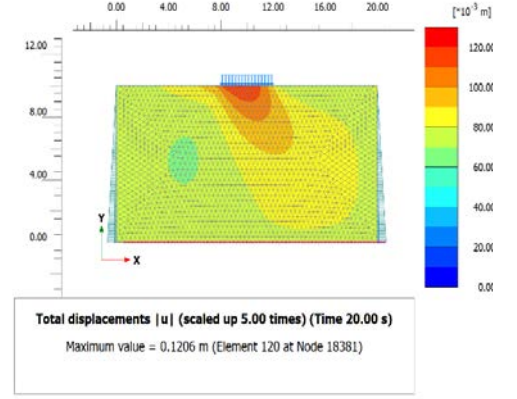
d

Şekil B.1.4 %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

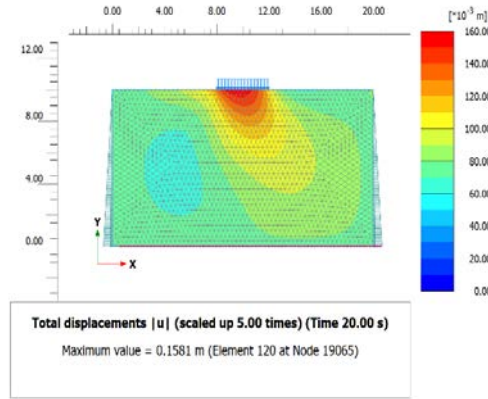
EK B.2 Sönümsüz olarak Upland deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar :



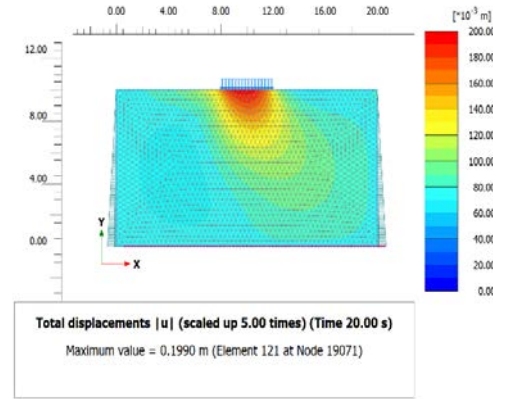
a



b

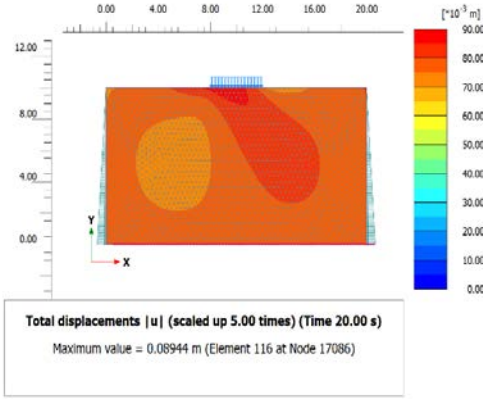


c

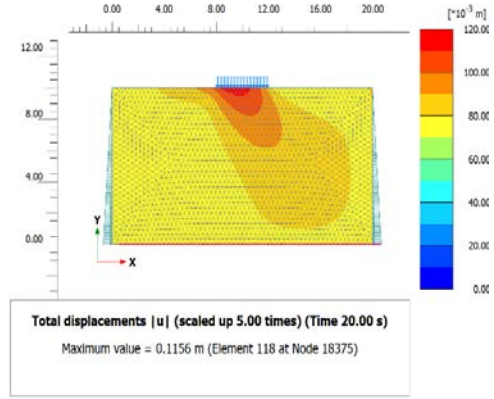


d

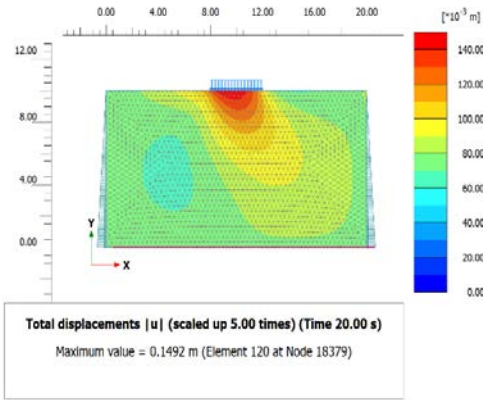
Şekil B.2.1 İyileştirilmemiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



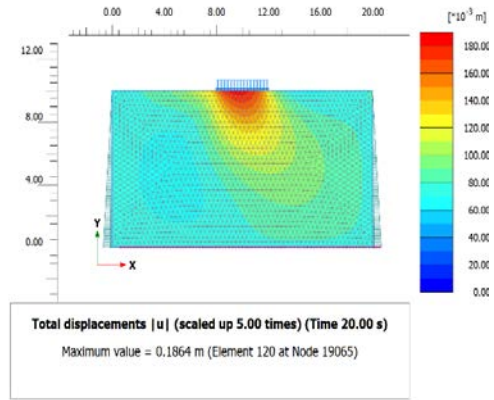
a



b

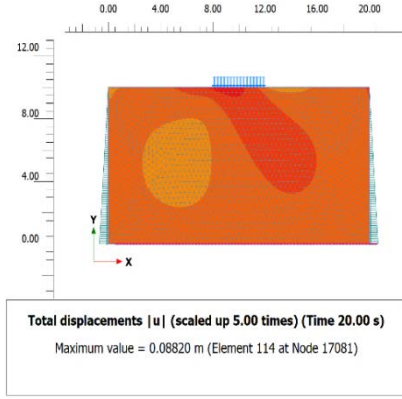


c

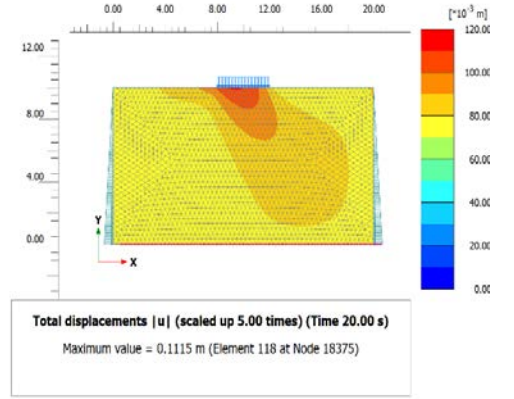


d

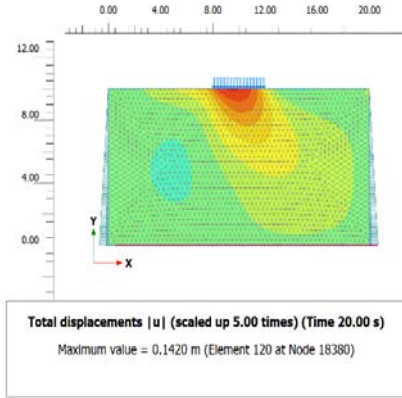
Şekil B.2.2 %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



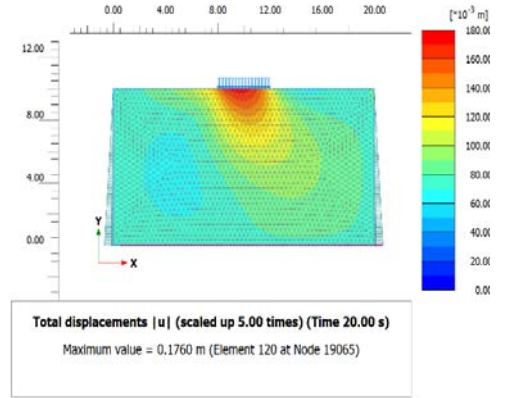
a



b

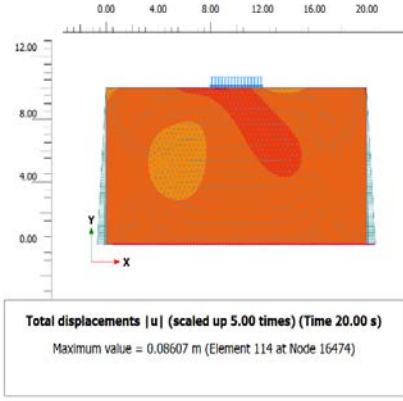


c

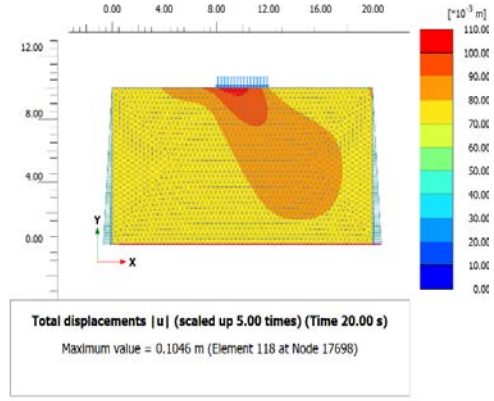


d

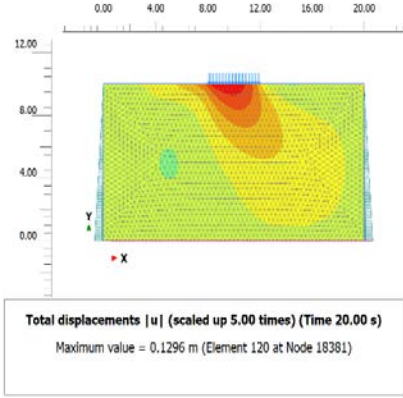
Şekil B.2.3 %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



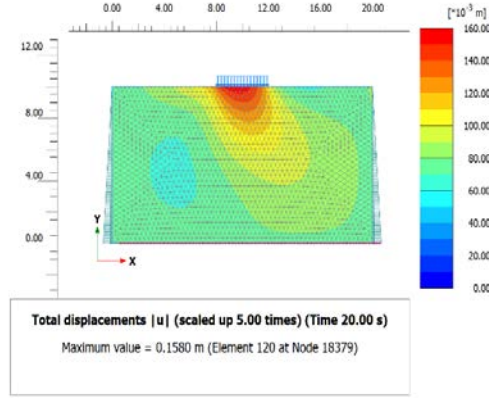
a



b



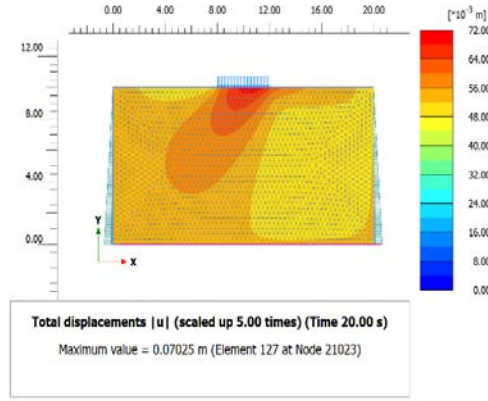
c



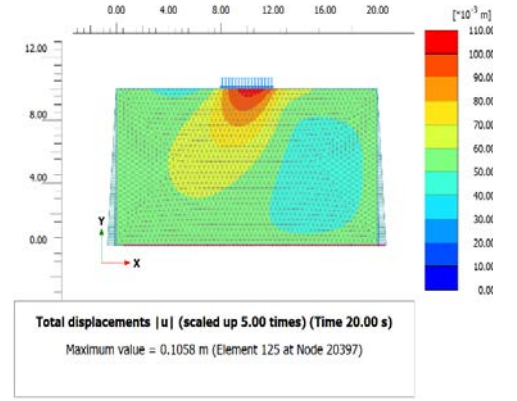
d

Şekil B.2.4 %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

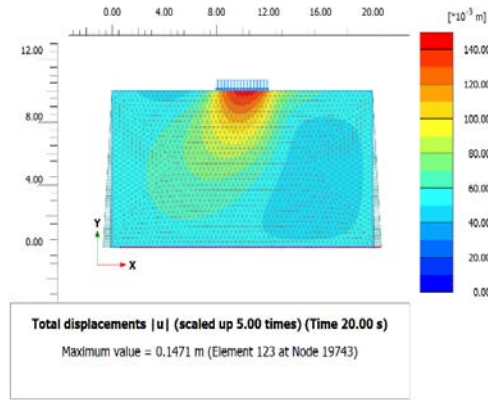
EK B.3 %5 sönümlü olarak İzmit deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar :



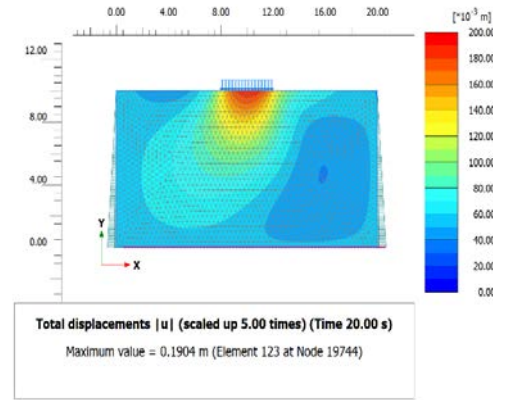
a



b

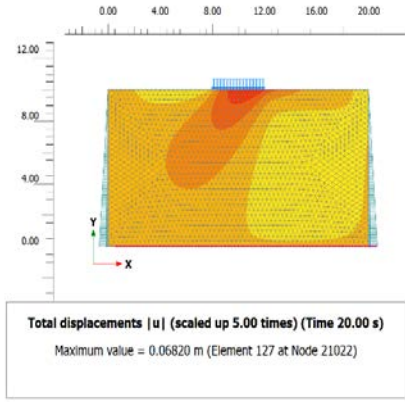


c

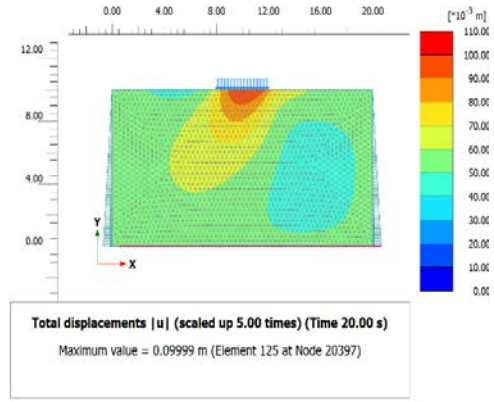


d

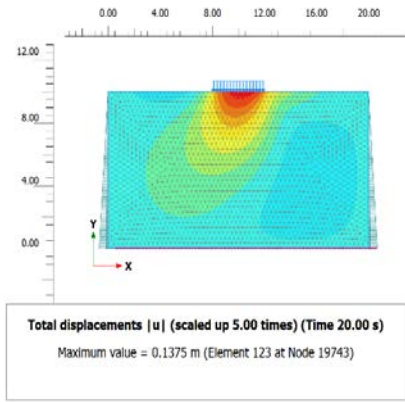
Şekil B.3.1 İyileştirilmemiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



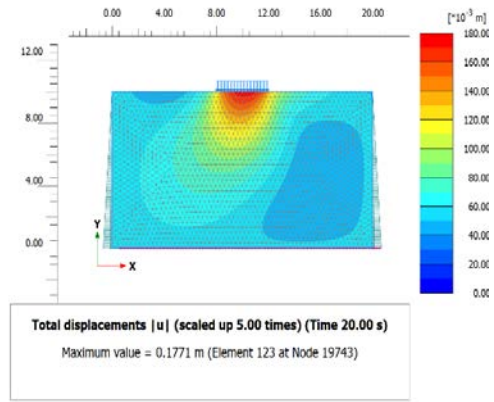
a



b

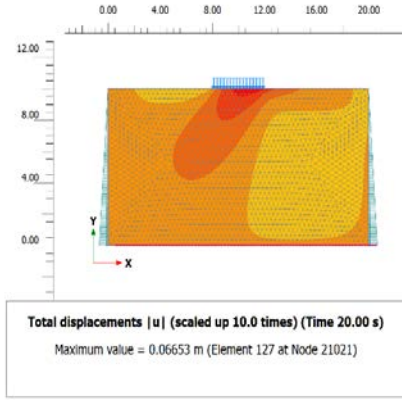


c

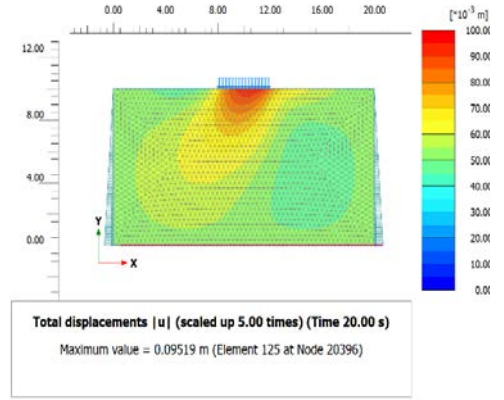


d

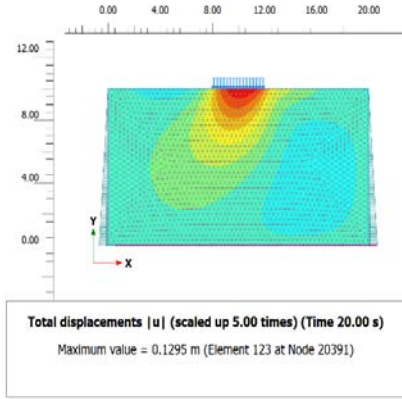
Şekil B.3.2 %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



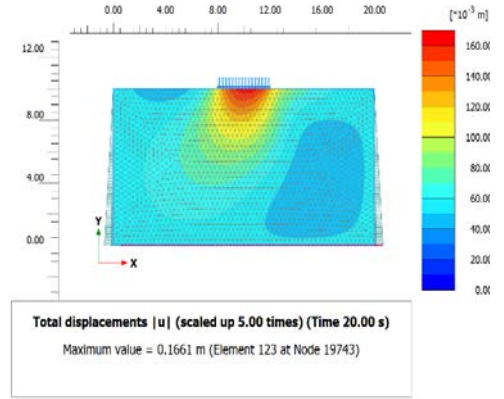
a



b

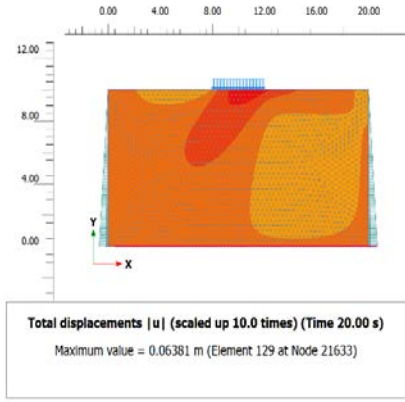


c

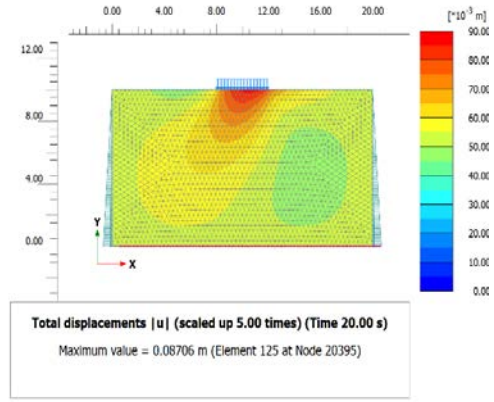


d

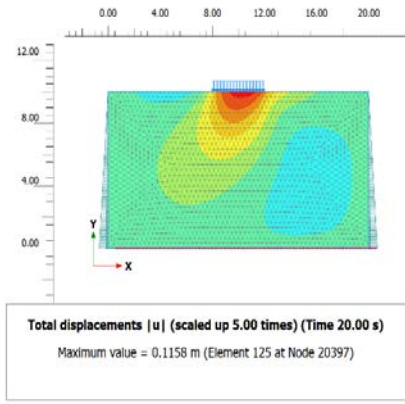
Şekil B.3.3 %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



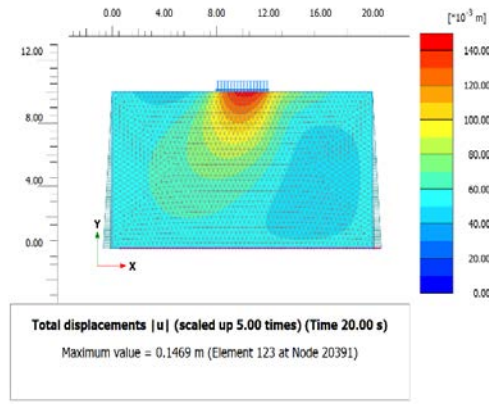
a



b



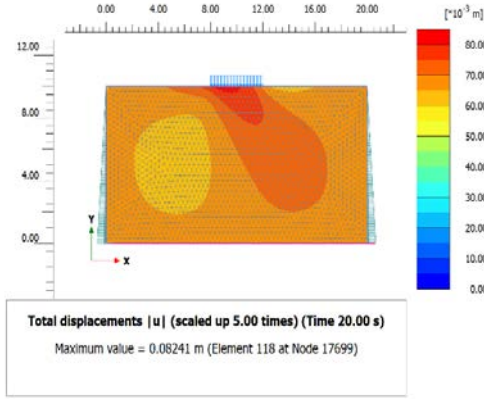
c



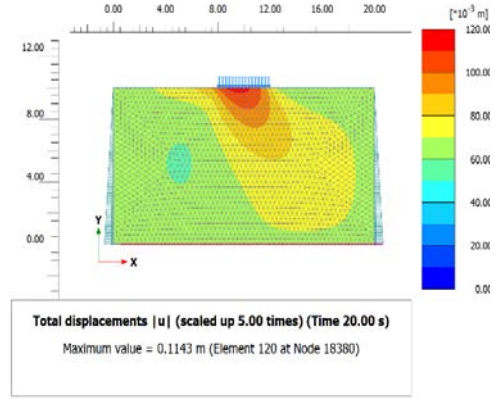
d

Şekil B.3.4 %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

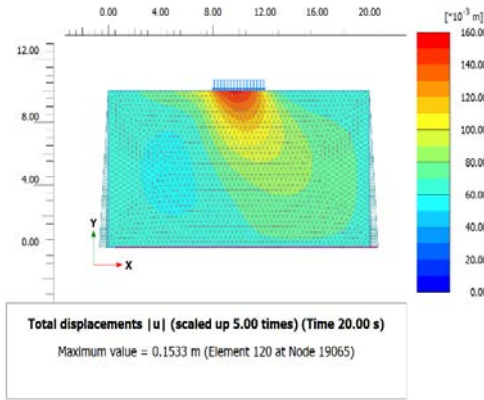
EK B.4 %5 sönümlü olarak Upland deprem kaydı kullanarak PLAXIS yazılımından gelen sonuçlar :



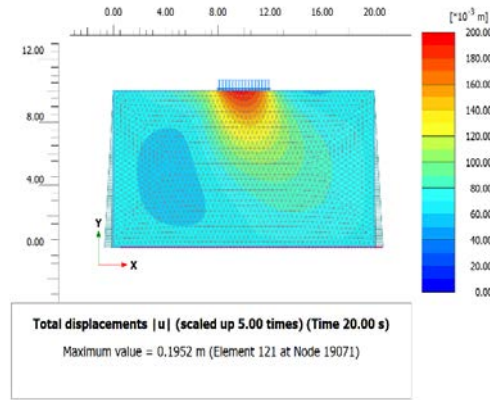
a



b

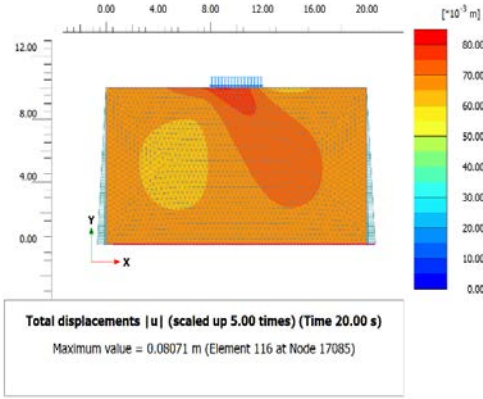


c

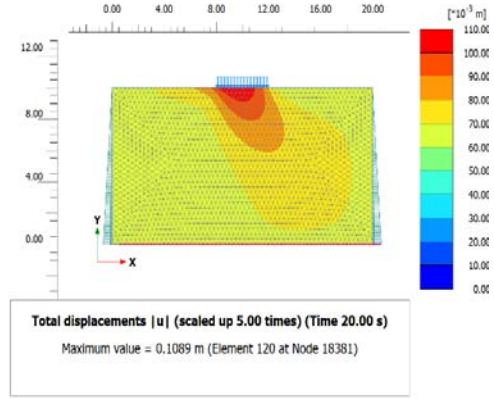


d

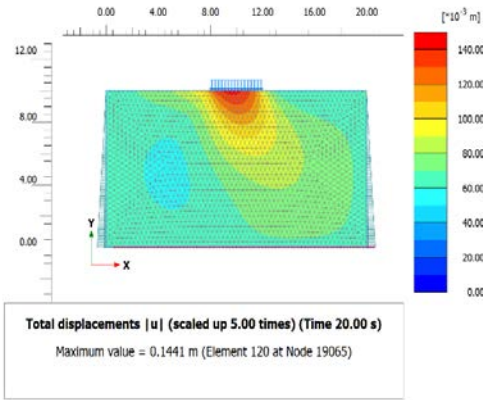
Şekil B.4.1 İyileştirilmemiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



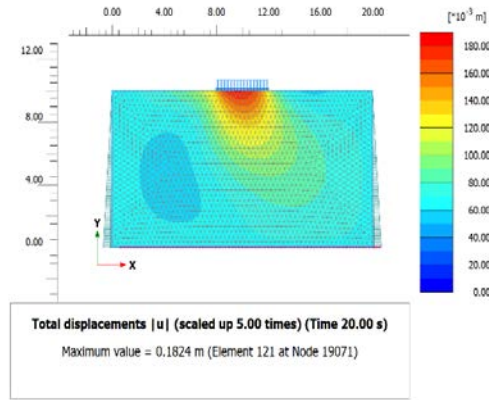
a



b

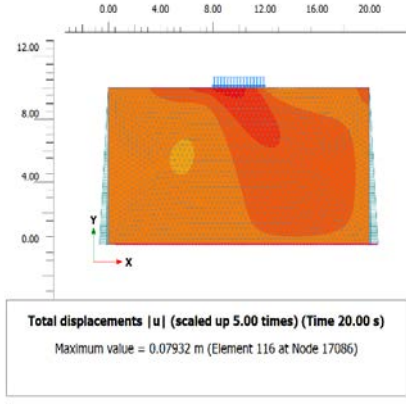


c

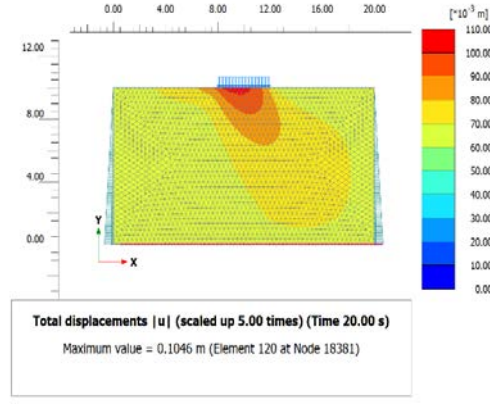


d

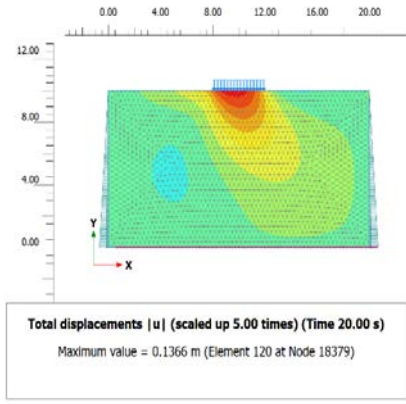
Şekil B.4.2 %5 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



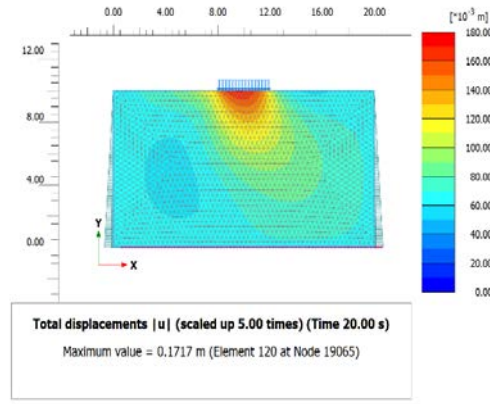
a



b

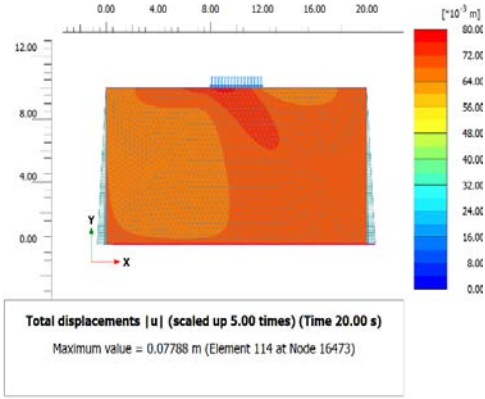


c

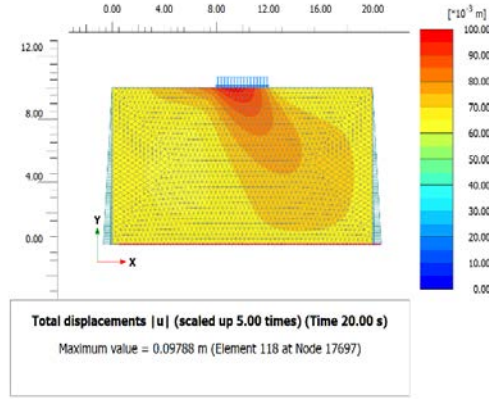


d

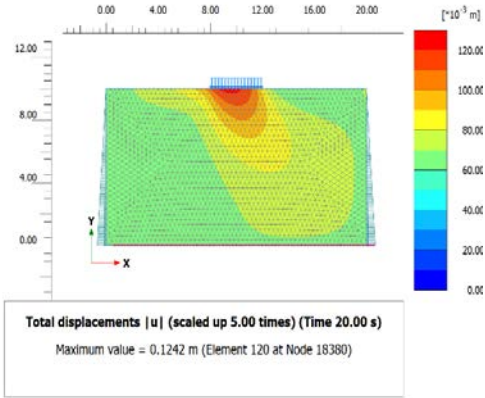
Şekil B.4.3 %10 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa



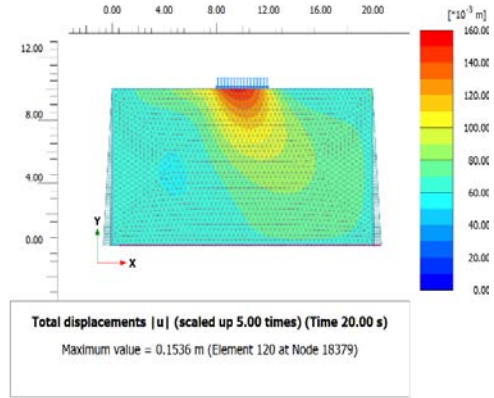
a



b



c



d

Şekil B.4.4 %15 çimento ile İyileştirilmiş zemin için toplam deformasyon a-) 50 kPa b-) 100 kPa c-) 150 kPa d-) 200 kPa

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Suadad Faisal Ibrahim AL ASADI

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2010, Teknoloji Üniversitesi - Irak, İnşaat Mühendisliği fakültesi.

Yüksek Lisans : 2023, İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği ana bilim dalı, İnşaat mühendisliği program.

TEZDEN TÜRETİLEN KONFERANS :

AL Asadi, S., & Dehghanian, K. 2022. Çimento-Kumlu Kil Karışımının Statik Analiz Üzerine Etkisi. *2nd international conference on design research and development - Civil Engineering*, December 14-17 İstanbul- Türkiye.

