

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KİREÇ STABİLİZASYONU İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE  
PLAXİS İLE YORUMLANMASI**

**TEOMAN ORHAN YILDIRIM**

**KOCAELİ 2018**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**


**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KİREÇ STABİLİZASYONU İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ**  
**VE PLAXİS İLE YORUMLANMASI**

**TEOMAN ORHAN YILDIRIM**

**Doç. Dr. Aydın KAVAK**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**  
**Doç. Dr. Utkan MUTMAN**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**  
**Dr. Öğretim Üyesi Erdiñ KESKİN**  
**Jüri Üyesi, Kırklareli Üniversitesi**

  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 16.07.2018**

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

İnşaat sektöründe sıklıkla karşılaşılan zayıf zeminlerinden kaynaklı problemlerin iyileştirmesinde kullanılan metotlardan, kireç ile zemin stabilizasyonu uygulamalarda kullanılmaya başlanılmıştır. Bu çalışmada kireç stabilizasyonu ile zemin iyileştirme yöntemi irdelenip sonlu elemanlar metodu kullanılarak plaka yükleme deneyi modellenerek analiz edilmiş ve sonuçlar gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır.

Araştırma çalışmaları sırasında yardımlarını ve iyi niyet ve anlayışlarını esirgemeyen başta Sn. Doç. Dr. Aydın KAVAK'a, İnş. Yük. Mühendisi Sn. Tayfun GÜL ve her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz – 2018

Teoman Orhan YILDIRIM

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ.....	1
1. KİREÇ STABİLİZASYONU İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ.....	3
1.1. Kireç Nedir?.....	3
1.2. Kirecin Kullanım Alanları.....	3
1.3. Zemin Stabilizasyonunda Kirecin Etkisi.....	6
1.4. Kireç İle Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	9
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI.....	11
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	16
3.1. Çalışma Alanının Zemin Özellikleri Ve Arazi Koşulları.....	16
3.2. Çalışma Kapsamında İzlenen Yöntemler.....	16
3.3. Zemin Özelliklerini Belirlendiği Deneyler.....	18
3.3.1. Elek analizi ve su muhtevasının tayini.....	18
3.3.2. Zemin kompaksiyon deneyleri.....	20
3.3.3. CBR deneyi.....	24
3.3.4. Plaka yükleme deneyi.....	26
3.4. Testlerden Elde Edilen Bulgular.....	30
4. PLAXİS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI.....	41
4.1. Programın Tanıtımı.....	41
4.2. İnşaat Mühendisliğinde Kullanımı.....	41
4.3. Arazide Uygulanan Plaka Yükleme Deneylerinin Plaxis İle Modellenmesi.....	41
4.3.1. A tabakası için yapılan modelleme.....	44
4.3.2. B tabakası için yapılan modelleme.....	54
4.3.3. Zemin parametrelerindeki değişimlerin kullanılan model üzerindeki etkisi.....	64
4.3.3.1. Zeminin poisson oranına bağlı inceleme.....	64
4.4. Arazi Ve Model Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	71
4.5. Boussinesq Sonuçları İle Plaxis Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	72
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	78
EKLER.....	81
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	85

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kirecin kullanım alanları.....	3
Şekil 1.2.	Demir çelik endüstrisinde kirecin kullanım alanları.....	4
Şekil 1.3.	İnşaat sektöründe kirecin kullanım alanları.....	4
Şekil 1.4.	Kimya sektöründe kirecin kullanım alanları.....	5
Şekil 1.5.	Cam endüstrisinde kirecin kullanım alanları.....	5
Şekil 1.6.	Geoteknik alanında kirecin kullanım alanları.....	5
Şekil 1.7.	Zemin kıvam limitlerinin kireç oranı ile değişimi.....	7
Şekil 1.8.	Kireç miktarının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi.....	8
Şekil 1.9.	Kirecin zemine uygulama yöntemleri.....	9
Şekil 1.10.	Kireç ile zemin stabilizasyonu uygulaması.....	10
Şekil 3.1.	Dolgu malzemesinin serilmesi.....	16
Şekil 3.2.	Kirecin zemine uygulanması.....	17
Şekil 3.3.	Dolgu malzemesinin sıkıştırılması.....	17
Şekil 3.4.	Kireç uygulanan zeminin durumu.....	17
Şekil 3.5.	İyileştirilen zeminde arazi yoğunluk testi.....	18
Şekil 3.6.	Elek analizinde elde edilen gradasyon eğrisi.....	19
Şekil 3.7.	Kompaksiyon deneyinden elde edilen eğri.....	21
Şekil 3.8.	Zeminin dolgu malzemesine ait kompaksiyon (Proctor) testi.....	22
Şekil 3.9.	Standart Proctor testinde kullanılan ekipmanların boyutları.....	23
Şekil 3.10.	Standart procter testinde laboratuvar çalışmasında bir örnek.....	23
Şekil 3.11.	Farklı zeminler üzerinde yapılan kompaksiyon testlerinden elde edilen eğriler.....	24
Şekil 3.12.	CBR deneyinde elde edilen eğri örnekleri.....	25
Şekil 3.13.	Plaka yükleme deneyinin şematik görünümü.....	26
Şekil 3.14.	Plaka yükleme deneyinden elde edilen yük - oturma eğri.....	27
Şekil 3.15.	Örnek plaka yükleme deney sonucu.....	27
Şekil 3.16.	Plaka yükleme deneyi yük-zaman grafiği.....	28
Şekil 3.17.	Plaka yükleme deneyi oturma-zaman grafiği.....	28
Şekil 3.18.	Plaka yükleme deneyi yük-oturma grafiği.....	29
Şekil 3.19.	Plaka yükleme deneyi uygulama örneği.....	30
Şekil 3.20.	Zeminde kullanılan dolgu malzemesinin elek analizi.....	30
Şekil 3.21.	Dolgu malzemesi üzerinde yapılan plaka yükleme deneyinin gerilme-deformasyon ilişkisi.....	32
Şekil 3.22.	B tabakası için CBR deney eğrisi.....	33
Şekil 3.23.	Zeminde kullanılan dolguda malzemenin elek analizi.....	35
Şekil 3.24.	Granüler dolgu malzemesi üzerinde yapılan plaka yükleme deneyinin gerilme-deformasyon ilişkisi.....	37
Şekil 3.25.	Dolgu malzemesi yaş CBR deneyine ait grafik.....	39
Şekil 4.1.	A tabakası için programda yeni sayfanın açılması.....	42
Şekil 4.2.	A tabakanın giriş ekranı.....	42
Şekil 4.3.	A tabakasında model boyutlarını gösteren ekran.....	43
Şekil 4.4.	A tabakası için zemin modelinin mesh yapısı.....	43

Şekil 4.5. A tabakasında plakanın uygulanması.....	44
Şekil 4.6. A tabakasında zeminin birim hacim ağırlıkları.....	46
Şekil 4.7. A tabakasının zemin parametreleri.....	48
Şekil 4.8. A tabakasında zeminin mesnetlemesi.....	48
Şekil 4.9. A tabakasında plakanın modele atanması.....	49
Şekil 4.10. A tabakasında çelik plakanın malzeme özelliklerinin atanması.....	50
Şekil 4.11. A tabakasında yeraltı suyunun Plaxisde uygulanması.....	50
Şekil 4.12. A tabakası için yeraltı suyunun Plaxis sonuçları.....	51
Şekil 4.13. A tabakasında zeminin Ko parametreleri.....	51
Şekil 4.14. A tabakasında zeminin efektif gerilmesinin Plaxis ile bulunması.....	51
Şekil 4.15. A tabakasında yük değerinin zemine uygulanması.....	52
Şekil 4.16. A tabakası için Plaxis programına girilen tüm parametrelerin hesaplanması.....	52
Şekil 4.17. A tabakasına uygulanan yük etkisinde mesh yapısı.....	53
Şekil 4.18. Zemine uygulanan yükün deplasman değerlerinin Plaxis ile hesaplanması.....	53
Şekil 4.19. B tabakası için programda yeni sayfanın açılması .....	54
Şekil 4.20. B tabakasının giriş ekranı.....	54
Şekil 4.21. B tabakasının modelde boyutları gösteren ekran.....	55
Şekil 4.22. B tabakası için zemin modelinin mesh yapısı.....	55
Şekil 4.23. B tabakası için plakanın modele uygulanması.....	56
Şekil 4.24. B tabakasında zeminin birim hacim ağırlıkları.....	57
Şekil 4.25. B tabakasının zemin parametreleri.....	59
Şekil 4.26. B tabakasında zeminin mesnetlenmesi.....	59
Şekil 4.27. B tabakasında zemine uygulanacak plakanın atanması.....	60
Şekil 4.28. B tabakasında çelik plakanın malzeme özelliklerinin atanması.....	60
Şekil 4.29. B tabakasında yeraltı suyunun Plaxisde uygulanması.....	61
Şekil 4.30. B tabakası için yeraltı suyunun Plaxis sonuçları.....	61
Şekil 4.31. B tabakasında zeminin Ko parametreleri.....	61
Şekil 4.32. B tabakasında zemin efektif gerilmesinin Plaxisde bulunması.....	62
Şekil 4.33. B tabakasında yük değerinin zemine uygulanması.....	62
Şekil 4.34. B tabakası için Plaxis programına girilen tüm parametrelerin hesaplanması.....	63
Şekil 4.35. B tabakasına uygulanan yük etkisinde mesh yapısı.....	63
Şekil 4.36. B tabakasında uygulanan yükün oluşturduğu deplasmanın Plaxis ile belirlenmesi.....	63
Şekil 4.37. A tabakasında poisson oranı 0,10 için uygulan yükün deplasman değerlerinin hesabı.....	65
Şekil 4.38. A tabakasında poisson oranı 0,15 için uygulan yükün deplasman değerlerinin hesabı.....	66
Şekil 4.39. A tabakasında poisson oranı 0,20 için uygulan yükün deplasman değerlerinin hesabı.....	67
Şekil 4.40. A tabakasında poisson oranı 0,25 için uygulan yükün deplasman değerlerinin hesabı.....	67
Şekil 4.41. B tabakasında poisson oranı 0,10 için uygulan yükün deplasman değerlerinin hesabı.....	69
Şekil 4.42. B tabakasında poisson oranı 0,15 için uygulan yükün deplasman değerlerinin hesabı.....	69

Şekil 4.43. B tabakasında poisson oranı 0,20 için uygulanan yükün deplasman değerlerinin hesabı.....	70
Şekil 4.44. B tabakasında poisson oranı 0,25 için uygulanan yükün deplasman değerlerinin hesabı.....	71



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Standart ve Modifiye Proctor testlerinin karşılaştırılması.....	23
Tablo 3.2. Su muhtevası tayini.....	30
Tablo 3.3. Zemin birim hacim ağırlığı tayini.....	31
Tablo 3.4. B tabakasının plaka yükleme deney sonuçları.....	31
Tablo 3.5. Zemin şişme miktarının (B tabakası) zamana bağlı değişimi.....	32
Tablo 3.6. B tabakasının CBR sonuçları.....	32
Tablo 3.7. Dolgu tabakası (B tabakası) için nükleer yoğunluk testi sonuçları.....	34
Tablo 3.8. Dolgu tabakasının (B tabakası) CBR test sonuçlarının özeti.....	34
Tablo 3.9. Dolgu malzemesine (B tabakası) ait özellikler.....	35
Tablo 3.10. A tabakasının su muhtevası tayini.....	36
Tablo 3.11. A tabakasının zemin birim hacim ağırlığı tayini.....	36
Tablo 3.12. A tabakasının tabi zemin üzerinde plaka yükleme deneyi.....	36
Tablo 3.13. Zemin şişme miktarının (A tabakası) zamana bağlı değişimi.....	38
Tablo 3.14. A tabakasının CBR sonuçları.....	38
Tablo 3.15. Dolgu tabakası (A tabakası) için nükleer yoğunluk test sonuçları.....	39
Tablo 3.16. Dolgu tabakasının (A tabakası) CBR test sonuçlarının özeti.....	40
Tablo 3.17. Dolgu malzemesine (A tabakası) ait özellikler.....	40
Tablo 4.1. Farklı malzemeler için tipik poisson oranları.....	47
Tablo 4.2. Zemin sınıfına bağlı permeabilite, içsel sürtünme açısı, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı arasındaki ilişki.....	47
Tablo 4.3. Zemin sınıfına göre kayma mukavemeti değerleri.....	64
Tablo 4.4. A tabakası için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar.....	68
Tablo 4.5. B tabakası için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar.....	71
Tablo 4.6. Arazi ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	72
Tablo 4.7. A tabakası için derinliğe bağlı gerilme ve deplasmandaki değişim.....	72
Tablo 4.8. B tabakası için derinliğe bağlı gerilme ve deplasmandaki değişim.....	73
Tablo 4.9. A tabakası için Boussinesq denkleminde elde edilen gerilmelerin karşılaştırılması.....	73
Tablo 4.10. B tabakası için Boussinesq denkleminde elde edilen gerilmelerin karşılaştırılması.....	74



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Plakanın alanı, (m)
B	: Sürekli temelin genişliği, (m)
c	: Zeminin kohezyonu, (kN/m <sup>2</sup> )
E	: Elastisite modülü, (kN/m <sup>2</sup> )
e	: Boşluk oranı
EA	: Elastisite alanı
EI	: Elastisite ataleti
G	: Kayma modülü (kg/mm <sup>2</sup> )
G	: Yerçekimi ivmesi (m/sn <sup>2</sup> )
GS	: Güvenlik Katsayısı
I	: Atalet momenti
LL	: Likit lmit, (%)
LP	: Plastik limit, (%)
K <sub>o</sub>	: Sükunetteki toprak basınç katsayısı
n	: Porozite
P <sub>1</sub>	: İlk yükleme eğrisinden elde edilen ortalama gerilme, (kN/m <sup>2</sup> )
P <sub>2</sub>	: İkinci yükleme eğrisinden elde edilen ortalama gerilme, (kN/m <sup>2</sup> )
SL	: Rötire Limit
S <sub>1</sub>	: İlk yükleme eğrisinden elde edilen ortalama deformasyon, (mm)
S <sub>2</sub>	: İkinci yükleme eğrisinden elde edilen ortalama deformasyon, (mm)
q	: Üniform yayılı yük, (kN/m <sup>2</sup> )
w	: Su içeriği, (%)
w <sub>opt</sub>	: Zeminin optimum su muhtevası
z	: Derinlik, (m)
ΔP	: İlk ve ikinci yükleme gerilme farkı, (kN/m <sup>2</sup> )
ΔS	: İlk ve ikinci yükleme deformasyon farkı, (mm)
ν	: Poisson oranı
Ψ	: İçsel sürtünme açısı, (°)
Φ	: Dilatansi açısı, (°)
γ <sub>d</sub>	: Zeminin kuru birim hacim ağırlığı, (kN/m <sup>3</sup> )
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı, (kN/m <sup>3</sup> )

### Kısaltmalar

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerika Devlet Otoyolları Ve Resmi Taşımacılık Birliği)
ASTM	: American Society for Testing and Meterilas (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
BHA	: Birim Hacim Ağırlık
CBR	: California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
DBHA	: Doğal Birim Hacim Ağırlık

DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
KBHA	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
LL	: Likit Limit
ML	: Düşük Plastisiteli Silt
MKBHA	: Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
NL	: Likit Davranış Göstermeyen
NP	: Plastik Davranış Göstermeyen
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik Limit
TS	: Türk Standardı
USCS	: Unified Soil Classification System (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi)



## KİREÇ STABİLİZASYONU İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE PLAXİS İLE YORUMLANMASI

### ÖZET

Dolgu çalışmaları günümüzde inşaat faaliyetinde sıklıkla uygulanan bir metottur. Eğimli arazilerin kot farkının ortadan kaldırması ve kazı-dolgu miktarının dengelenmesi açısından dolgu uygulamaları ekonomik bir yöntemdir. Yapılan bu tez çalışması kapsamında Plaka yükleme deneyi ile kireç kullanılarak iyileştirilen zeminlerin elastisite modülü, poisson oranı gibi temel mühendislik parametrelerin değiştirilerek ve değişen parametrelerin zemin deplasmanı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Zemin poisson oranı 0,1-0,25 arasında değiştiğinde, oluşan deplasmanların %27'ye kadar azaldığı görülmüştür. Yapılan analizler Plaxis sonlu eleman programı kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde Mohr-Coulomb metodu kullanılarak uygulanan yüke karşılık zeminde oluşan deplasmanlar belirlenmiştir. Ayrıca dolgu zeminlerde kireç katkısının zeminin taşıma gücünü önemli ölçüde arttırdığı saptanmıştır. Tez kapsamında analizler İzmir Turgutlu sanayi bölgesindeki silt-kum karışımı, taşıma gücü zayıf olan zeminlere %2 oranında kireç katkısı yapılarak zemin iyileştirilmesi çalışması üzerinden incelenmiştir. Uygulamanın yapıldığı alanda plaka yükleme testlerinden elde edilen sonuçlar aynı zamanda Plaxis Sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş ve karşılaştırılmıştır. Derinlere doğru değişen zemin gerilmelerinin kireç katkısı ile değişimi incelenerek sonuçlara etkiyen faktörler üzerinde durulmuştur. İncelemelerin yapıldığı her iki tabakada zemin poisson oranı arttıkça deplasman miktarının düştüğü gözlenmiş, arazi sonuçları ile Plaxis sonuçları karşılaştırıldığında sonuçlar arasında yaklaşık %10 farklılık görüldüğü tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kireç Katkısı, Mohr-Coulomb, Plaxis, Poisson Oranı.

## **SOIL STABILIZATION WITH LIME AND INTERPRETATION WITH PLAXIS**

### **ABSTRACT**

Nowadays, excavation and earthfill works of soils are common methods for infrastructure works. It is an economical method to balance the amount of excavation and earthfill to flatten the construction sides to decrease the slopes. In the scope of thesis, the basic engineering parameters such as modulus of elasticity, poisson ratio changed, and the effect of these parameters on the soil displacement were investigated by using plate loading tests and the Plaxis program. When the poisson ratio of the soil is between 0,1-0,25 deformations in the soil decreases by 27%. The results of deformations and corresponds to the applied load by plate loading test were compared with Plaxis finite element modelling results. In the analyzes, Mohr-Coulomb method is used to determine soil displacements during modelling. Plaxis analyses were performed by changing the poisson ratio and elasticity modulus of the stabilized soil. It has been found that lime additive in the earthfill creates a significant increase in soil bearing capacity. Analyzes showed that mixture of silt, sand and clay can be modified by 2% lime additive that increases the soil bearing capacity considerably. The plate loading tests carried out in İzmir Turgutlu industrial area were also modeled and compared with the Plaxis Finite Element program. According to the results on two earthfill layers, it is found that when poisson ratio of the fill layer increases, then the deformations in the soil decreases. There is a limited 10% difference, when the results of plate loading test conducted in the field and Plaxis analysis are compared.

**Keywords:** Lime Additive, Mohr-Coulomb, Plaxis, Poisson Ratio.

## GİRİŞ

İnşaat alanında karşımıza çıkan zeminler her zaman istenilen taşıma gücüne sahip olmayabilirler. Bu nedenle bazı durumlarda zemin iyileştirme metotları kullanılarak istenilen taşıma gücüne sahip olması sağlanabilir. Bu metotlardan birisi olan kireç ile zemin stabilizasyonu yöntemi zeminin taşıma gücünü arttırmasında kullanılan faydalı bir metot dur. Bu metodun hızlı ve ekonomik bir şekilde uygulanabilir olması yöntemin önemli bir avantajıdır.

Tez çalışması kapsamında kireç ile zemin iyileştirme metodu irdelenmiştir. Bu kapsamda kireç katkısının zeminin taşıma gücüne olan etkisi laboratuvar ve arazi çalışmalarından elde edilen sonuçlar değerlendirilip daha sonra sonlu elemanlar metodu kullanılarak tekrar modellenmiştir. Model ve arazi çalışmalarından elde edilen bulgular karşılaştırılarak önerilerde bulunulmuştur. Yapılan bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Tez kapsamında her bölümde yapılan çalışmaların özeti aşağıda sunulmuştur.

Tezin birinci bölümünde kireç ve kirecin oluşumu hakkında bilgi verilip kirecin kimyasal yapısı detaylıca açıklanmıştır. Kirecin gerek inşaat mühendisliği gerekse diğer endüstriyel dallarda kullanıldığı alanlar belirtilmiştir. Daha sonra kireç stabilizasyonu ve bu iyileştirme yönteminin avantajları kısaca anlatılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde kireç ile zemin iyileştirmesi üzerine yapılmış literatür araştırmaları incelenerek özet halinde verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde malzeme ve yöntem tanıtılmıştır. Daha sonra uygulamanın yapıldığı arazide yapılan çalışmalar ve çalışmalarda kullanılan deneyler kısaca açıklanarak test sonuçları verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde sonlu elemanlar metodu tanıtılmış ve Plaxis programı üzerinde durulmuştur. Tezin bu bölümünde arazi çalışmalarında elde edilen plaka yükleme test sonuçları Plaxis programı ile modellenerek analiz edilmiştir. Yapılan analizler de plaka yükleme testini etkileyen faktörlerden poisson oranı deplasman ve

gerilme üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu bölümde zemin gerilme analizinin yapıldığı Boussinesq metodu kullanılarak zeminin plaka çapının birkaç katı derinliğindeki gerilme değişimleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler arazi ve Plaxis sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tezin beşinci bölümünde tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar bir arada değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda ileriki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



## 1. KİREÇ STABİLİZASYONU İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ

### 1.1. Kireç Nedir?

Kireç, kireçtaşının çeşitli derecelerde pişirilmesi sonucu elde edilen, suyla reaksiyona girebilen inorganik esaslı bir bağlayıcı maddedir. Kireç taşının pişirilme işlemine kalsinasyon denir. Kalsinasyon reaksiyonu ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) sonucunda meydana gelen CaO söndürülmemiş kalsiyum (kalker) kirecidir.

### 1.2. Kirecin Kullanım Alanları

Kireç başta kimya ve demir çelik sektörü olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1.1-6). Özellikle inşaat sektöründe de kullanılmaya başlayan kireç, yapının inşasında ve zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Kirecin kullanım alanları

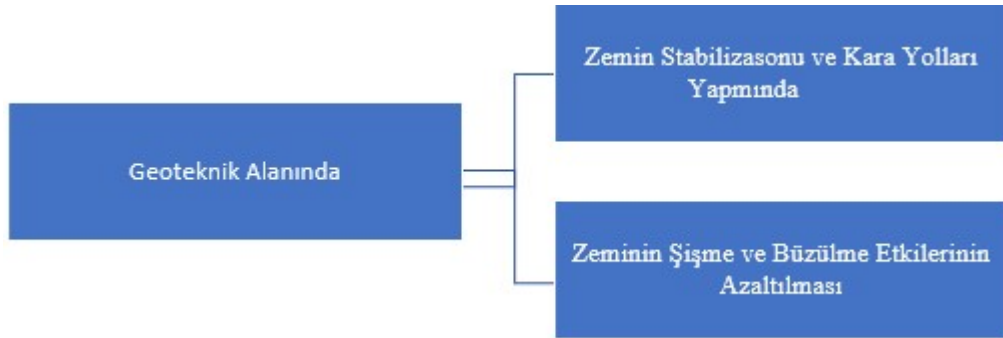
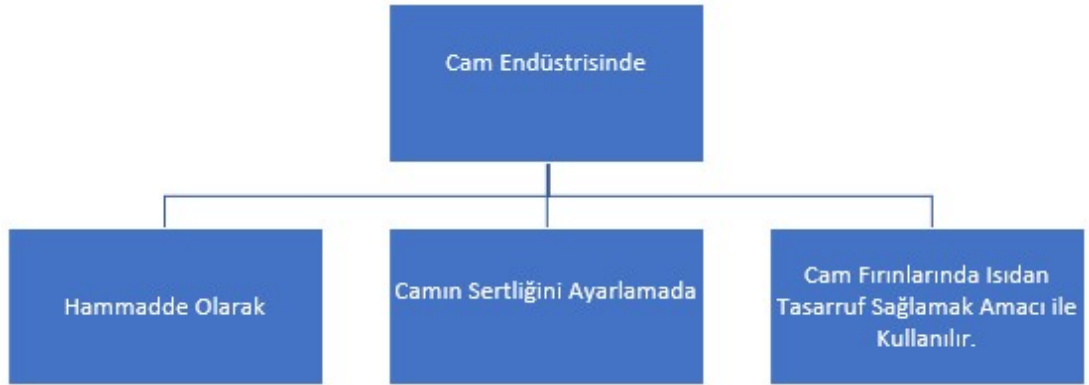
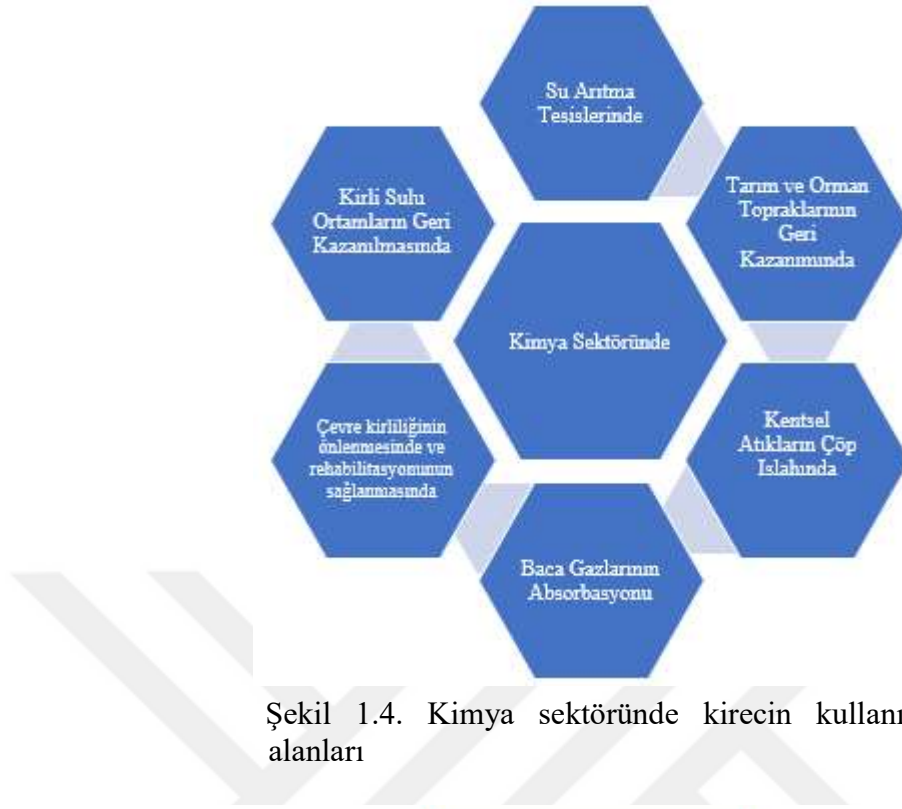


Şekil 1.2. Demir çelik endüstrisinde kirecin kullanım alanları



Şekil 1.3. İnşaat sektöründe kirecin kullanım alanları





### 1.3. Zemin Stabilizasyonunda Kirecin Etkisi

Zeminlerin iyileştirilmesi; yeterli taşıma gücüne sahip olmayan zemin birimlerinin daha sağlam bir yapı kazanması için uygulanan birtakım yöntemler içerir. Zemin iyileştirme yöntemlerinde esas amaç çeşitli yapıların temel zeminleri için yeterli koşulları sağlamak istenilen performansı elde etmektir. Zemin iyileştirme teknikleri zeminin statik yükler altında istenilen performansı elde edilemeyeceği durumlarda sıklıkla tercih edilen yöntemleri kapsamaktadır (URL-1).

Yetersiz zemin koşullarıyla karşılaşıldığı durumlarda çeşitli çözüm yollarına başvurulabilir. Örnek olarak çalışılan araziden vazgeçilip yeni bir uygulama alanı seçilebilir, yüzeysel temellerin yerine derin temeller tasarlanabilir, zeminde bulunan yetersiz tabakalar kaldırıp yerine daha iyi bir malzeme yerleştirilebilir, mevcut zemine uygun yapı tasarlanabilir veya bu tez çalışmasının da konusu olan kireç stabilizasyonu gibi yöntemlerle zemini yerinde iyileştirilebilir (URL-1).

Zemin iyileştirmesi; zeminin yapısını oluşturan fiziksel ve kimyasal özelliklerin, kireç ile değiştirilerek zeminin mukavemet özelliklerinin ve stabilitesinin artırılmasını sağlayan yöntemin adını kireç stabilizasyonu olarak tanımlamıştır.

Zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi olan kireç ile zemin iyileştirilmesi, özellikle yollarda kaplama altında sağlam bir zemin yapısı oluşturmak için zeminin kireç ile karıştırılması ile uygulanmaktadır Kızılcılık (2010).

Kireç ile zemin iyileştirme çalışmalarında en çok tercih edilen kireç çeşitleri ise sönmemiş kireç (CaO), sönmüş kireç (Ca(OH)<sub>2</sub>) ve yüksek kalsiyumlu kireçler ((Ca(OH)<sub>2</sub>.MgO, CaO.MgO)) dir (Kızılcılık, 2010).

Zemin iyileştirmede daha çok hidrate kalsiyum kireci (Ca(OH)<sub>2</sub>), klasik kireç (CaO), monohidrate dolamitik kireç (Ca(OH)<sub>2</sub>MgO) kullanılır. Bunlar zemine ağırlıkça %5-%10 oranlarında katılırlar. Kireç katkısı killi zeminlerde çeşitli kimyasal reaksiyonlar meydana getirirler (katyon değişimi, aglomerason). Killi zeminlerde katyonlar kalsiyum iyonları ile yer değiştirirler. Bunun sonucunda kil taneleri birbirine kenetlenerek zeminin iyileşmesine neden olurlar. Oluşan etki sonucunda zeminin likit

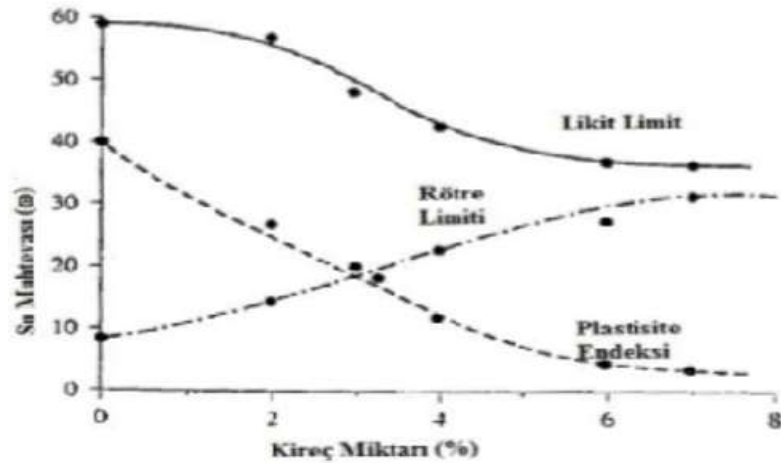
limiti (LL) azalır, plastik limit (PL) artar, plastisite endeksi azalır, işlenebilirlik artar ve mukavemet ile sıkışabilirlikte iyileşme görülür (Yıldırım,2002).

Yıldırım (2002)'de %2-%3 arasındaki kireç katkısının zemin iyileşmesine önemli düzeyde katkı sağladığı ve zeminin işlenebilirliğini arttırdığını ifade etmiştir.

Kızılcelik (2010) kireç stabilizasyonunda zemine katılması gereken kireç oranının zeminin kuru ağırlığının %1'i ile %3'ü arasında olması gerektiğini belirtmiştir. Tez çalışması kapsamında ise kullanılan kireç miktarı %2 oranındadır.

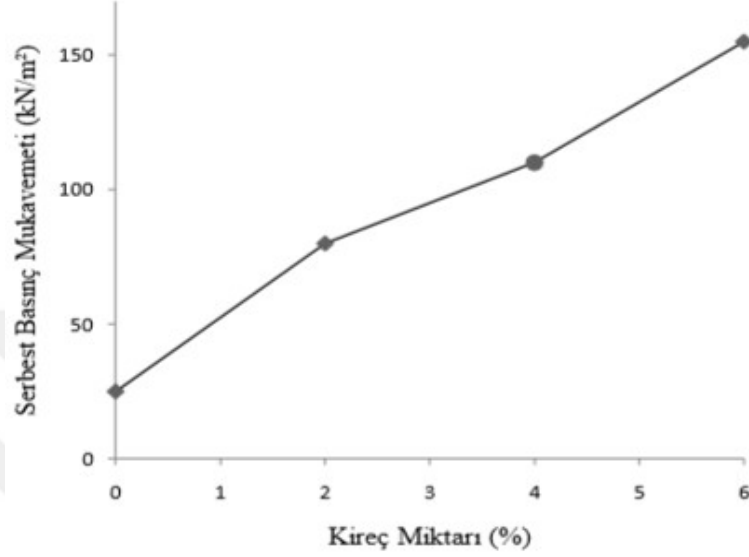
“Killi zeminlerde kireç stabilizasyonu ile kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel değişimler olur. Bunların sonucunda katyon değişimi, topaklaşma, çökeltme, yığılma ve çimentolaşma meydana gelir. Bu reaksiyonlardan bazıları ilk saatlerde başlar. Özellikle pozolanik reaksiyonlar zaman içinde oluşur. Uygun su muhtevasında ve sıcaklıkta yıllarca devam eder. Ayrıca kireç stabilizasyonunda hammaddenin kalite ve uzaklığına bağlı olarak değişen oranlarda %70'lere varan maliyet azalması da sağlamaktadır (Kızılcelik, 2010)”

Tez kapsamında kireç ile zemin iyileştirme uygulamasının zemin özelliklerinde meydana getirdiği değişimlerden kısaca bahsedilecektir. Özellikle zemine katılan kireç miktarı ile zeminin optimum su muhtevası artmakta, likit limit düşerken plastik limit ve rötre limit artmaktadır (Şekil 1.7). CBR (California Bearing Ratio) değerinde artış gözlenmekte özellikle uzun periyotta gözlenen bu artış daha fazla olmaktadır. Zemine katılan kireç zeminin mukavemet özelliklerinde de bazı değişimlere yol açmaktadır. Örneğin kireç katkısı ile zeminin serbest basınç mukavemeti, zemin çekme gerilmeleri ve kayma mukavemetinde artışlar sağlanmaktadır. Ayrıca zeminin şişme ve büzülme direncine karşı stabilitesi artmaktadır (Kavak, 1996).



Şekil 1.7. Zemin kıvam limitlerinin kireç oranı ile değişimi (Das, 2007)

Ayrıca Neubauer ve Thompson (1972), Vicksburg kili üzerinde yaptıkları kireç stabilizasyonu çalışmalarında kireç oranının, serbest basınç mukavemeti üzerinde etkisini, Şekil 1.8'de gösterildiği üzere incelemiştir. Çalışmalarında kireç katkı oranı arttıkça zemin serbest basınç mukavemetin de aynı şekilde arttığı gözlenmiştir.



Şekil 1.8. Kireç miktarının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (Neubauer ve Thompson, 1972)

Yukarıda kireç ile yapılan zemin iyileştirme çalışması ile zemin özelliklerine kazandırılan bazı olumlu katkıları şunlardır;

Zeminin optimum su muhtevası değerindeki artış ( $W_{opt}$ ) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (M.K.B.H.A) değerinde gözlenen düşüş: Zemine katılan kireç etkisi ile zeminin optimum su muhtevası artmakta ve K.B.H.A. ise düşmektedir. Bu durum özellikle zeminin daha düşük yoğunlukta sıkıştırılmasına neden olmaktadır.

Mukavemetteki değişimler: Kireçle yapılan zemin iyileştirme çalışmaları sonucunda elde edilen zemin yapısında önemli derecede mukavemet artışları gözlenmektedir. Bu mukavemet artışları zeminin dayanımını da arttırmaktadır. Yani doğal zeminlere göre zeminin, daha uzun sürede bozulma reaksiyonu göstermesine neden olmaktadır.

Plastisite indisinde düşüş: Kireç etkisi ile özellikle ince daneli zeminlerde zeminin plastisite indisi düşerken plastik limit artmaktadır.

Permeabilitedeki değişimler: Kireç katkısı zeminin permeabilitesini arttırmaktadır. Bunun nedenini Kızılçelik (2010) minerallerin çözünmesi, kation değişim reaksiyonları, organik akışkanlarla suyun yer değiştirilmesi sonucu kilin kurumması olarak ifade etmiştir.

Donma-çözünme etkisine karşı davranış: Özellikle soğuk hava koşullarının mevcut olduğu uygulamalarda kireç ile yapılan stabilizasyonun donma ve çözünme etkilerine maruz kalan zeminlere göre kireç iyileştirme yapılan zeminlerin daha dayanıklı olduğu yapılan literatür çalışmalarında belirlenmiştir.

#### 1.4. Kireç İle Zemin İyileştirme Yöntemleri

Uygulama açısından, kireç ile stabilizasyon yöntemi oldukça kolaydır. Laboratuvar testleri yardımıyla kireç ile zemin iyileştirme yöntemlerinden zeminin yapısına uygun karışım dizaynı ve uygulama derinliği bağlı olarak belirlenir (Şekil 1.9). Genellikle, çeşitli iş makineleri yardımıyla kireç yüzeysel olarak serilir ve keçi ayaklı silindir yardımıyla uygun ve tasarlanan derinliğe kadar karıştırılır. Karıştırma işlemi kil ve kireç birbiri içinde iyice karışana kadar yapılmalıdır. Ayrıca mukavemet ve dayanıklılığı maksimize edebilmek için uygun sıkıştırma ve yeterli kür zamanı uygulama için önemlidir. Genellikle kireç stabilizasyonunda kireç yüzeye serildikten sonra ön karıştırma yapılır ve laboratuvar testlerine göre dizayn edilen kür zamanı kadar bekletilir. Kür zamanı olarak adlandırılan bu süreç yaklaşık 24-48 (ya da daha fazla) saat arasında olmalıdır. Kür zamanı sona erdikten sonra kireç-kil karışımı ikinci kez karıştırılarak sıkıştırılır ve yerleştirilir (Şekil 1.10).



Şekil 1.9. Kirecin zemine uygulama yöntemleri



Şekil 1.10. Kireç ile zemin stabilizasyonu uygulaması (Wang ve Reston, 2007)



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Doğan (2009) tarafından yapılan çalışmada gerçek bir sahada dolgu imalatında dolgu yüksekliğine karşılık gelen tabakalar için taşıma gücü, yatak katsayısı ve deformasyon üzerinde etkili olan faktörleri incelemiştir. Dolgu tabakaları üzerinde 15 adet plaka yükleme deneyi yapılarak yük deformasyon değerleri belirlenmiştir. Daha sonra aynı plaka yükleme deneyleri Plaxis programı ile modellenerek karşılaştırılmıştır. Bu çalışma zemin parametrelerinde meydana gelen değişimlerin dolgu tabakaları üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmadır. Çalışmada zeminin farklı birim hacim ağırlığı (BHA) karşılık gelen deformasyon değerlerinin BHA'na göre değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada Plaxis plaka yükleme deneyinde kullanılan zemin dolgu malzemesinin poisson oranı değiştirildiğinde yükleme durumunda oluşan deformasyona olan etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda zemin birimleri taşıma gücü açısından değerlendirildiğinde dolgu yüksekliğinin zemin taşıma gücü üzerinde etkili olmadığı ancak killi zeminlerde dolgu yüksekliği arttıkça zeminin taşıma gücü ve oturma değerlerinin incelenmesi gerektiği belirtilmiştir.

Dipova ve Cangir (2013) tarafından yapılan çalışmada zayıf kayalarda ve hassas zeminlerde plaka yükleme deneyleri ile gerilme deformasyon ilişkilerin belirlendiği arazi uygulamalarından örnekler incelenerek yorumlanmıştır. Bu amaçla yapılan çalışma kapsamında Antalya-Lara ve Antalya Hurma'da yapılan örnekler kullanılmıştır. Çalışmada hassas zeminlerin mekanik davranışlarının araştırılmasında plaka yükleme deneyinin yararlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada plaka yükleme deneyleri ile temel altı seviyesi hakkında önemli verilerin elde edilebileceği ifade edilmiştir.

Uzuner (1988) tarafından yapılan çalışmada plaka yükleme deneyi hakkında yapılmış çalışmaları derleyerek özet bir çalışma hazırlanmıştır. Çalışmada plaka yükleme deneyinde yapılan çalışmaların doğru bir şekilde yapılabilmesi için dikkat edilmesi gereken hususları belirtmiştir. Ayrıca plaka yükleme deneyi ile zemin taşıma gücü, yatak katsayısı ve zemin oturmalarının tahmininin yapılabilmesi için kullanılmakta ve

denklemleri derleyerek bu deneyi etkileyen faktörleri belirlemiş, ölçüm ve uygulamalar sırasında yapılması gerekenler hakkında önerilerde bulunmuştur.

Teodoru ve Toma (2009) tarafında yapılan çalışmada plaka yükleme testinin oturma üzerindeki davranışı geoteknik parametrelere bağlı modellenmesi yapılmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar metodu ile elde edilen sonuçlar literatürde Mohr-Coulomb modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Model üzerinden elde edilen sonuçlara göre yatak katsayısının yükleme alanı ve yükün büyüklüğüne bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Çalışmada 16 adet rijit ve pürüzsüz plaka çapları 0,1-3 m arasında değişen plaka boyutları kullanılmıştır. Yapılan model analizlerinden elde edilen sonuçların literatür sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Kızılçelik (2010) tarafından yapılan çalışmada Kocaeli-Uzunçiftlik mevkiinden alınan yüksek plastisiteli ve yüksek su muhtevalı killi zemin üzerinde yapılan kireç ile iyileştirme çalışması incelenmiştir. Çalışmada zemine doğal su muhtevasında sönmüş ve sönmemiş kireç katılmıştır. %5 kireçli durum ve doğal durumda bulunan mukavemetler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca deneylerde kireç katkılı numunelerdeki boy kısalma oranı %15'ten %1,5'e indiği görülmüştür. Sönmüş ve sönmemiş kireç ile yapılan deney birbirine yakın sonuçlar ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Çalışmalardaki sonuca göre artan mukavemet artışları ve deformasyonlardaki azalma sayesinde yol alt yapısında kullanılabilir olan kireç karışımı bizlere yol kesitlerinde küçültme ve buna bağlı olarak maliyetlerde azalmayı sağlayabileceği belirtilmiştir. Sönmüş kireç katılan zemindeki kireç etkisi ile yüksek su muhtevası düşerek optimum su muhtevasına yaklaştığı ve zemin mukavemetinde artış görüldüğü belirtilmiştir.

Kavak ve diğ., (2011) tarafından yapılan çalışmada farklı dolgu tabakalarının yük-deformasyon karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla Plaxis programı kullanılarak modelleme yapılmış ve gerçek arazi şartlarında yapılan plaka yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Plaxis programı modelinden zeminin ortalama elastisite modülünün  $53 \text{ MN/m}^2$  ve poisson oranını 0,2 olduğu belirlenmiştir. İdeal sıkıştırılmış tabakalarda ilk yük-deplasman karakteristiklerinin farklı dolgu birimleri için doğal zeminlerde elde edilen değerlere yakın olduğu belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde uygun yük deplasman davranışının elde edebileceği sonucuna varılmıştır.



Doğan ve Gökay (2006) tarafından yapılan çalışmada Konya imento Fabrikası kireç taşı ocağı civarında yapılan plaka yükleme deneyleri ile zeminin yük-deplasman davranışı incelenmiştir. Bu alışma kayaç ve zemin birimleri üzerinde ayrı ayrı çalışma yapılmıştır. Çalışmada pekişmiş toprak zeminlerin bakir toprak zeminlere kıyasla daha yüksek taşıma kapasiteye ulaştığı görülmüştür. Daha sonra önceden yk uygulanmış kayaç yüzeylerinde de aynı testler yapılmış ve önceden yk uygulanan birimlerde yük taşıma kapasitesinin sıkışma etkisi ile arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca alışma kapsamında plaka yükleme testlerinin yapıldığı noktaların ilk yüklemelerden 30 dakika sonra 2. yükleme testleri uygulanmıştır. 2 testlerden elde edilen eğrilerin ilk testlerdekilerine kıyasla farklı olduğu ve nedeninin ilk yükleme testlerinde oluşan pekişme etkisi olduğu belirlenmiştir.

Yetimoğlu (2003) tarafından yapılan çalışmada kum zemine oturan temellerin taşıma kapasiteleri etkileyen parametreler Modifiye Duncan hiperbolik zemin modeli ile kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında laboratuvar deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar model kullanılarak geriye doğru tahmin edilmeye çalışılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde aksenal simetrik geometri kullanılmış ve elde edilen sayısal model ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada büyük taban basıncı değerlerine karşılık oturmalarda görülen önemli artışlar nümerik modelde elde edilmiştir.

Oh ve Vanapalli (2013)'nin yaptığı çalışmada plaka yükleme test sonucunun daha iyi anlaşılabilmesi için doymamış zeminlerdeki ölçek etkisi incelenmiştir. Daha nceki çalışmalar da ölçek etkisi oturma eğrisi normalize ederek ihmal edilebileceği ifade edilmiştir. Bu durum homojen, izotropik zeminler için uygun olduğu ifade edilmiştir. Doymamış zeminlerde bu yöntemin uygulanabilir olması için derinliğe bağlı su emme kapasitesinin belirlenmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Warmate (2014) Tarafından yapılan çalışmada Nijerya deltası Calabar bölgesinde yapılan plaka yükleme deney sonuçları incelenmiştir. Çalışmada plaka yükleme deney sonuçları istatistiği çıkarılarak gerçek sonuçlar la olan ilişkisi incelenmiş ve standart sapma değerinin aşırı derecede farklılık göstermediği ve gerçek değerlere yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Plaka yükleme testinin emniyetli zemin taşıma kapasitesi hesabında kullanılabilecek güvenli bir yöntem olduğu ifade edilmiştir.

Alrubaye ve diğ., (2016) Kaolin zeminlerin iyileştirilmesi üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada bir seri laboratuvar deneyi yapılmış olup zeminin şişme ve sıkışma kapasitesi üzerinde kireç katkısının etkisi incelenmiştir. İnceleme sonucunda zeminin likit limit ve plastisite indisin zemine katılan kireç katkısı ile düştüğü gözlemlenmiştir. Kireç etkisi ile zeminin kuru birim hacim ağırlığının düştüğü ifade edilmiştir. Ayrıca kireç yumuşak zeminin sıkışma kapasitesini arttırdığını bunu da hacimsel sıkışma katsayısını düşürerek sağladığı belirtilmiştir.

Bhagowati ve Borthakur, (2015) Kirecin ve düşük kalsiyumlu uçucu külün çevrimsel kurutma ve ıslatma etkileri altında şişme potansiyeline karşı davranışı incelenmiştir. Çalışmada %3-5 ve 8 oranında kireç, % 5-10-15 ve 20 uçucu kül kullanılmıştır. Numuneler üzerinde kurutma ve ıslatma etkisi numuneler tam şişme kapasitesine ulaşıncaya kadar ıslatılmış ve daha sonra başlangıç su muhtevasına kadar kurutulmuştur. Çalışmada kireç ve uçucu kül katkısının zeminin şişme potansiyelini azalttığı gözlemlenmiştir. Başlangıçta %19-30 arasında olan şişme potansiyeli art arda 4 kurutma ıslatma çevriminden sonra %7 ve %11,5 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Tüm numunelerden elde edilen sonuçlar dikkate alındığında en fazla şişme potansiyelindeki azalma ilk çevrim sonucunda ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca bu çalışma kireç ve uçucu kül stabilizasyonunun şişen zeminlerde çevrimsel kuruma ıslanma etkileri altında etkin sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Locat ve diğ., (1990) Yapılan çalışmada hassas killerde yapılan kireç stabilizasyonunun zemin mukavemet üzerindeki etkileri laboratuvar çalışmaları ile incelenmiştir. Çalışmada kireç katkısının zeminin su içeriği likit limit değerinin üzerinde olsa bile zamanla zemin mukavemetinde önemli artışlara neden olduğu belirtilmiştir. Zeminin su içeriği ve zemin mukavemeti arasındaki ilişki zamana bağlı olarak belirlenmiş ve laboratuvar çalışmalarında kullanılacak abağın modellenmesi yapılmıştır.

Joe (2015) tarafından yapılan çalışmada endüstriyel atıklar kullanılarak zeminin iyileştirilmesi hakkında çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada bakır curufu, çimento ve kireç kullanılarak iyileştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada çevreye dost bir şekilde endüstriyel atıkların tekrar değerlendirilmesi aynı anda kireçten yararlanılması açısından yararlı bir çalışmadır. Kullanılan endüstriyel atık – çimento – kireç karışımının

zeminin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında iyileştirdiği belirlenmiştir. Kireç kullanımının zeminin basınç mukavemetinde sıradan metotlara göre daha fazla artış gözlemlendiği belirlenmiştir. Bu çalışma endüstriyel atıkların kireç ile karıştırılarak zemin iyileştirme çalışmalarında verimli bir şekilde kullanabileceğini göstermiştir.

Altun (2010)'un ifade ettiği gibi zeminlerde iyileştirme yöntemlerinin seçimi ve uygulaması için temel altındaki zemin tabakasında sıvılaşma potansiyelinin olması, temel kazısı ile ilgili problemlerin olması, kabaran zemin birimlerinin mevcut olması, farklı oturma durumları, yetersiz taşıma gücü ve aşırı oturmalarının mevcut olacağı durumların etkili olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca hangi zemin iyileştirme yönteminin seçileceği birçok faktörden etkilendiği belirtilmiştir. Bunlar zemin özellikleri, yer altı suyu seviyesi, iyileştirme yapılacak alan ve derinlik, çevresel faktörler, mahiyet, çevre yapılarının konumunun ve gözetilen iyileştirme seviyesidir.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. Çalışma Alanının Zemin Özellikleri Ve Arazi Koşulları

Tez kapsamında bir sanayi tesisinin zeminin için tabakalı dolgu uygulaması yapılmıştır. Bu sanayi tesisinin inşa edileceği alan 65630 m<sup>2</sup>'dir. Arazide dolgu malzemesi olarak düşük plastisiteli silt kullanılmış ve dolgunun toplam yüksekliği  $(0,35 \times 19) = 6,65$  m olarak uygulanmıştır. Yapılan çalışma kapsamında zemin tabakaları arazide 29. ve 31. tabakalar olarak isimlendirilmiştir. Plaxis analizlerinde bu tabakalar arazideki gibi isimlendirilirken aynı zamanda bu tabakalar 29. tabaka A tabakası olarak 31. tabaka ise B tabakası olarak isimlendirilmiştir. Tez kapsamında bu 2 dolgu tabakası üzerinde deformasyon ve taşıma gücü incelemeleri yapılmıştır.

#### 3.2. Çalışma Kapsamında İzlenen Yöntemler

Arazide ilk önce bitkisel toprak sahadan uzaklaştırılmıştır. Daha sonra sıkıştırma için dolgu tabakaları 35 cm olacak şekilde verilen kotlar sayesinde ayarlanmıştır. Optimum su muhtevası sağlayacak şekilde tabakalar serilmiştir. Daha sonra arazi yoğunluk testinde sıkışma değeri Maksimum kuru birim hacim ağırlığının en az %95 ve üzeri değerine ulaşıncaya kadar sıkıştırılmıştır. Çalışma sırasında yapılan uygulamalardan görüntüler (Şekil 3.1-5)'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Dolgu malzemesinin serilmesi



Şekil 3.2. Kirecin zemine uygulanması



Şekil 3.3. Dolgu malzemesinin sıkıştırılması



Şekil 3.4. Kireç uygulanan zeminin durumu



Şekil 3.5. İyileştirilen zeminde arazi yoğunluk testi

### 3.3. Zemin Özelliklerinin Belirlendiği Deneyler

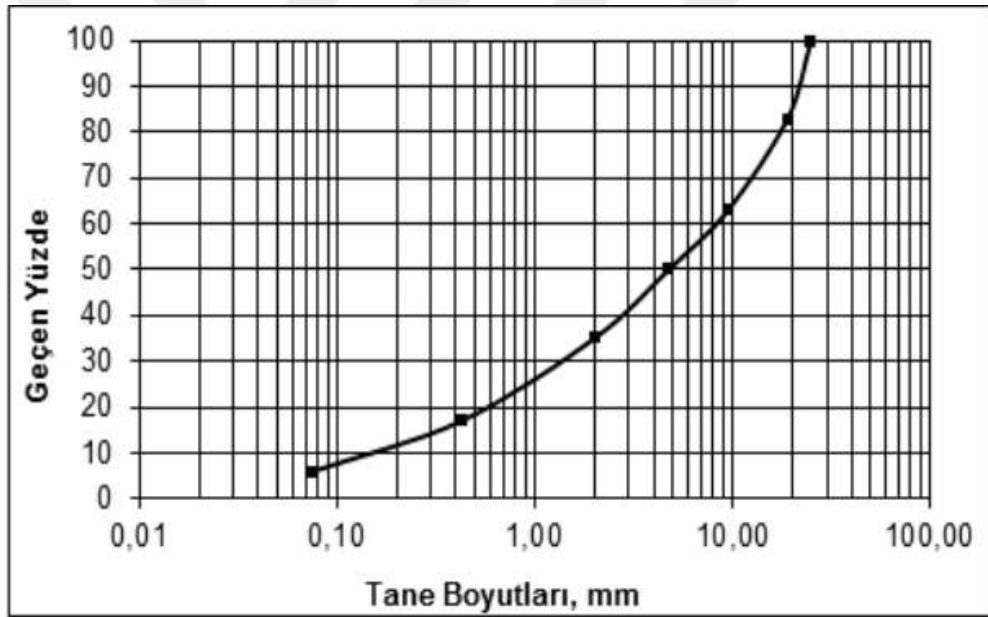
#### 3.3.1. Elek analizi ve su muhtevasının tayini

Elek analizi, zemini oluşturan danelerin büyüklüğünü ve zemindeki yüzdelerinin belirlenerek zemin sınıfını elde edilmesi amacıyla yapılır. Elek analizi, mekanik bir analizdir. Mekanik analiz; elek analizi ve ıslak analiz olarak ikiye ayrılır. Islak analiz ince daneli zeminlere uygulanırken elek analizi zeminin iri daneli bölümüne uygulanır.

Elek analiz çeşitli boyutlarda gözeneklere sahip elekler kullanılarak yapılır. Elek analizi için elekler yukarıdan aşağıya doğru gözenek çapları azalacak şekilde yerleştirilir. Daha sonra analizi yapılacak zemin numunesinden birkaç yüz gramdan birkaç kilograma kadar miktarlar alınarak etüv de kurutulur. Kurutulan zemin numunesi en üstteki elek üzerine bırakılır. Ya sarsma makinesi ile ya da elde sarsılarak numunenin bir alt eleğe geçmesini sağlamak için titreşim uygulanır. Daha sonra her bir eleğin üzerinde kalan zemin bölümleri alınarak tartılır. Her bir eleğin üzerinde kalan zemin numunesinin ağırlığı belirlendikten sonra toplam kütle içerisindeki yüzdesel oranları belirlenir. Elek analizinde esas amaç zemin gradasyon eğrisini elde etmektir. Bunun için de her bir elek için yüzde kalan değil yüzde geçen oranları kullanılır. Elek analizinde elde edilen gradasyon grafiğinde düşey eksen yüzde geçen (% geçen) yatay eksen ise dane çaplarını ifade eder.

Bazı durumlarda iri ve ince daneler birbirine yapışık halde bulunabilir. Bu durum çizilen gradasyon eğrisinin hatalı olmasına neden olabilir. Bu gibi durumlarda yıkamalı analiz (ıslak elek analizi) uygulanır. Bu analizde 200 no'lu elek üzerinde kalan malzeme yıkanarak bir miktarda topaklanmayı önleyici  $(NaPO_3)_6$  sodyum heksametafosfat katılır. Zeminin 200 no'lu elekten geçen kısmında ise sedimentasyon analizi uygulanır. Bu analizde 200 no'lu elekten geçen zeminden bir miktar alınır. Damıtık (saf su) ile karıştırılarak bir miktar çözelti hazırlanır ve çökmeye bırakılır. Danelerin sıvı içerisindeki çökme hızından yola çıkılarak 200 no'lu elek altında kalan malzemenin dağılımı belirlenir.

Şekil 3.6 'da zemin numunesi üzerinde yapılan elek analizinden elde edilen örnek gradasyon eğrisi aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.6. Elek analizinde elde edilen gradasyon eğrisi

Elek analizi sonucunda elde edilen gradasyon eğrisi ile zeminin sınıfı belirlenir. Bunun için günümüzde önerilen birçok sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. Bunlar; USCS (Unified Soil Classification System), Üçgen Sınıflandırılması, AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) ve TS (Türk Standardı) sınıflandırmalarıdır.

Zeminin su muhtevası;

Zemin su muhtevası zemin numunesi içerisindeki su miktarının dana miktarına oranıdır. Zeminin su muhtevası ile ilgili kıvam limitleri Atterberg limitleri kullanılarak

belirlenir. Bunlara aynı zamanlarda kıvam limitleri de denilmektedir. Kıvam limitleri likit limit (LL), plastik (PL) ve rötre (SL) limitleridir. LL zeminin kendi ağırlığı altında akabilme özelliği kazandığı en düşük su içeriğidir. PL zeminin bir cam yüzey üzerinde bir zemin  buğu haline getirilirken 3 mm çaplı zemin  buğuunda kırılmaların gözlendiği su içeriğidir. SL ise zeminde meydana gelen su kayıplarının zeminin hacminde artık bir azalma oluŐturmadıđı en düşük su içeriğidir.

Zeminin likit limiti Casagrande tarafından önerilen yöntem ve koni penetrasyon yöntemi ile belirlenir. Casagrande yönteminde 40 no'lu elekten geçen kurutulmuŐ zemin numunesinden bir miktar alınarak zemin numunesi üzerine yavaŐ yavaŐ su eklenerek karıştırılır. Daha sonra numuneden bir parça alınarak Casagrande cihazına yerleştirilir. Daha sonra oyuk açma bıçağı ile 2 mm taban genişliği olan bir boşluk oluŐturulur. Daha sonra Casagrande tabağı 10 mm yükseklikten standart plastik bir blok üzerine düŐürülür. Burada esas amaç açılan oyuğun kapanması için gerekli vuruş sayısının belirlemesidir. Bu iŐlem farklı su muhtevalarında en az 3 defa tekrarlanır. Daha sonra su muhtevası-vuruş sayısı grafiği çizilerek 25 vuruŐa karşılık gelen su muhtevası değeri zeminin likit limiti olarak belirlenir. Diğer yöntem olan koni penetrasyon yönteminde ise belli kütledeki konik u  5 s süre ile zemin numunesi içerisine batırılır. Bu deney farklı su muhtevaları için tekrarlanır ve su içeriği-batma miktarı grafiği çizilir. Bu grafikten de yola çıkılarak 20 mm batmaya karşılık gelen değer zeminin likit limit değer olarak belirlenir (Uzuner, 2012).

Zeminin plastik limiti ise kurutulmuŐ ve 40 no'lu elekten geçirilmiş zemin numunesinden bir miktar alınarak su katılır ve yoğurulur. Hazırlanan zeminden bir parça alınarak el yardımı ile cam plaka üzerinde yoğrulur. Yoğrulan zeminde 3 mm çapında zemin  buğu oluŐturulur. Zemin  buğuunda kopmaların meydana geldiği durumda numuneler alınarak su muhtevası belirlenir. Belirlenen su muhtevası değer zeminin plastik limitidir (Uzuner, 2012).

### **3.3.2. Zemin kompaksiyon deneyleri**

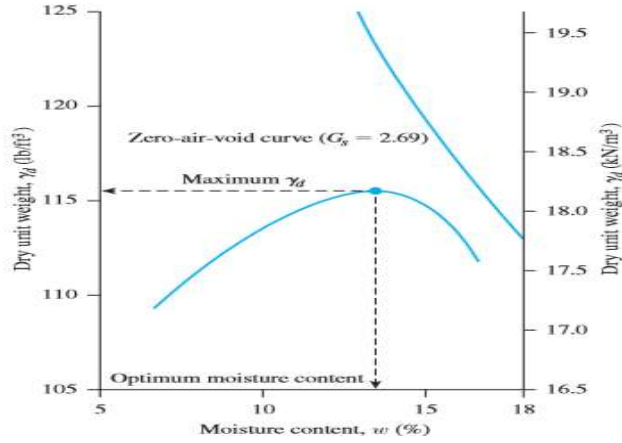
Kompaksiyon, zeminin tabakalar halinde seriler vibrasyon, tokmak ve silindir uygulanması gibi yöntemlerle sıkıştırılması iŐlemidir. Zemin daneler, daneler arasındaki boşluk ve boŐluklar arasındaki sudan oluşmaktadır. Teorikte su sıkıŐtırılmaz bir malzeme olduğu için kompaksiyon sırasında zemin danelerinin



birbirlerine daha fazla yaklaşmasının nedeni daneler arasındaki boşluğun azalması yani havanın dışarı çıkmasıdır (Uzuner, 2012).

Sıkıştırma işlemi mekanik enerjiyi gerektiren bir işlemdir. Uygulanan mekanik enerji ile zeminin kalınlığı azaltılarak daha yoğun hale getirilir. Zemin kompaksiyonunda önemli olan parametreler zeminin kuru birim hacim ağırlığı ( $\gamma_d$ ) ve optimum su muhtevası ( $w_{opt}$ )'dır. Bu parametreler çalışmanın yapıldığı zeminden alınan numune üzerinde yapılan laboratuvar kompaksiyon testleri ile belirlenir. Belirlenen bu değerler ayrıca analizde zeminin sıkıştırılması sırasında uygulanacak enerjinin de belirlenmesine yardımcı olur (Das, 2010).

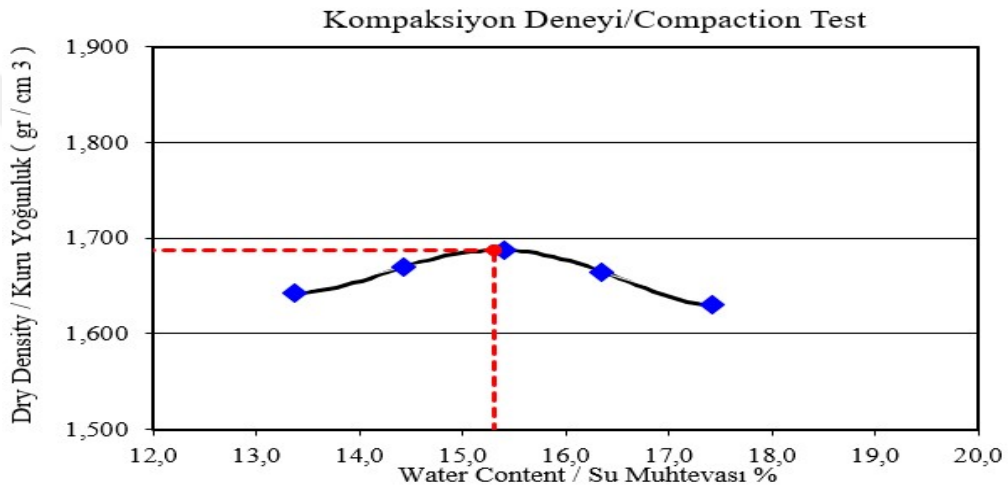
Zemin kompaksiyon enerjisi ile değişik su muhtevalarında sıkıştırılırken artan su muhtevasıyla zeminin kuru birim hacim ağırlığı artış göstermekte maksimum değere ulaştıktan sonra su muhtevası artsa bile kuru birim hacim ağırlığında düşüş meydana gelmektedir. Zeminin optimum su muhtevası Proctor testi ile belirlenir. Zaten laboratuvar çalışmalarında da esas amaç zeminin ulaşabileceği maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve bu değere karşılık gelen su muhtevası değerini belirlemektir (Şekil 3.7). Burada ifade edilen su muhtevası optimum su muhtevasıdır.



Şekil 3.7. Kompaksiyon deneyinden elde edilen eğri (Das, 2010)

Bu deneyde içi çapı 105 mm yüksekliği 115 mm olan metal silindirik bir kap kullanılır. Kapın kütlesi çalışmadan önce belirlenir. Bu kapın içerisine zemin numunesi üç tabaka halinde yerleştirilir. Yerleştirme sırasında 0,305 m yükseklikte serbestçe düşüşe bırakılan 2,5 kg kütleli bir tokmaktan yararlanır. Kapın içerisine zeminin rahatça yerleştirilebilmesi için ek parça kullanılır. Zemin tabakaları kap içerisine 25 vuruş ile

sıkıştırılarak yerleştirilir. Üç tabaka içinde aynı işlemler tekrarlanarak zemin yerleşimi tamamlanır. Daha sonra kullanılan ek parça çıkarılır. Daha sonra zemin ile birlikte kap tekrar tartılır. Kap içerisindeki zeminde bir miktar alınarak zeminin su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı belirlenir. Çalışma farklı su içeriklerine sahip zemin için tekrarlanarak ilgili zemin numunesinin su muhtevası ve kuru yoğunlukları belirlenir. Daha sonra farklı su muhtevalarına karşılık gelen birim hacim ağırlık değerleri tek bir grafik üzerinde işaretlenerek noktalar arasından geçen uygun eğri çizilir. Çizilen eğri üzerinde maksimum kuru yoğunluğa ya da kuru birim hacim ağırlığına denk gelen optimum su muhtevası değeri aşağıdaki (Şekil 3.8) gibi belirlenir.



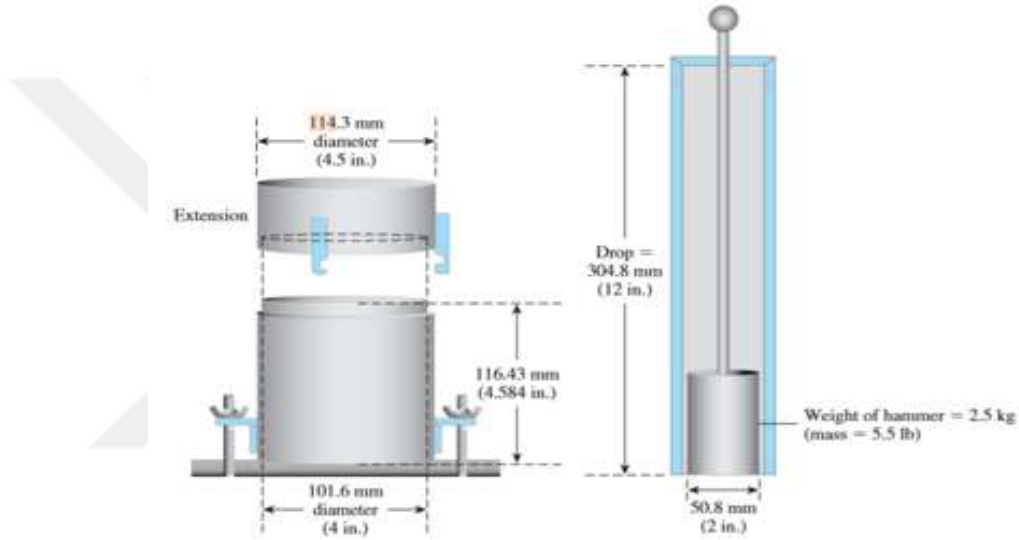
Şekil 3.8. Zeminin dolgu malzemesine ait kompaksiyon (Proctor) testi

Kompaksiyon testinden elde edilen eğriden maksimum kuru birim hacim ağırlığı değeri  $16,36 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenmiş ve bu değer %15,31 optimum su muhtevası elde edilmiştir.

Modifiye Proctor deneyinde ise 1000 ml hacimli kaptaki 4,5 kg tokmak kullanılarak 0,45 m yükseklikten serbest düşüşe bırakılan tokmak kullanılarak yapılır. Bu deney standart Proctor testinden farklı olarak 3 tabaka ile değil zeminin 5 tabaka halinde 60 vuruş ile sıkıştırılması ile yapılır. Deneylerin karşılaştırılması Tablo 3.1’de anlatılmakta, deneyin uygulanması ve kompaksiyon testlerinden elde edilen veriler (Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11)’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Standart ve Modifiye Proctor testlerinin karşılaştırılması (URL- 2)

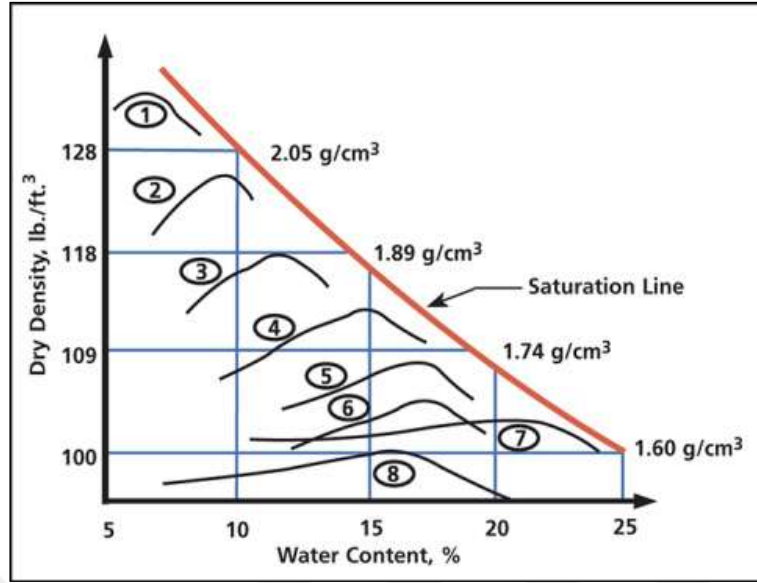
Test Detayı	Standart	Modifiye
Silindir çapı (mm)	102	102
Numune Yüksekliği (mm)	127,117'ye kesilir	127,117'ye kesilir
Katman Sayısı	3	5
Katman Başına Vuruş	25	25
Çekiç Ağırlığı (kg)	2,5	4,5
Çekiç Çapı (mm)	51	51
Çekiç Düşme Yüksekliği (mm)	305	457



Şekil 3.9. Standart Proctor testinde kullanılan ekipmanların boyutları (Das, 2010)



Şekil 3.10. Standart procter testinde laboratuvar çalışmasında bir örnek (Das, 2010)



Şekil 3.11. Farklı zeminler üzerinde yapılan kompaksiyon testlerinden elde edilen eğriler (URL- 3)

### 3.3.3. CBR deneyi

CBR deneyi Kaliforniya Taşıma Oranı olarak da bilinen bir deneydir. Bu deneyde CBR değeri çalışma yapılan zemin numune içerisinde penetrasyon pistonuna karşı zeminin gösterdiği penetrasyon direncinin standart malzemenin penetrasyon direncine oranlanmasıyla elde edilmektedir. Bu deneyde amaç taban ve alt temel malzemelerinin kompaksiyon kalitesinin ölçülmesidir (TS 5744).

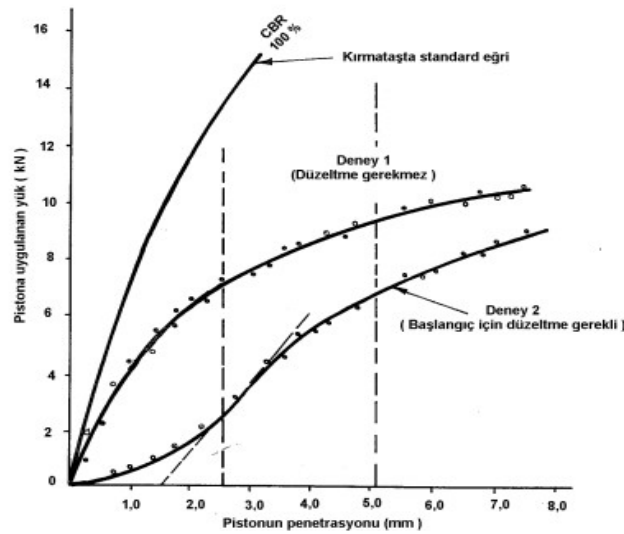
CBR deneyi, dane boyutu 20 mm'den küçük olan malzemeler için uygundur. Bu deneyde alanı 1935 mm<sup>2</sup> olan pistonun belirli bir hızla zemine itilmesiyle elde edilen, yük-penetrasyon denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu deney sonucunda elde edilen taşıma oranının %5'ten küçük olması beklenmektedir (TS 5744). Deney genellikle zeminin kazı anındaki doğal su içeriği ile yapılır. Değişik su içeriğine sahip zeminler için deney yapılmak istendiğinde numuneler açıkta kurutularak ve 4,75 mm'lik eleğin üstünde kalan toprakların ufalanmış olduğu zemine, istenilen miktarda su eklenerek elde edilir. Bu gibi durumlarda zemini çok iyi karıştırmak ve sıkıştırma işleminden önce kapalı bir kap içerisinde 24 saat bekletmek gerekmektedir.

Deneyin yapılış aşamalarına da kısaca değinecek olursak kullanılan kalıp taban plakası takılmış ve üst yüzeyi açık kalıp içerisine konulan zemin numunesi basınç plakası altına yerleştirilir. Daha sonra zemin numune üzerine kademeli olarak yükler

uygulanarak ölçümler yapılır. Penetrasyon pistonu numunenin yüzeyine oturtulur ve dakikada 1,20 mm'lik bir hızla zemine itilir. Buradan yola çıkarak pistondan uygulanan yük değerleri ve bu değerlere karşılık gelen değerler (yük-penetrasyon) kayıt altına alınır. Eğer zemin numunesinin her iki yüzeyinde de CBR değeri belirlenmek istenildiğinde taban plakası kalıbın altından alınarak üst yüzüne yerleştirilir ve numunenin diğer yüzü için de aynı işlemler tekrarlanır. Deneyden sonra zemin numunesinin alt ve üst yüzeylerinden numuneler alınarak TS 1900-1'e göre zeminin su muhtevası belirlenir.

Yük-penetrasyon değerleri için grafik çizilir. Çizilen eğri daha sonra gerekli durumlarda düzeltilir (örneğin eğrinin başlangıç kısmı yukarı doğru iç bükeyse). Bunu durumu sağlayabilmek için en büyük eğim noktasına bir teğet doğrusu çizilir. Çizilen doğru penetrasyon eksenini kesecek biçimde uzatılarak başlangıç noktası ile çakışacak biçimde kaydırılır. Yeni çizilen eğri CBR oranının belirleneceği düzeltilmiş eğridir (Şekil 3.12).

Çizilen eğride CBR oranının hesaplanması şu şekilde yapılır. CBR oranı hesaplanırken standart malzemedeki 2,5 mm ve 5 mm'lik penetrasyona karşılık gelen değerler kullanılır. Bu nedenle çalışmanın yapıldığı zemin numunesi için de bu değerlere karşılık gelen penetrasyon yükleri önemlidir. Zemin numunesinde belirlenen değer standart malzemeye ait değere oranlanarak zemin numunesinin CBR değeri belirlenmiş olur.



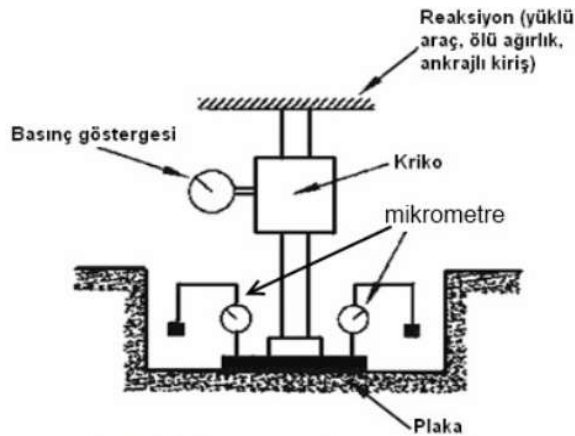
Şekil 3.12. CBR deneyinde elde edilen eğri örnekleri

### 3.3.4. Plaka yükleme deneyi

Tez kapsamında plaka yükleme deneyi ve yapılış aşamalarına kısaca değinilecektir. Plaka yükleme deneyi zeminin taşıma gücünü belirlemek amacıyla yapılan bir arazi deneyidir. Bu deney rijit bir plakaya uygulanan yük ile birlikte, plakanın yapacağı oturmanın ve göçmenin ölçülmesine dayanmaktadır. Deneyin uygulanması sırasında 30 cm çapında ve 2,5 cm kalınlığında dairesel formda çelik plaka kullanılmaktadır. Plaka, zemin yüzeyine düzgün bir biçimde yerleştirilir. Plaka oturmalardan etkilenmeyecek şekilde mesnetlenir.

Deneyin uygulama aşamasında deplasman ölçen hassas saat plaka oturmalarının ölçecek biçimde konumlandırılır. Daha sonra plakanın yüklenmesi işlemine geçilir. Burada plakaya ve dolaylı olarak da zemine kademeli bir şekilde yükler uygulanır (Şekil 3.13). Uygulanan her yük kademesinde meydana gelen oturmalar sona erinceye kadar beklenir.

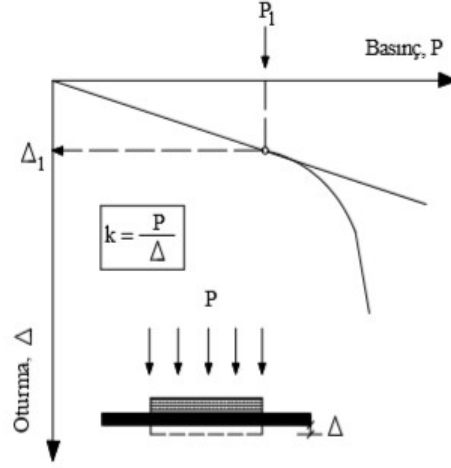
Deney istenilen gerilme seviyelerine veya sistemin ulaşabileceği değerlere yakalandığında son verilir. Bu deneyde yükler istenildiğinde kademeli olarak da uygulanabilmektedir. Deneyde seçilecek reaksiyonel kuvvet çalışmada kullanılan gerilme seviyelerine uygun seçilmektedir.



Şekil 3.13. Plaka yükleme deneyinin şematik görünümü (Yıldırım, 2002)

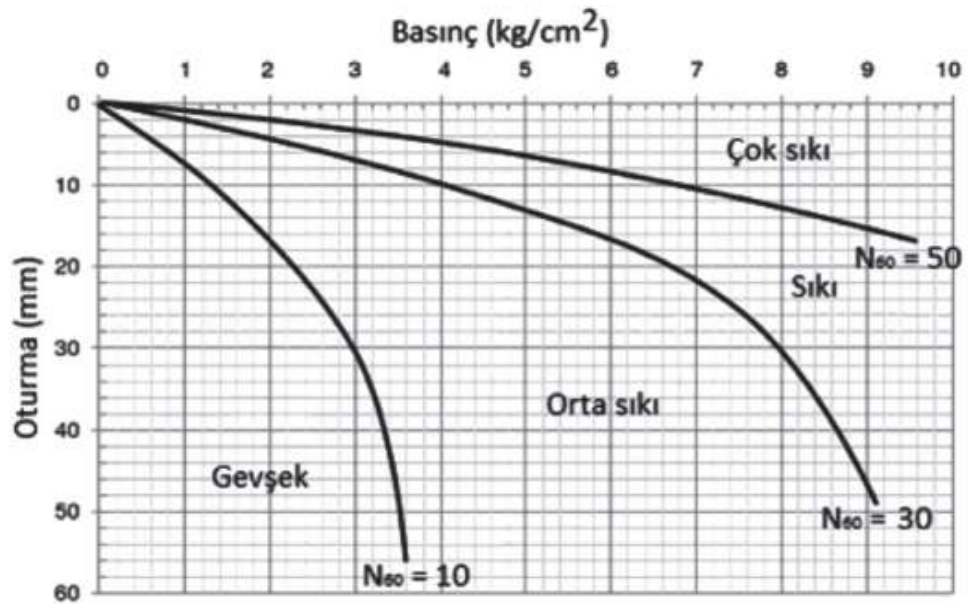
Deney sırasında plakanın yerinde oynamayacak şekilde ve uygulanan gerilmenin sabit kalması kontrol edilmelidir. Ölçüm cihazının kalibrasyonu yapılmış ve yükleme ve boşaltma sırasında oluşan deformasyonları doğru ölçebilmelidir. Plaka yükleme

deneyinde yük kademeleri için geçen süre zemin tabakalarının özelliklerine göre değişmektedir. Örneğin küçük yük kademeleri için oturmanın sabit hale gelmesi 10-15 dakika içerisinde gerçekleşirken bazı durumlarda ise bu süre 1 saatin üzerine çıkabilmektedir.



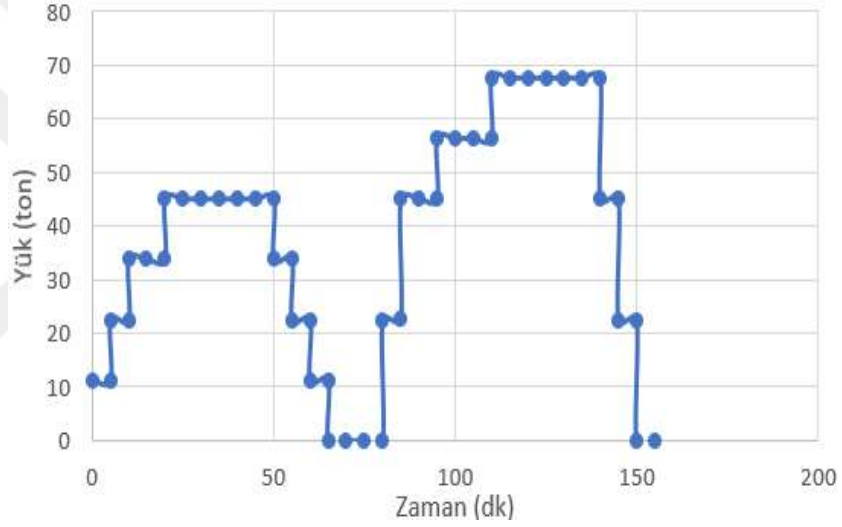
Şekil 3.14. Plaka yükleme deneyinden elde edilen yük - oturma eğri (Kaya, 2011)

Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de plaka yükleme deneyine ait yük-oturma eğrileri verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi zemin tipi ve sıklığının değışmesi plaka yükleme deneyinden farklı sonuçların elde edilmesine yol açtığı görülmektedir. Bu durum plaka yükleme deneyinden elde edilen sonuçların zeminin özelliklerine bağılı olduğunu doğrulamaktadır.

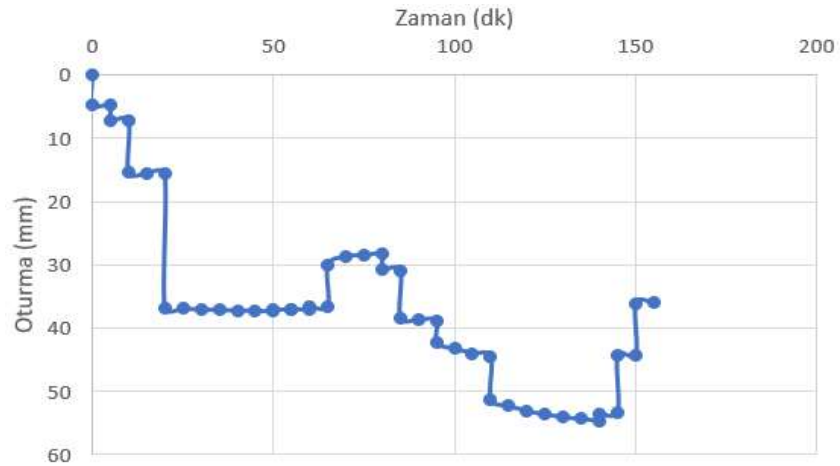


Şekil 3.15. Örnek plaka yükleme deney sonucu (Dipova ve Cangir, 2013)

Plaka yükleme deneyi bir arazi deneyi olup zemin taşıma gücü ve oturma değerleri doğrudan ölçülebilmektedir. Bu deneyde kullanılan düzeneği açıklamak gerekirse zeminin üzerine oturan rijit bir plaka, üstte yükün uygulandığı bir ölü yük ve bu yükü alt plakaya aktaran bir kriko ve oturma miktarını ölçen komparatörlerden oluşmaktadır. Uygulanan yük ile plakanın yapacağı oturma davranışı komparatör saatleri ile belirlenir. Elde edilen veriler doğrultusunda yük-zaman, oturma-zaman, yük-oturma ilişkilerinden zeminin emniyetli taşıyabileceği yük bulunur (Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18). Bu deney sadece doğal zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesi amacıyla değil aynı zamanda demiryollarında, karayolunda ve havaalanlarında dolgu sıkıştırma kontrolü amacıyla da kullanılmaktadır.

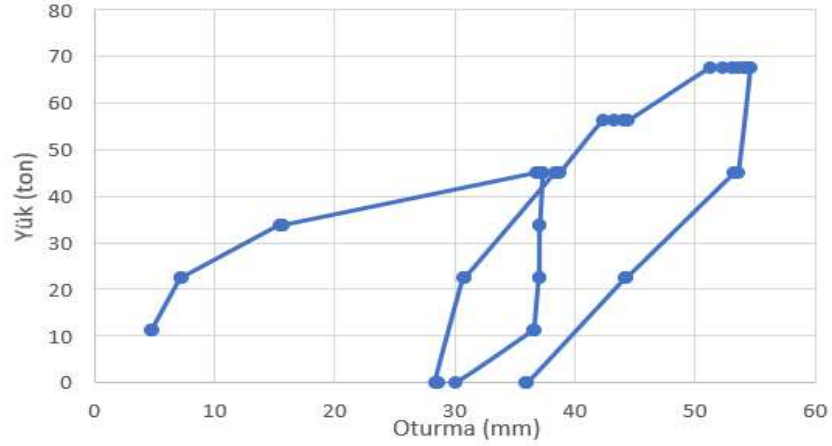


Şekil 3.16. Plaka yükleme deneyi yük-zaman grafiği



Şekil 3.17. Plaka yükleme deneyi oturma-zaman grafiği





Şekil 3.18. Plaka yükleme deneyi yük-oturma grafiği

Plaka yükleme deneyi yapı genişliğinin 4 katı derinliğe kadar zeminin homojen olduğu, örselenmemiş zemin örneği alınmadığı veya çok güç alınabildiği durumlarda başvurulan bir deneydir. Bu deneyin avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Dipova ve Cangir, 2013).

“Bunlardan en önemlisi, etki derinliği problemidir. Plaka yükleme deneyinde etki derinliği, plaka çapının 2 katıyken, temellerin yük etki alanları çok büyük olduğundan homojen olmayan zeminlerde sonuçlar yanıltıcı olabilmektedir. Kumlu zeminlerde taşıma gücü temel boyutlarına göre değişiklik gösterdiğinden, yapılan plaka yükleme deneyi sonuçları, plaka boyutları ve temel boyutları arasındaki ölçek farkından dolayı yanıltıcı olabilir. Killi zeminlerde ise taşıma gücü temel boyutlarından bağımsız olduğu için, plaka yükleme deneyi gerçek temel için kullanılabilir fakat kısa süreli bir deney olduğu için, suya doymuş kil zeminlerde oturmaya bağlı taşıma gücü hesabı yapılması uygun değildir” (Dipova ve Cangir, 2013).

Plaka yükleme deneyi ile oturma-gerilme ilişkisi elde edilerek buradan uygun denklemler ile zemin taşıma gücü, zeminin emniyetli taşıma kapasitesi, yatak katsayısı, temel taban basıncı ve deformasyon modülü bulunabilmektedir. Deney, temel taban düzeyinde, kare veya daire biçimli çelik bir plakanın, adım adım yüklenmesi ve yükler altında, plakanın oturmasının ölçülmesi olarak özetleyebiliriz. Örnek olarak Şekil 3.19’da deney düzeneği görmektedir.

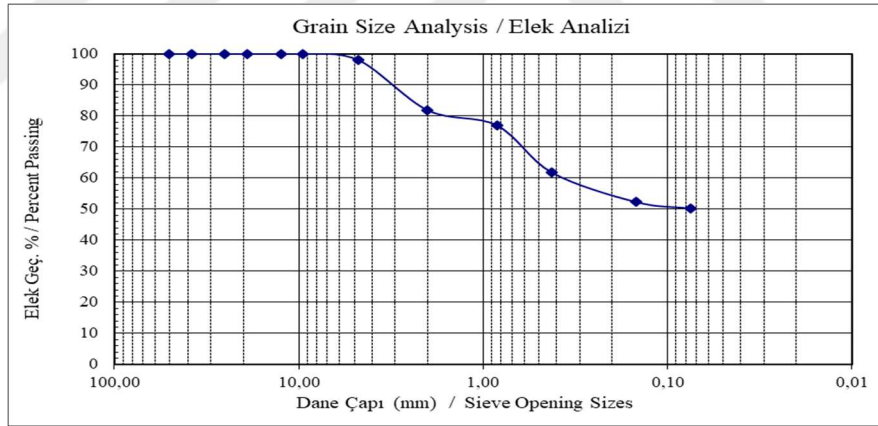


Şekil 3.19. Plaka yükleme deneyi uygulama örneği

### 3.4. Testlerden Elde Edilen Bulgular

Dolgu tabakasının özellikleri (B tabakası);

Dolgu zeminde yapılan deneylerden elde edilen veriler bu bölümde yer verilmiştir. Bu zemin biriminden alınan numune üzerinde yapılan elek analizinde zeminin USCS sınıflandırılmasına göre ML (düşük plastisiteli silt) olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Zeminde kullanılan dolgu malzemesinin elek analizi

Tablo 3.2. Zemin su muhtevası tayini

Zeminin özellikleri	Kuru	Islak
Moisture can no. / Kap no	1	2
Mass of can / Kap ağırlığı gr.	81,00	81,00
M. wet soil+can / Islak Z.+Kap g	455,80	227,80
M. dry soil+can / Kuru Z.+Kap g.	399,60	202,00
Mass of water / Su ağırlığı gr.	56,20	25,80
Mass of soil / Zemin ağırlığı gr.	318,60	121,00
Water c. w % / Su muht. W % gr.	17,64	21,32

Tablo 3.3. Zemin birim hacim ağırlığı tayini

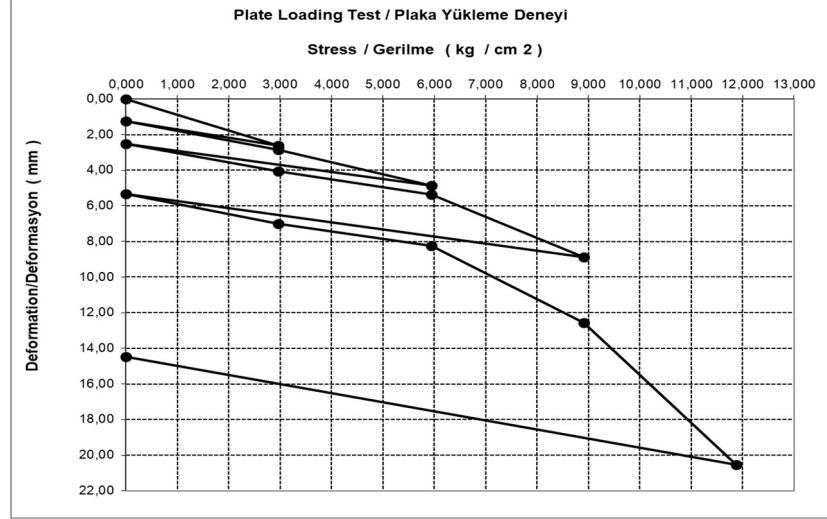
Mass of soil+mold/kalıp + Zemin g	10806	11018
Mass of mold / Kalıp ağır gr.	6754	6754
Mass of soil / Zemin gr. Mws	4052	4264
Wet unit wgt / Doğ. BHA kN/m <sup>3</sup>	18,82	19,80
Dry unit wgt. / Kuru kN/m <sup>3</sup> kuru	15,99	16,31

Dolgu tabakasına ait birim hacim ağırlıklarını belirlediğimizde ise Tablo 3.3’de verilen değerler elde edilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi kireçli malzemenin doğal birim hacim ağırlığı 19,80 kN/m<sup>3</sup> kuru birim hacim ağırlığı ise 16,31 kN/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Zemin de rölatif kompaksiyon değerinin %99,1 bulunmuştur. Nükleer metot kullanılarak zeminin su muhtevası değerinin %21,32 olduğu tespit edilmiştir. (Tablo 3.2).

Tabaka üzerinde yapılan plaka yükleme testi DIN (18134) göre yapılmış aşağıdaki sonuçlar Tablo 3.4’de elde edilmiştir. 30 cm çaplı plaka kullanılarak yapılan deneyde 20,52 mm kadar oturma elde edilmiştir. Çalışmada güvenlik katsayısı (GS) 3.00 olarak alınmıştır.

Tablo 3.4. B tabakanın plaka yükleme test sonuçları

Basınç (Bar)	Kuvvet düz(kg)	Defor. Oku. 1 (mm)	Defor. Oku. 2 (mm)	Defor. Oku. 3 (mm)	Defor. Oku. Ort.(mm)	Gerilme (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
60	2100	2,50	2,60	2,72	2,61	2,970
0	0	1,12	1,35	1,26	1,24	0,000
60	2100	2,74	2,82	3,00	2,85	2,970
120	4200	4,70	4,78	5,15	4,88	5,939
0	0	2,31	2,64	2,60	2,52	0,000
60	2100	3,89	4,01	4,28	4,06	2,970
120	4200	5,19	5,27	5,65	5,37	5,939
180	6300	8,65	8,76	9,25	8,89	8,909
0	0	5,05	5,35	5,56	5,32	0,000
60	2100	6,77	6,95	7,32	7,01	2,970
120	4200	7,98	8,14	8,57	8,23	5,939
180	6300	12,34	12,47	12,90	12,57	8,909
240	8400	20,38	20,44	20,73	20,52	11,879
0	0	14,21	14,44	14,80	14,48	0,000



Şekil 3.21. Dolgu malzemesi üzerinde yapılan plaka yükleme deneyinin gerilme-deformasyon ilişkisi

Yapılan çevrimsel plaka yükleme test sonucunda yaklaşık 12,00 kg/cm<sup>2</sup> gerilme altında 20,52 mm kadar oturma değerleri elde edilmiştir (Şekil 3. 21).

Tablo 3.5. Zemin şişme miktarının (B tabakasının) zamana bağlı değişimi

Tarih	Saat	Şişme (mm)
8.12.2017	0	0,00
9.12.2017	24	0,40
10.12.2017	48	0,45
11.12.2017	72	0,46
12.12.2017	96	0,46

Dolguda kullanılan kireçli malzeme üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.5’de verilmiştir. Şişme değeri ise %0,39 olarak bulunmuştur.

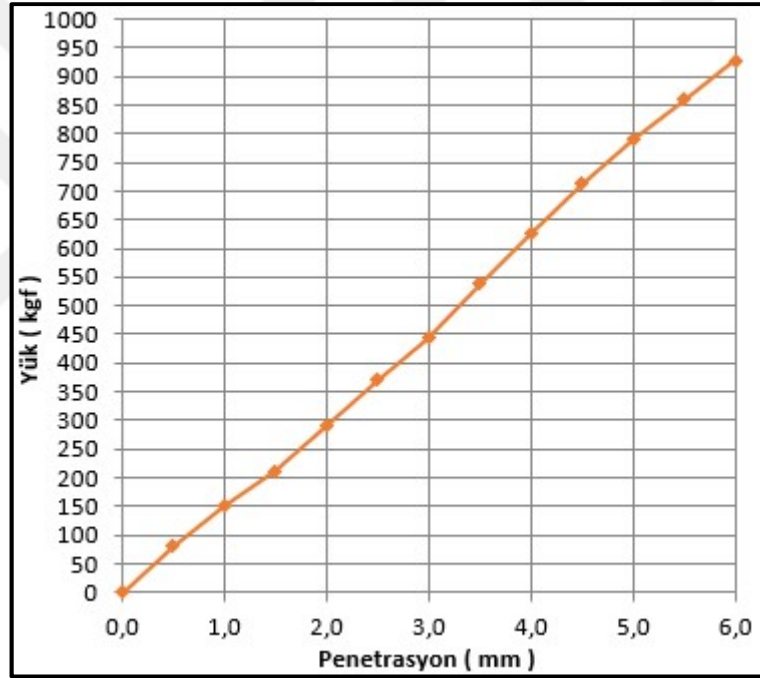
Tablo 3.6. B tabakanın CBR sonuçları

Penetrasyon (mm)	Ters Yükleme (kgf )
0	0
0,50	81
1,00	150
1,50	211
2,00	291
2,50	370
3,00	444

Tablo 3.6. (Devam) B tabakanın CBR sonuçları

3,50	538
4,00	625
4,50	712
5,00	790
5,50	860
6,00	928

Şekil 3.22’de dolguda kullanılan kireçli malzeme üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen sonuçlar yapılan CBR deneyinde malzemenin CBR değeri %38,73 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.22. B tabakası için CBR deney eğrisi

Şekil 3.22’de CBR deneyinde elde edilen yük-penetrasyon değerlerinin grafik üzerinde gösterilmiştir. Tablo 3.7’de ise B tabakasında yapılan arazi yoğunluk testi sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 3.7. Dolgu tabakası (B tabakası) için nükleer yoğunluk test sonuçları

Test No	Islak BHA (kN/m <sup>3</sup> )	Su Muhtevası (%)	Kuru BHA (kN/m <sup>3</sup> )	Rölatif Sıkışma (%)	Koordinat	Tabaka
1	19,29	12,70	17,12	98,50	205. Ada	B Tabakası
2	19,73	13,10	17,44	100,40		
3	19,30	13,40	17,02	97,90		
4	18,94	10,40	17,16	98,70		
5	18,10	8,40	16,70	96,10		
6	18,27	12,40	17,14	98,60		
7	18,20	11,70	16,29	93,70		
8	19,53	12,00	17,44	100,30		
9	18,86	9,40	17,24	99,20		
10	18,89	11,50	16,94	97,50		
11	19,41	13,40	17,12	98,50		
12	18,59	12,40	16,54	95,20		
13	18,02	7,8	16,72	96,20		
14	19,32	12,20	17,22	99,10		

Tablo 3.8’de ise CBR deneyinden elde edilen sonuçlar özet olarak verilmiştir. Tablo 3.9’da ise B tabakasında yapılan tüm laboratuvar ve arazi testlerinden elde edilen sonuçlar toplu bir şekilde verilmiştir.

Tablo 3.8. Dolgu tabakası (B tabakası)’nın CBR test sonuçlarının özeti

Zemin Özellikleri	Düz Yükleme	
Penetrasyon (mm)	2,50	5,00
Standart Yükleme	1360	2040
Yük (kgf)	370	790
CBR Değeri (%)	27,21	38,73
Şişme (%)	0,39	
Proje CBR Değeri (%)	38,73	

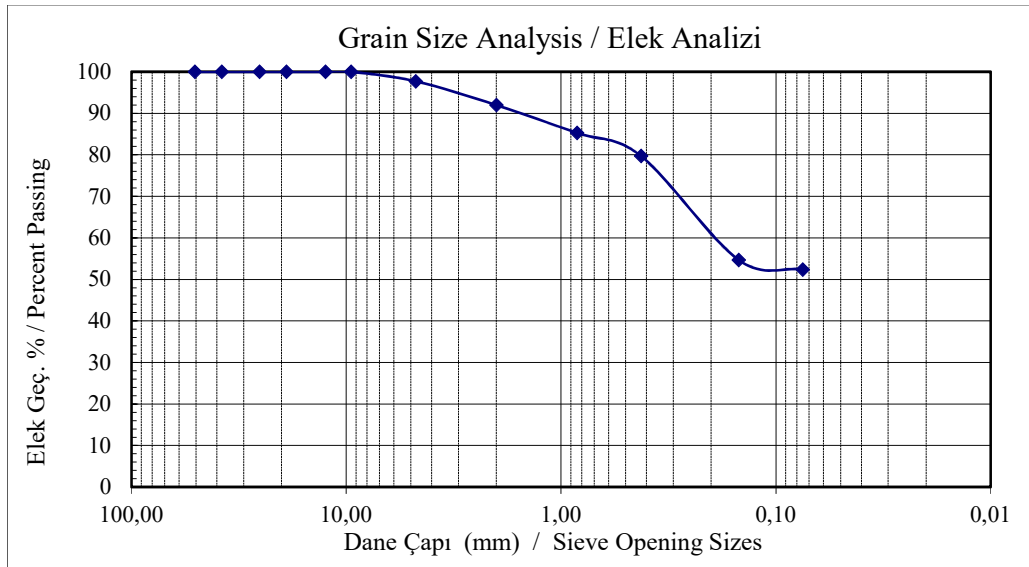
Tablo 3.9’da B tabakasında yapılan tüm laboratuvar ve arazi testlerinden elde edilen sonuçlar toplu bir şekilde verilmiştir.

Tablo 3.9. Dolgu malzemesine (B tabakasına) ait özellikler

Zemin Sınıflandırılması	
Zemin Tanımı- USCS	ML
Kıvam Limitleri	
PL (%)	NP
LL (%)	NL
PI (%)	NP
Elek Analizi- USCS	
Taş (Blok) (>76,2 mm) (%)	0
Çakıl (76,2 mm – 4,76 mm) (%)	2,01
Kum (4,76 mm – 0,074mm) (%)	47,66
Silt ve Kil (<0,074mm) (%)	50,2
Atterberg Deneyi	
Su muhtevası (%)	16,38
Arazi ve Laboratuar CBR Deneyleri	
Yaş CBR Değeri (%)	38,73
Nükleer Arazi Yoğunluk Testi	
Optimum Su Muhtevası (%)	10,39
Kompaksiyon Parametreleri	
M.K.B.H.A. – Modifiye Proctor (kN/m <sup>3</sup> )	16,36
Optimum Su Muhtevası (%) – Modifiye Proctor	15,31

Kireçli birimin altındaki zemin tabakası (A tabakası);

Dolgu altı zeminde ait deneylerden elde edilen veriler bu bölümde yer verilmiştir. Bu zemin biriminden alınan numune üzerinde yapılan elek analizinde zeminin USCS sınıflandırılmasına göre ML (düşük plastisiteli silt) olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Zeminde kullanılan dolguda malzemenin elek analizi

Tablo 3.10. A tabakasının zemin su muhtevası tayini

Zeminin özellikleri	Kuru	Islak
Moisture can no. / Kap no	1	2
Mass of can / Kap ağırlığı gr.	51,00	51,00
M.wet soil+can / Islak Z.+Kap g	357,80	234,00
M. dry soil+can / Kuru Z.+Kap g.	312,60	200,40
Mass of water / Su ağırlığı gr.	45,20	33,60
Mass of soil / Zemin ağırlığı gr.	261,60	149,40
Water c. w % / Su muht. W % gr.	17,28	22,49

Tablo 3.11. A tabakasının zemin birim hacim ağırlığı tayini

Mass of soil+mold/kalıp + Zemin g	10382	10528
Mass of mold / Kalıp ağır gr.	6378	6378
Mass of soil / Zemin gr. Mws	4004	4150
Wet unit wgt / Doğ. BHA kN/m <sup>3</sup>	18,95	19,64
Dry unit wgt / Kuru kN/m <sup>3</sup> kuru	16,16	16,03

Bu tabakaya ait birim hacim ağırlıklarını belirlediğimizde ise Tablo 3.11’de verilen değerler elde edilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi kireçli malzemenin doğal birim hacim ağırlığı 19,30 kN/m<sup>3</sup> kuru birim hacim ağırlığı ise 16,10 kN/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Zemin de rölatif kompaksiyon değerinin %97,6 bulunmuştur. Nükleer metot kullanılarak zeminin su muhtevası değerinin %22,49 olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.10).

Tabaka üzerinde yapılan plaka yükleme testi DIN (18134) göre yapılmış aşağıdaki sonuçlar Tablo 3.12’de edilmiştir. 45 cm çaplı plaka kullanılarak yapılan deneyde 4,02 mm kadar oturma elde edilmiştir. Çalışmada güvenlik katsayısı 3,00 alınmıştır.

Tablo 3.12. A tabakasının tabi zemin üzerinde yapılan plaka yükleme deneyi (DIN 18 134)

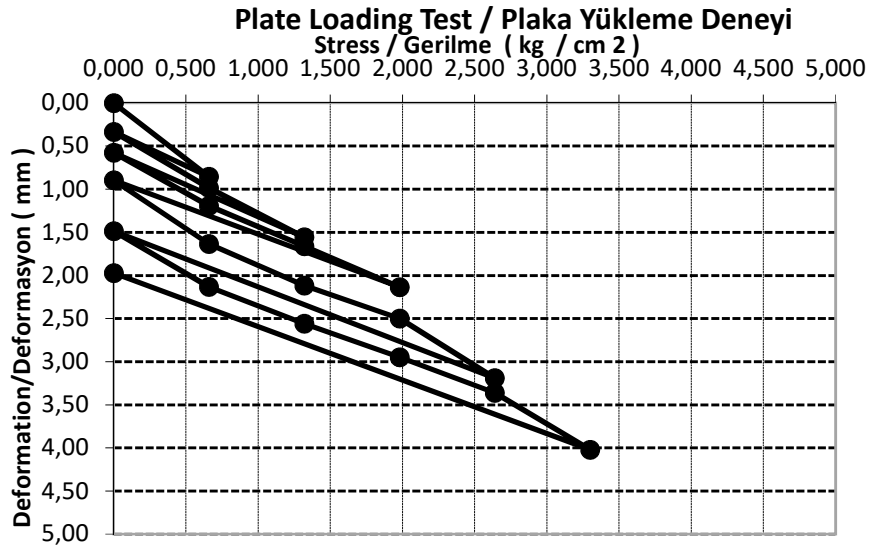
Basınç (Bar)	Kuvvet düz.(kg)	Defor. Oku. 1 (mm)	Defor. Oku. 2 (mm)	Defor. Oku. 3 (mm)	Defor. Oku. Ort.(mm)	Gerilme (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
30	1050	0,79	0,93	0,84	0,85	0,660
0	0	0,28	0,42	0,31	0,34	0,000
30	1050	0,97	1,00	0,98	0,98	0,660



Tablo 3.12. A tabakasının tabi zemin üzerinde yapılan plaka yükleme deneyi (DIN 18 134)

60	2100	1,45	1,63	1,59	1,56	1,320
0	0	0,52	0,68	0,53	0,58	0,000
30	1050	1,18	1,23	1,17	1,19	0,660
60	2100	1,55	1,74	1,69	1,66	1,320
90	3150	2,05	2,19	2,17	2,14	1,980
0	0	0,86	0,98	0,85	0,90	0,000
30	1050	1,51	1,74	1,65	1,63	0,660
60	2100	2,09	2,14	2,12	2,12	1,320
90	3150	2,46	2,54	2,50	2,50	1,980
120	4200	3,14	3,21	3,22	3,19	2,640
0	0	1,40	1,61	1,45	1,49	0,000
30	1050	2,07	2,20	2,12	2,13	0,660
60	2100	2,50	2,59	2,58	2,56	1,320
90	3150	2,90	2,98	2,96	2,95	1,980
120	4200	3,30	3,40	3,38	3,36	2,640
150	5250	3,96	4,01	4,09	4,02	3,300
0	0	1,88	2,10	1,94	1,97	0,000

Yüklemeye testinde elde edilen yük-deplasman eğrisi Tablo 3.12’de verilmiştir. Yapılan çevrimsel plaka yükleme test sonucunda yaklaşık 3,25 kg/cm<sup>2</sup> gerilme altında 4,02 mm’ye kadar oturma değerleri elde edilmiştir (Şekil 3. 24).



Şekil 3.24. Granüler dolgu malzemesi üzerinde yapılan plaka yükleme deneyinin gerilme-deformasyon ilişkisi

Dolguda kullanılan kireçli malzeme üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.13’de verilmiştir. Şişme değeri ise %0,14 olarak bulunmuştur.

Tablo 3.13. Zemin şişme miktarının (A tabakasının) zamana bağlı değişimi

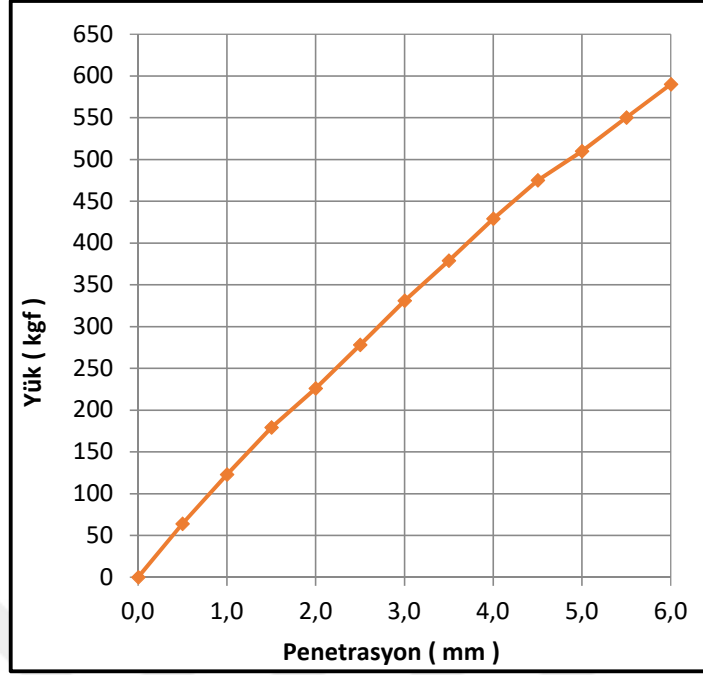
Tarih	Saat	Şişme (mm)
8.12.2017	0	0,00
9.12.2017	24	0,05
10.12.2017	48	0,12
11.12.2017	72	0,14
12.12.2017	96	0,14

Dolguda kullanılan kireçli malzeme üzerinde yapılan CBR deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.14’de verilmiştir. Yapılan CBR deneyinde malzemenin CBR değeri %25 olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.14. A tabakasının CBR sonuçları

Penetrasyon ( mm )	Ters Yükleme ( kgf )
0	0
0,50	64
1,00	123
1,50	179
2,00	226
2,50	278
3,00	331
3,50	379
4,00	429
4,50	475
5,00	510
5,50	550
6,00	590

Şekil 3.25’de CBR deneyinde elde edilen yük-penetrasyon değerlerinin grafik üzerinde gösterilmiştir. Tablo 3.15’de ise A tabakasında yapılan arazi yoğunluk testi sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 3.25. Dolgu malzemesi yaş CBR deneyine ait grafik

Tablo 3.15. Dolgu tabakası (A tabakası) için nükleer yoğunluk test sonuçları

Test No	Islak BHA (kN/m <sup>3</sup> )	Su Muhtevası (%)	Kuru BHA (kN/m <sup>3</sup> )	Rölatif Sıkışma (%)	Koordinat	Tabaka
1	17,76	9,60	16,20	95,80	205. Ada	A Tabakası
2	18,99	16,20	16,34	96,60		
3	18,23	14,00	15,99	94,60		
4	18,77	15,20	16,29	96,4		
5	18,73	14,30	16,39	96,90		
6	18,25	13,10	16,14	95,40		
7	18,32	13,20	16,18	95,70		
8	18,89	12,40	16,81	99,4		
9	18,95	10,80	17,10	101,10		
10	19,07	14,70	16,63	98,30		
11	18,84	12,70	16,72	98,90		
12	18,24	10,50	16,51	97,60		

Tablo 3.16'da ise CBR deneyinden elde edilen sonuçlar özet olarak verilmiştir. Tablo 3.16'da ise A tabakasında yapılan tüm laboratuvar ve arazi testlerinden elde edilen sonuçlar toplu bir şekilde verilmiştir.

Tablo 3.16. Dolgu tabakası (A tabakasının) CBR test sonuçlarının özeti

Zemin Özellikleri	Düz Yükleme	
Penetrasyon (mm)	2,50	5,00
Standart Yükleme	1360	2040
Yük (kgf)	278	510
CBR Değeri (%)	20,44	25,00
Şişme (%)	0,12	
Proje CBR Değeri (%)	25,00	

Tablo 3.17. Dolgu malzemesine (A tabakasına) ait özellikler

Zemin Sınıflandırılması	
Zemin Tanımı- USCS	ML
Kıvam Limitleri	
PL (%)	NP
LL (%)	NL
PI (%)	NP
Elek Analizi- USCS	
Taş (Blok) (>76,2 mm) (%)	0
Çakıl (76,2 mm – 4,76 mm) (%)	2,29
Kum (4,76 mm – 0,074mm) (%)	45,32
Silt Ve Kil (<0,074mm) (%)	52,39
Atterberg Deneyi	
Su muhtevası (%)	15,11
Arazi Ve Laboratuvar CBR Deneyleri	
Yaş CBR Değeri (%)	25
Arazi Yoğunluk Testi	
Optimum Su Muhtevası (%)	12,38
Kompaksiyon Parametreleri	
M.K.B.H.A. – Modifiye Proctor (kN/m <sup>3</sup> )	16,59
Optimum Su Muhtevası (%) – Modifiye Proctor	15,11

## **4. PLAXİS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI**

### **4.1. Programın Tanıtımı**

Çalışma kapsamında analizlerde kullanılan Plaxis programı zemin ortamının sonlu elemanlar metoduyla çözümünü sağlayan bir programdır. Analizi yapılacak zemin modeli noktalar ve çizgiler kullanılarak oluşturulmaktadır. Analizlerde mesh dediğimiz sonlu eleman ağları oluşturularak hesaplamalar ile sayısal sonuçlar elde edilmektedir. Plaxis programı ile hem statik hem de dinamik analizler yapılabilmektedir. Plaxis programının 2 ve 3 boyutlu analizlerinde kullanılan iki versiyonu bulunmaktadır. Çalışma kapsamında bu programda plaka yükleme deneyi 2 boyutlu Plaxis programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan zemin modelinin elde edilmesi kısım 4.3'te verilmiştir.

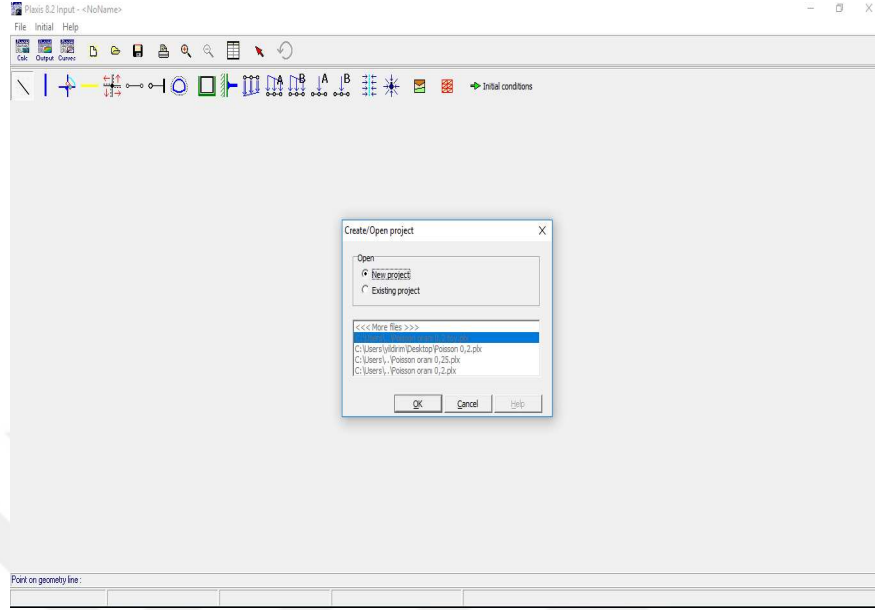
### **4.2. İnşaat Mühendisliğinde Kullanımı**

Plaxis sonlu elemanlar programı inşaat mühendisliğinde özellikle geoteknik alanında yararlı bir programdır. Bu program ile özellikle zemin alanında yapılacak uygulamalar Plaxis programı ile modellenerek analiz edilebilmektedir. Örnek vermek gerekirse tünel uygulamaları, yüzeysel ve derin temellerin analizi, kazık ve ankraj uygulamalarında kullanılmaktadır.

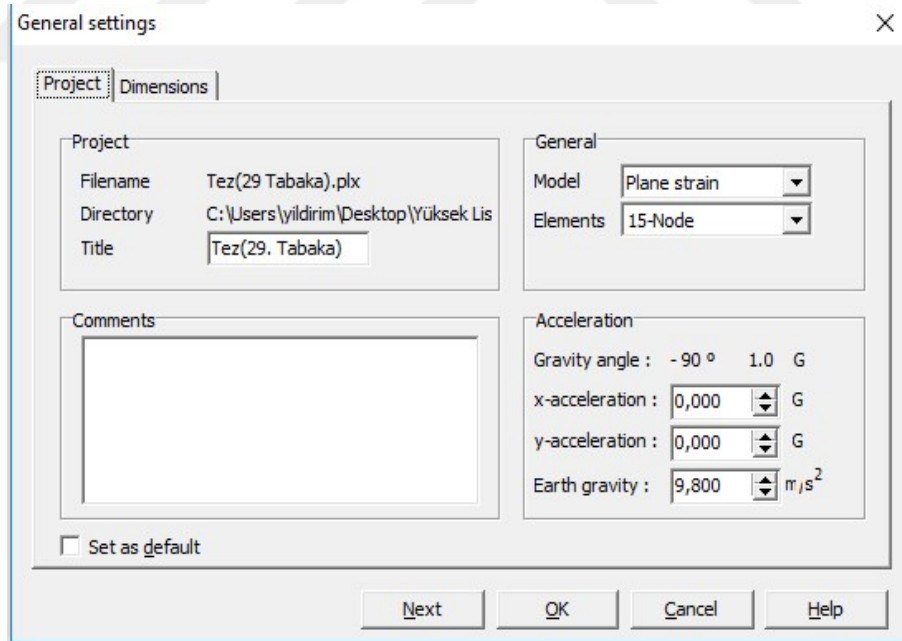
### **4.3. Arazide Uygulanan Plaka Yükleme Deneylerinin Plaxis İle Modellenmesi**

Tez kapsamında A ve B tabakalarında plaka yükleme deneyi ile Plaxis programı modellenmiştir. Oluşturulan modelde izlenen aşamalar Şekil (4.1-34)'de gösterilmiştir.

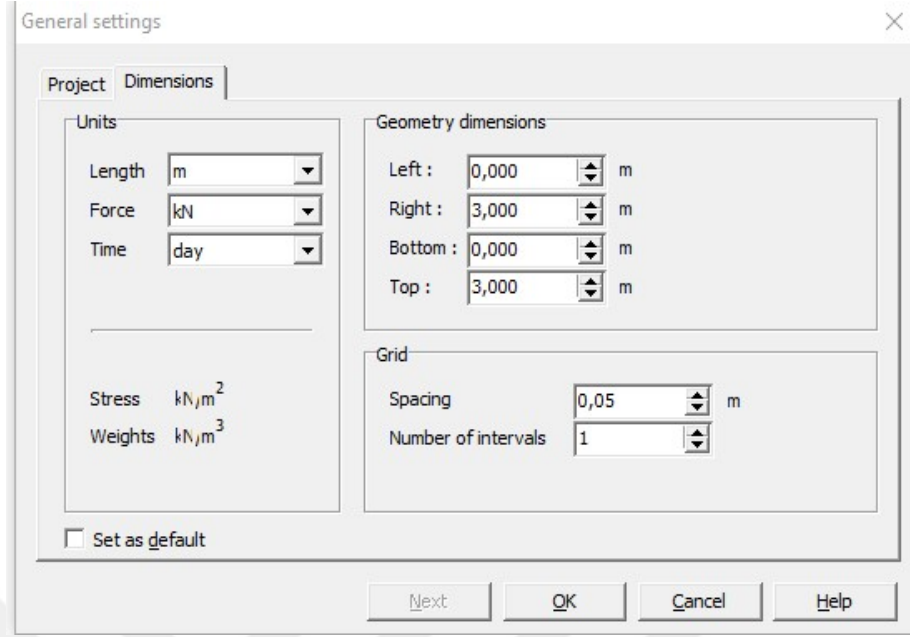
A tabakası için Plaxis programında modelin oluşturduğu yeni bir sayfa açılır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. A tabakası için programda yeni sayfanın açılması

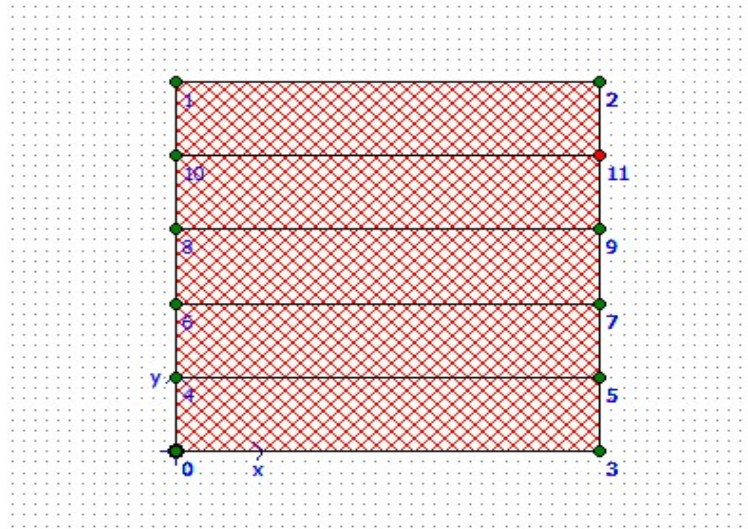


Şekil 4.2. A tabakanın giriş ekranı



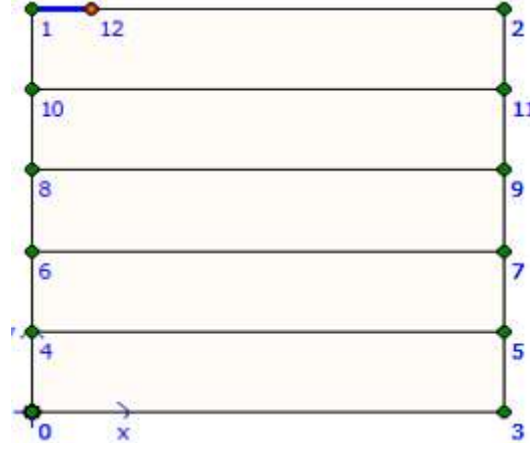
Şekil 4.3. A tabakasında model boyutlarını gösteren ekran

Plaxis programında oluşturulan modelde 5 adet tabaka kullanılarak model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde tabaka kalınlıkları 35 cm ve temel genişliği (B) 180 cm kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. A tabakası için zemin modelinin mesh yapısı

Plaxis programında zemine uygulanacak plaka çapı belirlenir. Belirlenen plaka çapı Plaxis programında uygulanır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. A tabakasında plakanın uygulanması

#### 4.3.1. A tabakası için yapılan modelleme

A tabakasının zemin parametreleri;

Plaka çapı: 45 cm

$$\rho_k = 1.603 \text{ g/cm}^3, \rho_n = 1.964 \text{ g/cm}^3, w = \% 22,49$$

$$\rho_d = \frac{W_k}{V_{\text{Tüm}}} \quad (4.1)$$

$$1,603 = \frac{149,40}{V_{\text{Tüm}}}$$

$$V_{\text{Tüm}} = 19,20 \text{ cm}^3$$

$$W = \frac{W_{\text{su}}}{W_{\text{kuru}}} \quad (4.2)$$

$$0,2249 = \frac{33,60}{W_{\text{kuru}}}$$

$$W_{\text{kuru}} = 149,40 \text{ g}$$



$$\rho_n = \frac{W_{Tüm}}{V_{Tüm}} \quad (4.3)$$

$$\rho_n = \frac{234-51}{93,20} = 1,96 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_n = (1 - n) G_s \rho_{su} (1 + w) \quad (4.4)$$

$$1,964 = (1 - n) 2,70 (1,00) (1 + 0,2249)$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (4.5)$$

$$n = 0,41$$

$$e = \frac{0,41}{1 - 0,41}$$

$$e = 0,69$$

$$\rho_{doy} = n \rho_{su} + (1 - n) G_s \rho_{su} \quad (4.6)$$

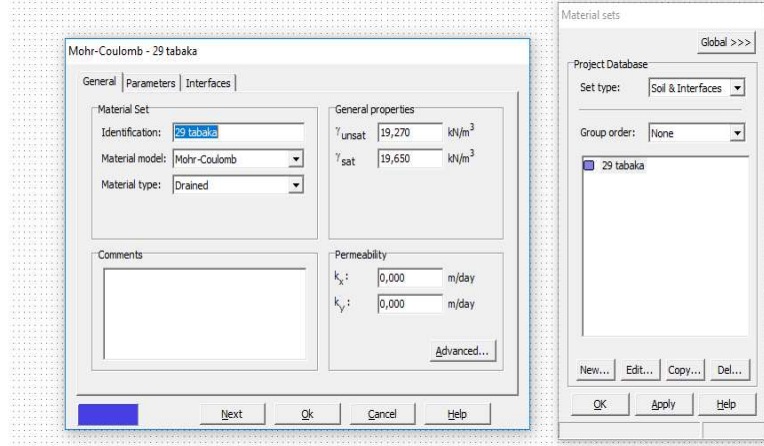
$$\rho_{doy} = (0,41) 1,00 + (1 - 0,41) (2,70) 1,00$$

$$\rho_{doy} = 2,003 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_{doy} = 2,003 (9,81) = 19,65 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{unsat} = 1,964 (9,81) = 19,27 \text{ kN/m}^3$$

Zeminin birim hacim ağırlığı hesaplandıktan sonra Plaxis programına uygulanması Şekil. 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. A tabakasında zeminin birim hacim ağırlıkları

Kayma modülü;

$$N = 0,35$$

$$K_{plaka} = \frac{\Delta_q}{\Delta_{se}} \quad (4.7)$$

$$G = \frac{\Delta_q}{\Delta_{se}} = \frac{(3,3 - 0,7)}{(2 - 0,67)}$$

$$G = 1,7 \text{ kg/mm}^3$$

$$G = \frac{(1-\nu)C_z \sqrt{A}}{2,26} \quad (4.8)$$

$$A = 1,7 \cdot 3,14 \cdot (225)^2 = 270236,3 \text{ kg/mm}$$

$$G = \frac{(1-0,35)1,7 \sqrt{3,14 \cdot 225 \cdot 225}}{2,26}$$

$$G = 194,99 \text{ kg/mm}^2$$

Zemine etkileyen gerilme = G g

$$(194,99) (98,0665) = 19121,99 \text{ kN/m}^2$$

Poisson Oranı ( $\nu$ );

Zeminin poisson oranı Tablo 4.1’de gösterildiği gibi kireç – stabilize malzemeler ile kireç – külleri uçur karışımı minimum ve maksimum değer aralıkları kullanılmıştır.

$\nu=0,2$  olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı malzemeler için tipik poisson oranları (Huany,1993)

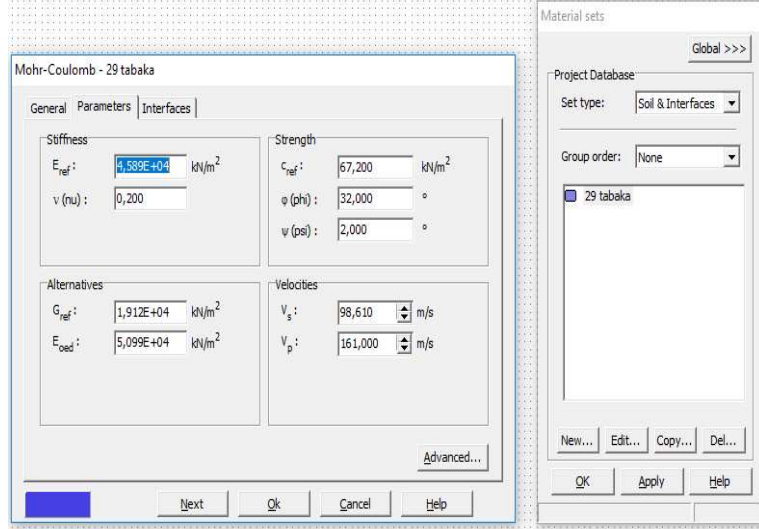
Malzeme	Değer aralığı	Tipik değer
Sıcak karışım asfalt	0,3-0,40	0,35
Portland çimento betonu	0,15-0,2	0,15
İşlenmiş granüler malzeme	0,3-0,4	0,35
Çimento-İşlenmiş granüler malzeme	0,1-0,2	0,15
Çimento-İyi ayarlanmış taneli topraklar	0,15-0,35	0,25
Kireç-Stabilize malzemeler	0,15-0,25	0,20
Kireç-Külleri uçur karışımı	0,1-0,15	0,15
Gevşek kum ve siltli kum	0,2-0,4	0,3
Yoğun kum	0,3-0,45	0,35
İnce-Taneli topraklar	0,3-0,5	0,40
Doymuş yumuşak killer	0,4-0,5	0,45

İçsel sürtünme açısı( $\phi$ ); A tabakasının içsel sürtünme açısı tablodan belirlenirken Optimum su muhtevasının %22,49, kuru birim hacim ağırlığının ise  $\rho_d = 15,72 \text{ kN/m}^3$  tür. Tablo 4.2’de görüldüğü gibi zemin sınıfı ML (düşük plastisteli silt) sınıfına girmektedir.

Tablo 4.2. Zemin sınıfına bağlı permeabilite, içsel sürtünme açısı, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı arasındaki ilişki (Bozbey, 2016)

Zemin Sınıfı	Kuru birim hacim ağırlık ( $\text{kN/m}^3$ )	Optimum su muhtevası %	$\phi'$	k(cm/s)
GW	19,6 - 21,2	8 - 11	>38	0,03
GP	18,1 – 19,6	11 - 14	>37	0,05
GC	18,1 - 20,4	9 - 14	>31	>5.10 <sup>-8</sup>
ML	14,9 – 18,9	12 - 24	32	>5.10 <sup>-6</sup>
CH	11,8 – 16,5	19 - 36	19	>5.10 <sup>-8</sup>
SP	15,7 – 18,9	12 - 21	37	>5.10 <sup>-4</sup>

Tablo 4.2’de elde edilen zemin parametreleri Şekil 4.7’de uygulanmıştır.



Şekil 4.7. A tabakasının zemin parametreleri

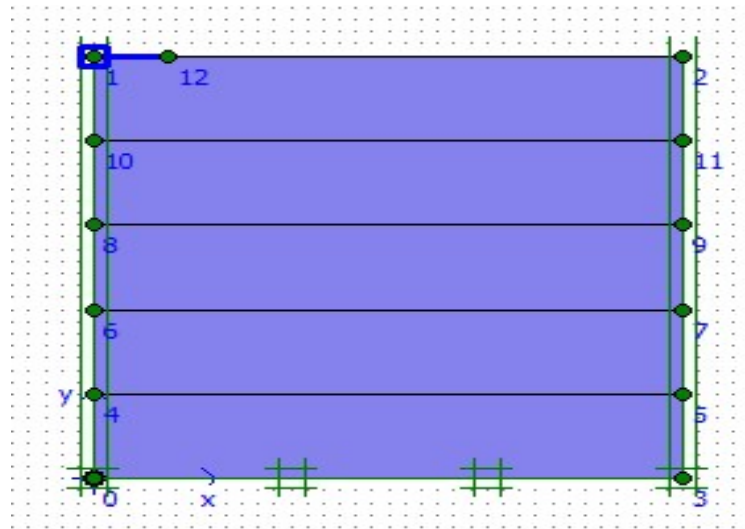
Zemin elastisite modülünün hesabı;

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.9)$$

$\nu=0,2$  olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

$$19121,99 = \frac{E}{2(1+0,2)}$$

$$E = 45892,78 \text{ kN/m}^2$$



Şekil 4.8. A tabakasında zeminin mesnetlemesi

Atalet momenti hesaplamaları;

$$I = \frac{\pi}{4} r^4 \quad (4.10)$$

450 mm çapında ve 25 mm kalınlığındaki plaka için;

$$I = \frac{\pi}{4} (0,225)^4$$

$$I = 2,01 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

Plakanın EI değeri;

$$EI = (2,01 \cdot 10^{-3}) (2 \cdot 10^8) = 402000 \text{ kN.m}^2$$

Alan;

$$A = \frac{\pi}{4} (d)^2 \quad (4.11)$$

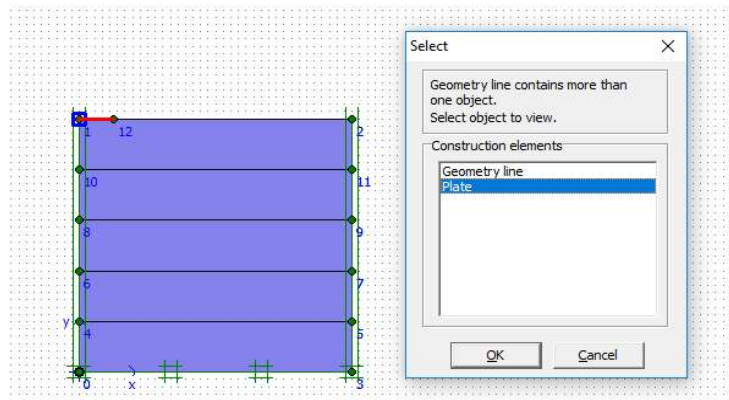
$$A = \frac{\pi}{4} (0,450)^2 = 0,16 \text{ m}^2$$

Plakanın EA değeri;

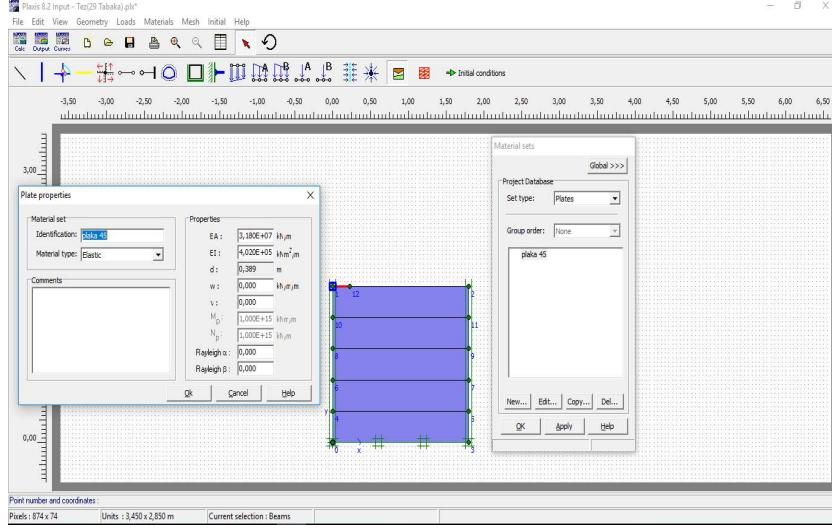
$$EA = (2 \cdot 10^8) (0,16) = 320 \cdot 10^5 \text{ kN.m}^2$$

Çeliğin poisson oranı 0,3 alınmıştır.

Çelik plakaya ait çelik parametrelerinin ve hesaplanan zemin özelliklerinin Plaxis programında uygulanması Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmektedir.

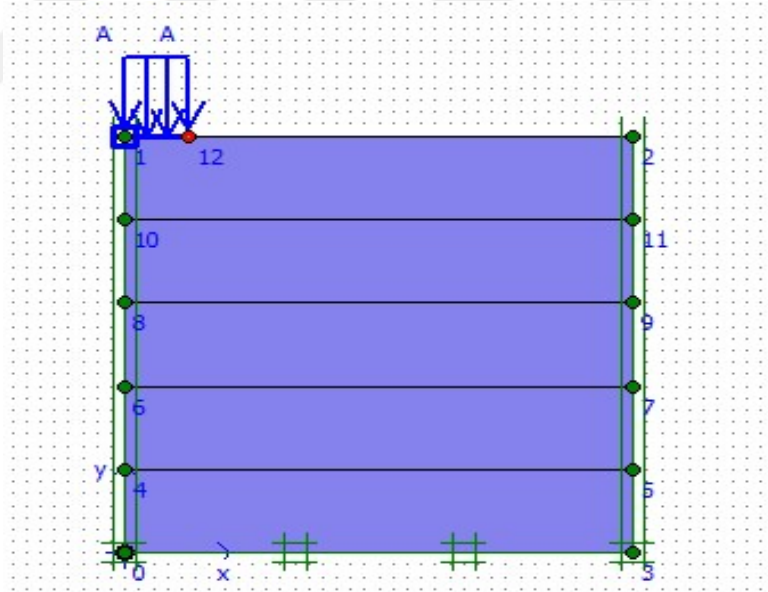


Şekil 4.9. A tabakasında plakanın modele atanması

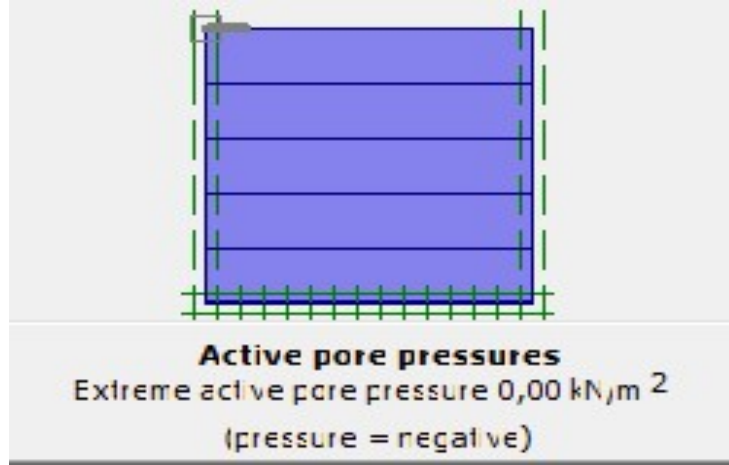


Şekil 4.10. A tabakasında çelik plakanın malzeme özelliklerinin atanması

Zeminde yer altı suyunun uygulanması Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. A tabakasında yeraltı suyunun Plaxisde uygulanması



Şekil 4.12. A tabakası için yeraltı suyunun Plaxis sonuçları

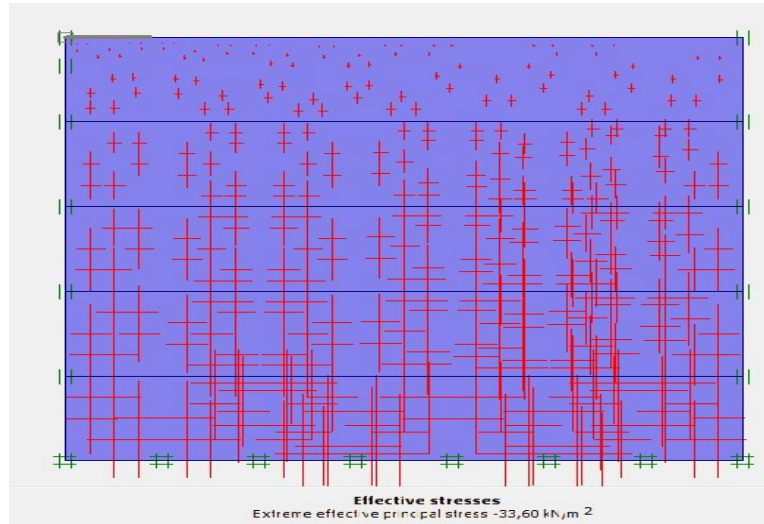
K0-procedure

ΣM-weight : 1,000

Cluster	Material	OCR	POP	K0
1	MC	N/A	N/A	0,470
2	MC	N/A	N/A	0,470
3	MC	N/A	N/A	0,470
4	MC	N/A	N/A	0,470
5	MC	N/A	N/A	0,470

OK Cancel Help

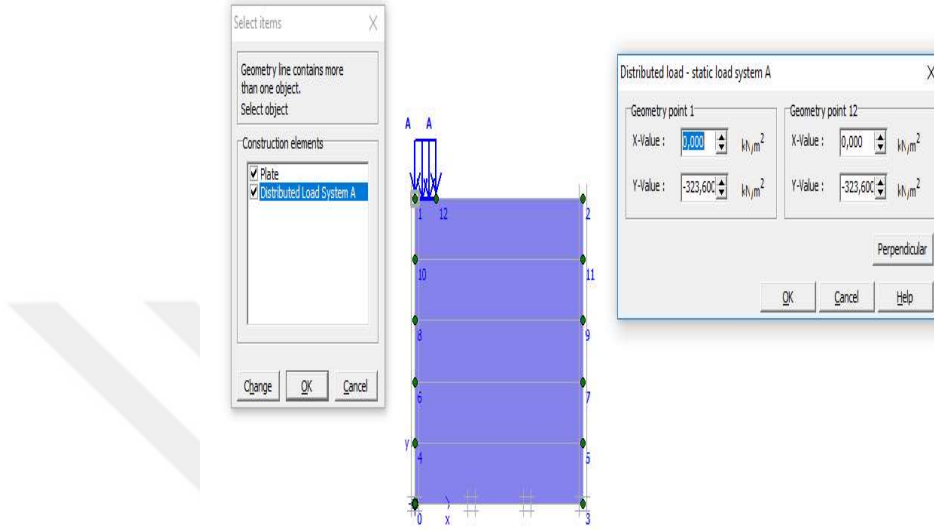
Şekil 4.13. A tabakasında zeminin K<sub>0</sub> parametreleri



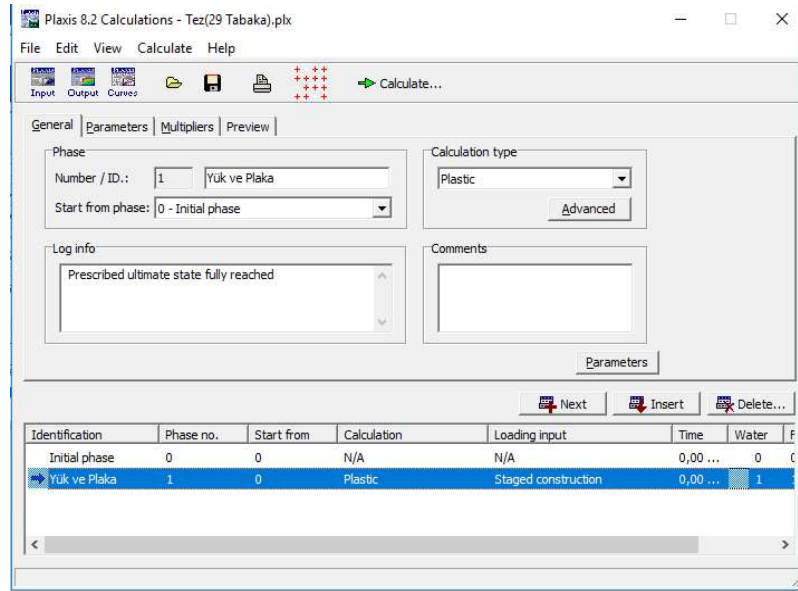
Şekil 4.14. A tabakasında zeminin efektif gerilmesinin Plaxis ile bulunması

Gerilme-yük grafiğinden zemine uygulanan yükün değeri  $3,3 \text{ kg/cm}^2$  olarak belirlenmiştir. Belirlenen yükün programda uygulanması Şekil 4.15'de gösterilmektedir.

$$Q = 3,3 \text{ kg/cm}^2 \cdot 98,0665 = 323,61 \text{ kN/m}^2 \text{ dir.}$$

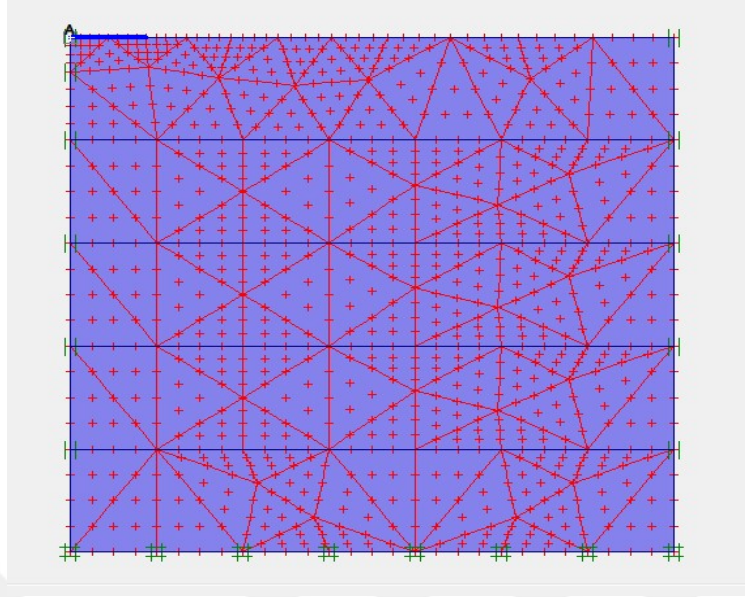


Şekil 4.15. A tabakasında yük değerinin zemine uygulanması

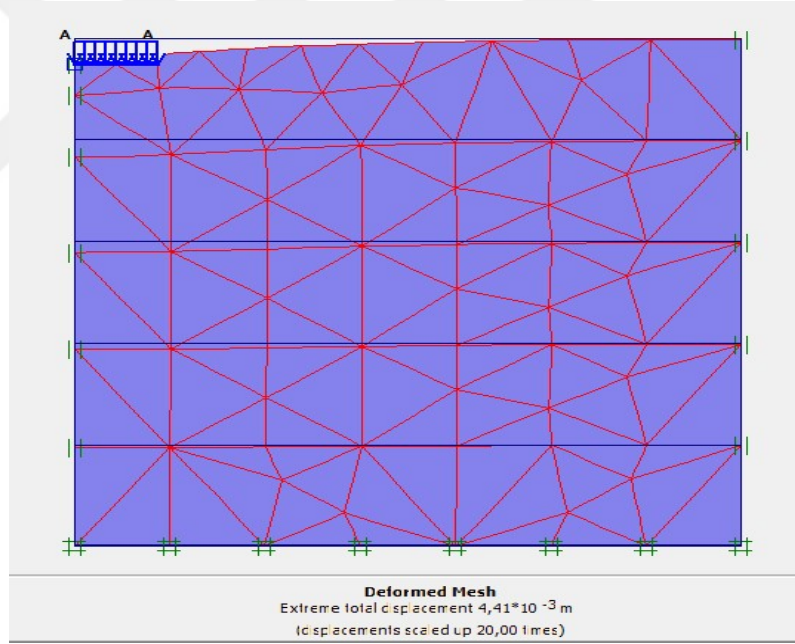


Şekil 4.16. A tabakası için Plaxis programına girilen tüm parametrelerin hesaplanması





Şekil 4.17. A tabakasına uygulanan yük etkisinde mesh yapısı

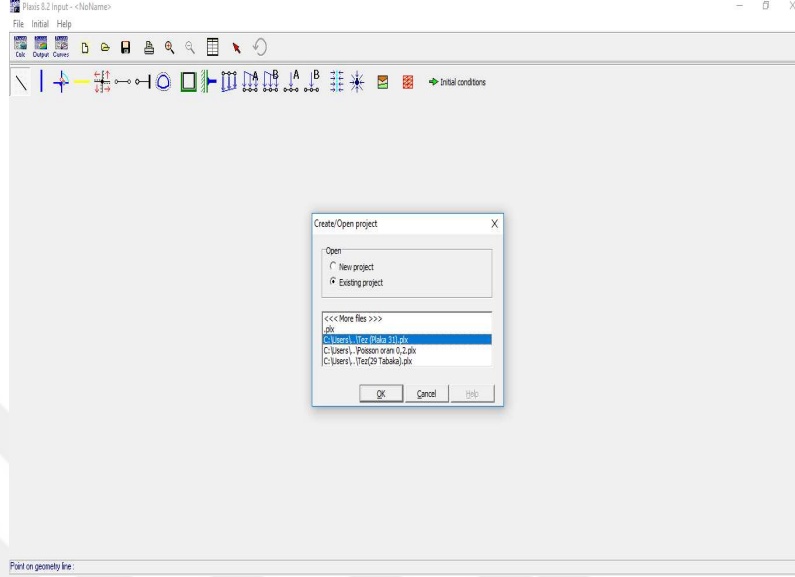


Şekil 4.18. Zemine uygulanan yükün deplasman değerlerinin Plaxis ile hesaplanması

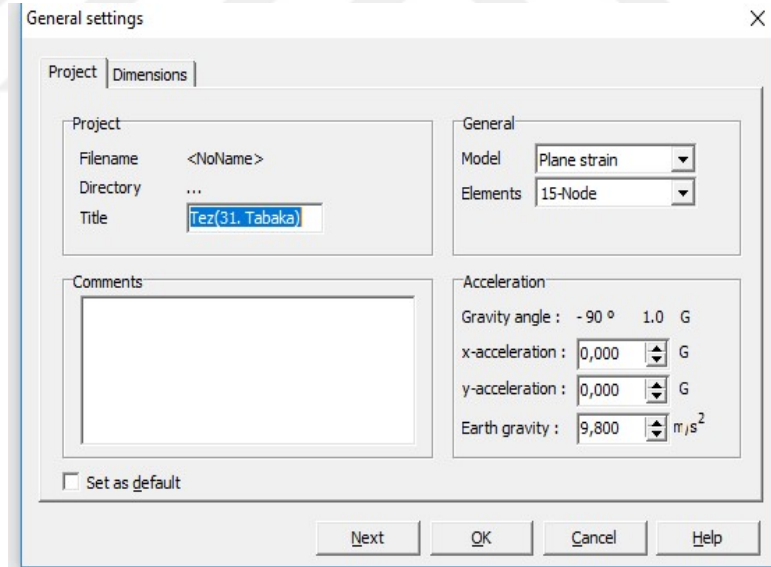
A tabakasına uygulanan yük altında elde edilen deplasman miktarı Şekil 4.18’de gösterilmektedir.

### 4.3.2. B tabakası için yapılan modelleme

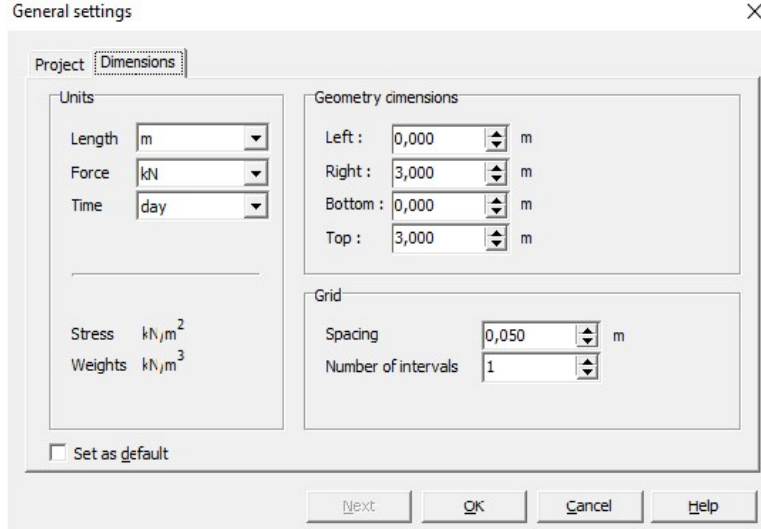
İlk olarak Plaxis programında modelin oluşturduğu yeni sayfa açılır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. B tabakası için programda yeni sayfanın açılması

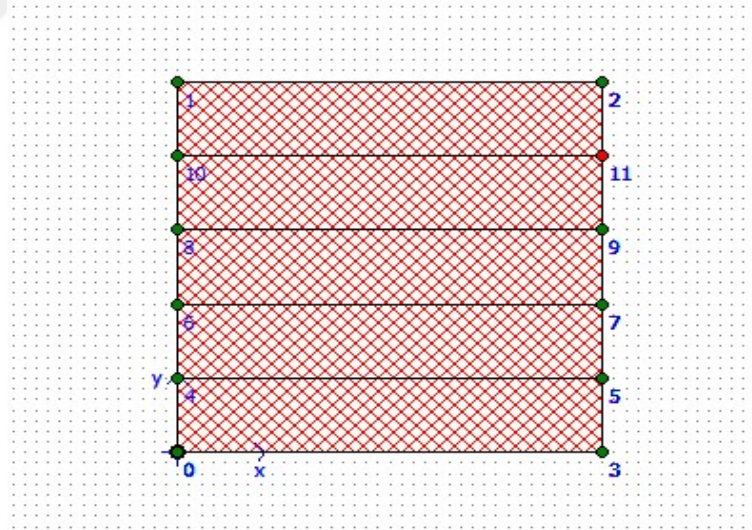


Şekil 4.20. B tabakasının giriş ekranı



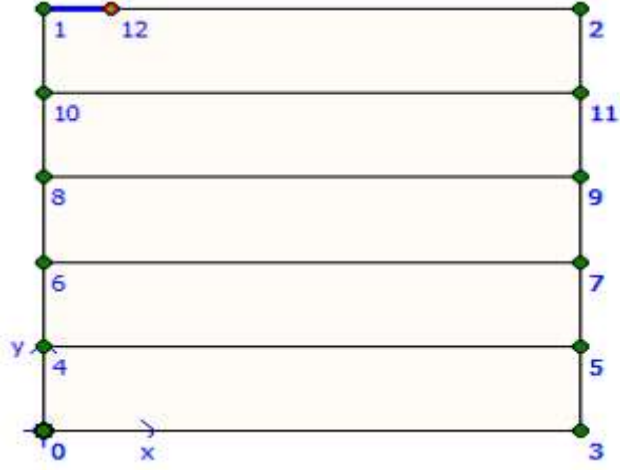
Şekil 4.21. B tabakasının modelde boyutları gösteren ekran

Plaxis programında oluşturulan modelde 5 adet tabaka kullanılarak model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde tabaka kalınlıkları 35 cm ve genişliği (B) 180 cm kullanılmıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.22. B tabakası için zemin modelinin mesh yapısı

Plaxis programında zemine uygulanacak plaka çapı belirlenir. Belirlenen plaka çapı Plaxis programında uygulanır (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. B tabakası için plakanın modele uygulanması

B tabakanın zemin parametreleri;

Plaka çapı: 30 cm

$$\rho_k = 1.663 \text{ g/cm}^3, \rho_n = 2,018 \text{ g/cm}^3, w = \% 21,32$$

$$\rho_d = \frac{W_k}{V_{\text{Tüm}}} \quad (4.12)$$

$$1,663 = \frac{121}{V_{\text{Tüm}}}$$

$$V_{\text{Tüm}} = 72,76 \text{ cm}^3$$

$$W = \frac{W_{\text{su}}}{W_{\text{kuru}}} \quad (4.13)$$

$$0,2172 = \frac{29,8}{W_{\text{kuru}}}$$

$$W_{\text{kuru}} = 121 \text{ g}$$

$$\rho_n = \frac{W_{\text{Tüm}}}{V_{\text{Tüm}}} \quad (4.14)$$

$$\rho_n = \frac{146,8}{72,76} = 2,018 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_n = (1 - n) G_s \rho_{su} (1 + w) \quad (4.15)$$

$$2,018 = (1 - n) 2,70 (1,00) (1 + 0,2132)$$

$$n = 0,38$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (4.16)$$

$$e = \frac{0,38}{1 - 0,38}$$

$$e = 0,61$$

$$\rho_{doy} = n \rho_{su} + (1 - n) G_s \rho_{su} \quad (4.17)$$

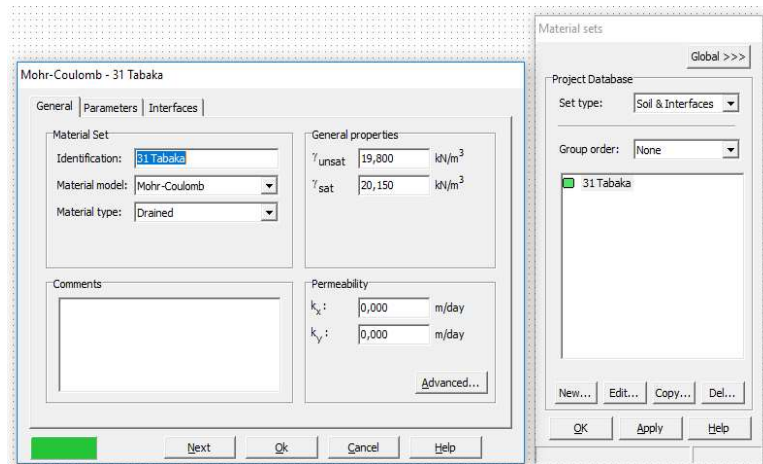
$$\rho_{doy} = (0,38) 1,00 + (1 - 0,38) (2,70) 1,00$$

$$\rho_{doy} = 2,054 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_{doy} = 2,054 (9,81) = 20,15 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{unsat} = 2,018 (9,81) = 19,80 \text{ kN/m}^3$$

Zeminin birim hacim ağırlığı hesaplandıktan sonra Plaxis programına uygulanması Şekil 4.24'de gösterilmektedir.



Şekil 4.24. B tabakasında zeminin birim hacim ağırlıkları

Kayma modülü;

$$N = 0,35$$

$$K_{\text{plaka}} = \frac{\Delta_q}{\Delta_{\text{se}}} \quad (4.18)$$

$$G = \frac{(11,82-3)}{(5,81-2,55)} = 2,71 \text{ kg/mm}^3$$

$$K_{\text{Plaka}} = \frac{\Delta_q}{\Delta_{\text{se}}} A$$

$$K_{\text{plaka}} = 2,71 \cdot 3,14 \cdot (150)^2 = 191558,61 \text{ kg/mm}$$

$$G = \frac{(1-\nu) C_z \sqrt{A}}{2,26} \quad (4.19)$$

$$G = \frac{(1-0,35)2,71 \sqrt{3,14 \cdot 150 \cdot 150}}{2,26} = 207,22 \text{ kg/mm}^2$$

$$(207,22) (98,0665) = 20321,34 \text{ kN/m}^2$$

Zemin elastisite modülünün hesabı;

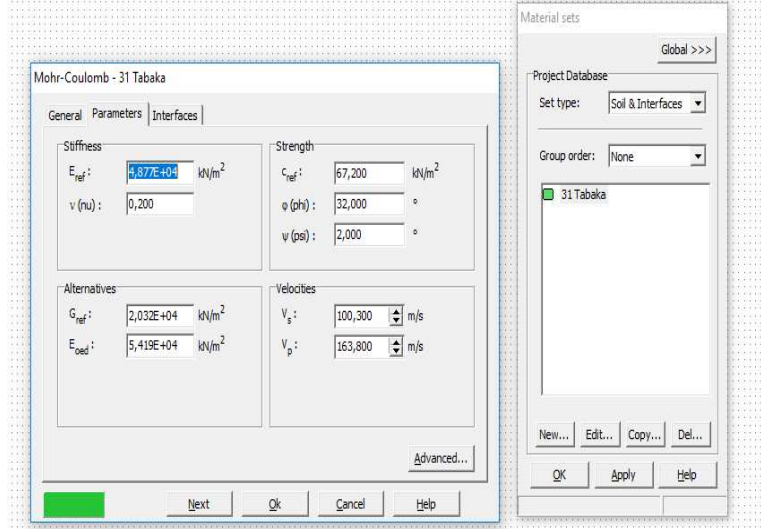
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.20)$$

$\nu = 0.2$  olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

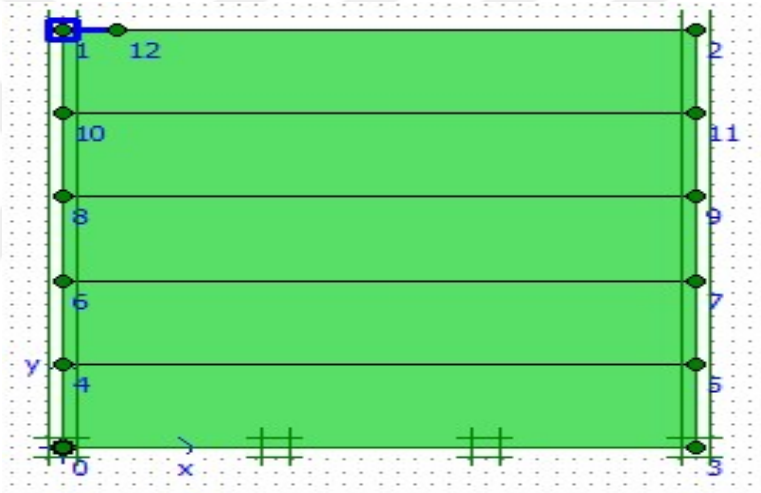
$$20321,34 = \frac{E}{2(1+0,2)}$$

$$E = 48771,22 \text{ kN/m}^2$$

İçsel sürtünme açısı( $\phi$ ); B tabakanın içsel sürtünme açısı tablodan belirlenirken Optimum su muhtevasının %21,32, kuru birim hacim ağırlığının ise  $\rho_d = 16,31 \text{ kN/m}^3$  tür. Tablo 4.2'de görüldüğü gibi zemin sınıfı ML (düşük plastisteli silt) sınıfına girmektedir.



Şekil 4.25. B tabakasının zemin parametreleri



Şekil 4.26. B tabakasında zeminin mesnetlenmesi

Atalet momenti hesaplamaları;

$$I = \frac{\pi}{4} r^4 \quad (4.21)$$

300 mm çapında ve 25 mm kalınlığındaki plaka için;

$$I = \frac{\pi}{4} (0,300)^4 = 3,98 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Plakanın EI değeri;

$$EI = (3,98 \cdot 10^{-4}) (2 \cdot 10^8) = 79600 \text{ kN.m}^2$$

Alan;

$$A = \frac{\pi}{4} (d)^2 \quad (4.22)$$

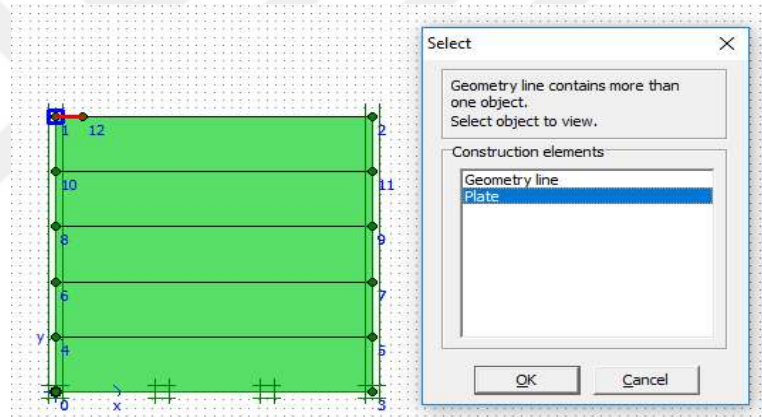
$$A = \frac{\pi}{4} (0,300)^2 = 0,071 \text{ m}^2$$

Plakanın EA değeri ;

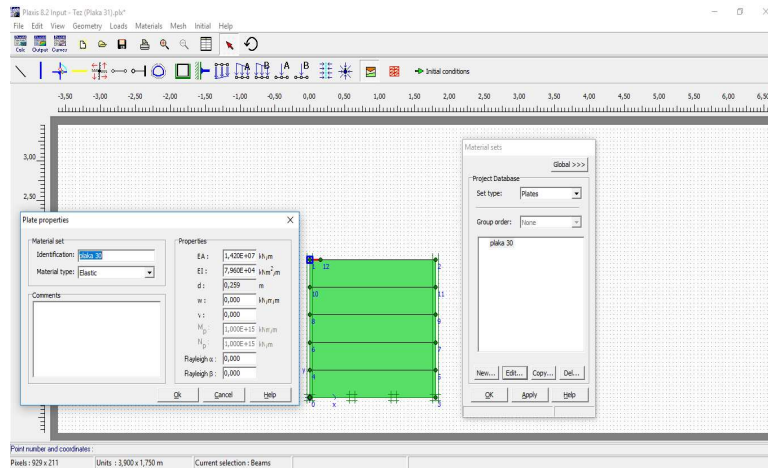
$$EA = (2 \cdot 10^8) (0,071) = 142 \cdot 10^5 \text{ kN.m}^2$$

Çeliğin poisson oranı 0,3 alınmıştır.

Çelik plakaya ait çelik parametrelerinin ve hesaplanan zemin özelliklerinin Plaxis programında uygulanması Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de gösterilmektedir.



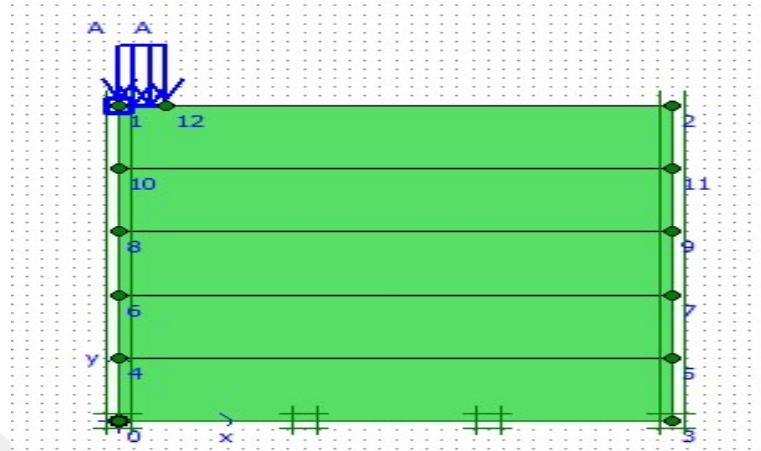
Şekil 4.27. B tabakasında zemine uygulanacak plakanın atanması



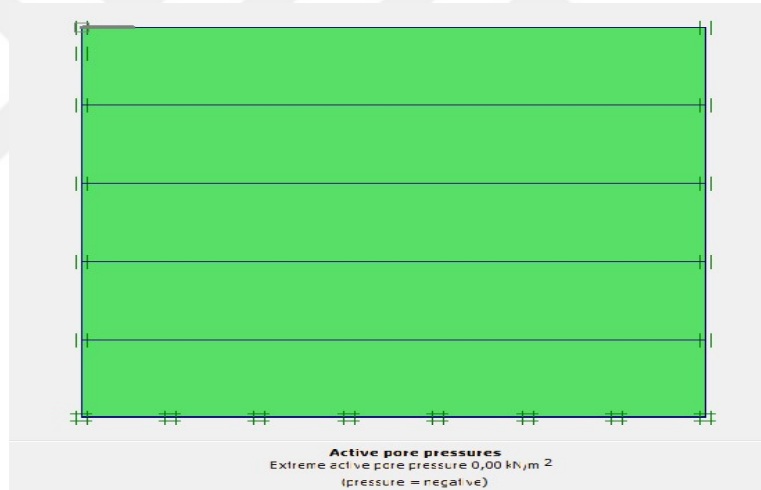
Şekil 4.28. B tabakasında çelik plakanın malzeme özelliklerinin atanması



Zeminde yer altı suyunun uygulanması Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de gösterilmektedir.



Şekil 4.29. B tabakasının yeraltı suyunun Plaxisde uygulanması

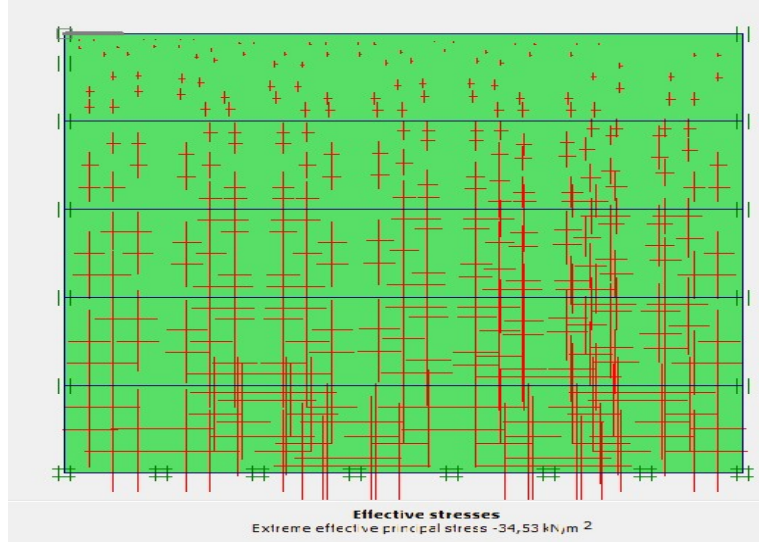


Şekil 4.30. B tabakası için yeraltı suyunun Plaxis sonuçları

Cluster	Material	OCR	POP	K0
1	MC	N/A	N/A	0,470
2	MC	N/A	N/A	0,470
3	MC	N/A	N/A	0,470
4	MC	N/A	N/A	0,470
5	MC	N/A	N/A	0,470

Pencerenin alt kısmında, 'OK', 'Cancel' ve 'Help' butonları yerleştirilmiştir.

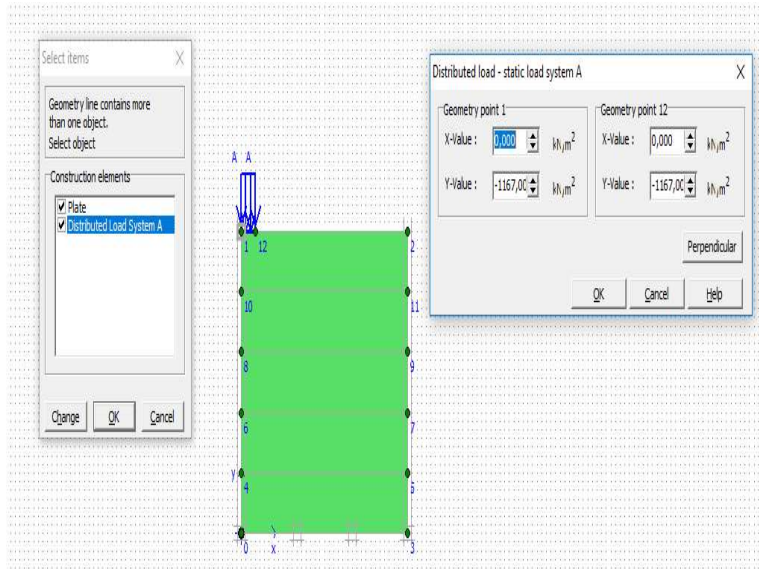
Şekil 4.31. B tabakasında zeminin Ko parametreleri



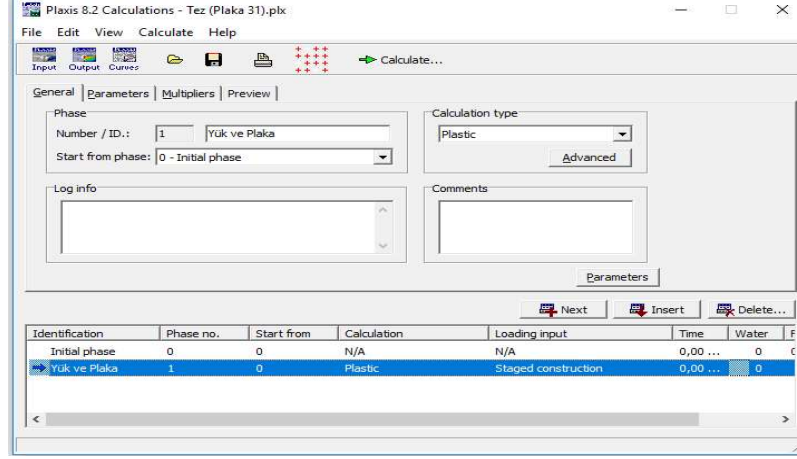
Şekil 4.32. B tabakasında zemin efektif gerilmesinin Plaxisde bulunması

Gerilme-yük grafiğinden zemine uygulanan yükün değeri 3,3 kg/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Belirlenen yükün programda uygulanması Şekil 4.33'de gösterilmektedir.

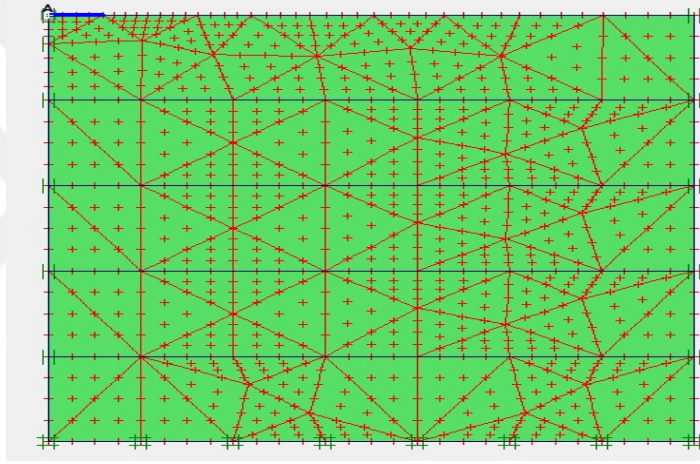
$$Q = (11,9) 98,0665 = 1167 \text{ kN/m}^2 \text{ dir.}$$



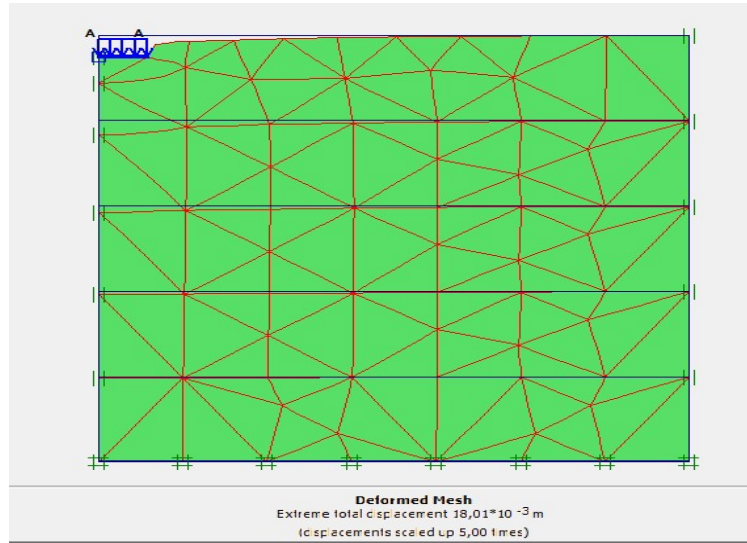
Şekil 4.33. B tabakasında yük değerinin zemine uygulanması



Şekil 4.34. B tabakası için Plaxis programına girilen tüm parametrelerin hesaplanması



Şekil 4.35. B tabakasına uygulanan yük etkisinde mesh yapısı



Şekil 4.36. B tabakasında uygulanan yükün oluşturduğu deplasmanın Plaxis ile belirlenmesi

B tabakasına uygulanan yük altında elde edilen deplasman miktarı Şekil 4.36'da gösterilmektedir.

Tablo 4.3. Zemin sınıfına göre kayma mukavemeti değerleri

USCS Zemin Grubu	c, kompakte halde (lb/ft <sup>2</sup> )	c, doymuş (lb/ft <sup>2</sup> )	c, kompakte halde (KN/m <sup>2</sup> )	c, doymuş (KN/m <sup>2</sup> )
GW	0	0	0	0
GP	0	0	0	0
GM	-	-	-	-
GC	-	-	-	-
SW	-	-	-	-
SP	-	-	-	-
SM	1050	420	50,4	20,16
SM-SC	1050	300	50,4	14,4
SC	1550	230	74,4	11,04
ML	1400	190	67,2	9,12
ML-CL	1350	460	64,8	22,08
CL	1800	270	86,4	12,96
OL	-	-		
MH	1500	420	72	20,16
CH	2150	230	103,2	11,04

1b/ft<sup>2</sup> → 0,048 pa (Pa = kN/m<sup>2</sup>)

### 4.3.3. Zemin parametrelerindeki değişimlerin kullanılan model üzerindeki etkisi

#### 4.3.3.1. Zemin poisson oranına bağlı inceleme

Tez kapsamında yapılan sonlu elemanlar analizinde ilk olarak projede kullanılan poisson oranı 0,20 için analizler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kireçle iyileştirilen malzemenin poisson oranı değişimine bağlı olarak 0,10 ile 0,25 arasındaki değerler için poisson oranı 0,10'da başlayıp 0,05 artırılarak poisson oranının gerilme ve deplasman üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır.

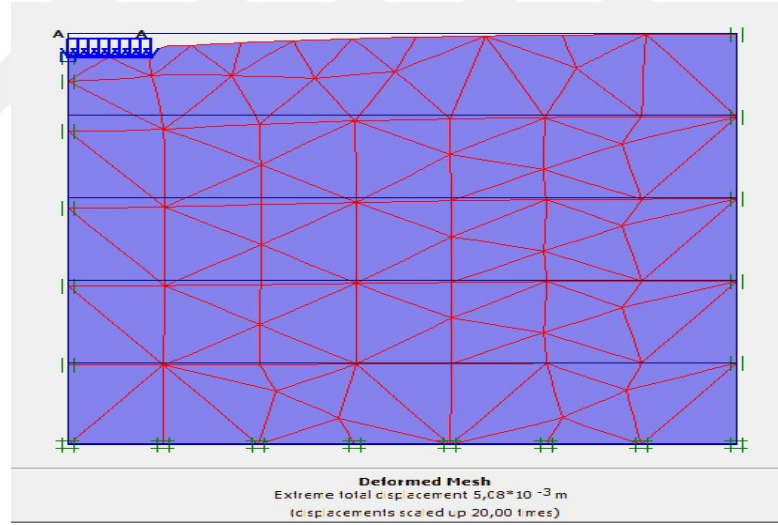
A tabakası için poisson oranlarındaki değişimin deplasman üzerindeki etkisi;  
A tabakası için poisson oranı değişimine bağlı olarak yeni elastisite modülünün bulunup oturma değerleri aşağıdaki gibidir. Denklem 4.20 kullanılarak zeminin elastisite modülü hesaplanmıştır.

Poisson oranı 0,10;

$$19121,99 = \frac{E}{2(1+0,1)}$$

$$E = 42068,38 \text{ kN/m}^2$$

Elastisite modülü değeri 42068,38 kN/m<sup>2</sup>, poisson oranı 0,10 ve kayma modülü 19121,99 kN/m<sup>2</sup> olan zeminde 45 cm çapındaki plaka kullanılarak modellenen yikleme testinde 323,61 kN/m<sup>2</sup> gerilme altında oluşan deplasman miktarı 5,08 mm olarak elde edilmiştir (şekil 4.37).



şekil 4.37. A tabakasında poisson oranı 0,10 için uygulanan yikün deplasman değerlerinin hesabı

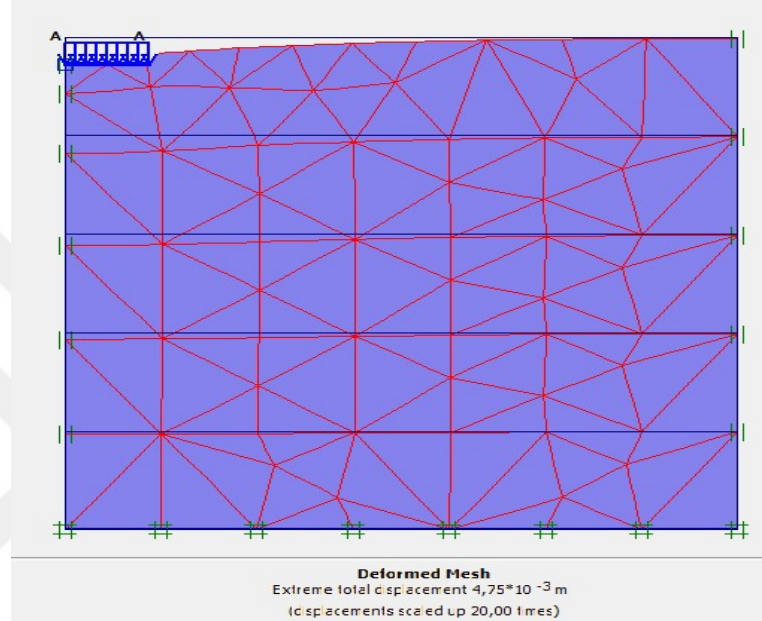
Poisson oranı 0,15;

Poisson oranı değişimine bağlı olarak yeni elastisite modülünün bulunup oturma değerleri aşağıdaki gibidir.

$$19121,99 = \frac{E}{2(1+0,15)}$$

$$E = 43980,58 \text{ kN/m}^2$$

Elastisite modülü değeri 43980,58 kN/m<sup>2</sup>, poisson oranı 0,15 ve kayma modülü 19121,99 kN/m<sup>2</sup> olan zeminde 45 cm çapındaki plaka kullanılarak modellenen yükleme testinde 323,61 kN/m<sup>2</sup> gerilme altında oluşan deplasman miktarı 4,75 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.38).



Şekil 4.38. A tabakasında poisson oranı 0,15 için uygulanan yükün deplasman değerlerinin hesabı

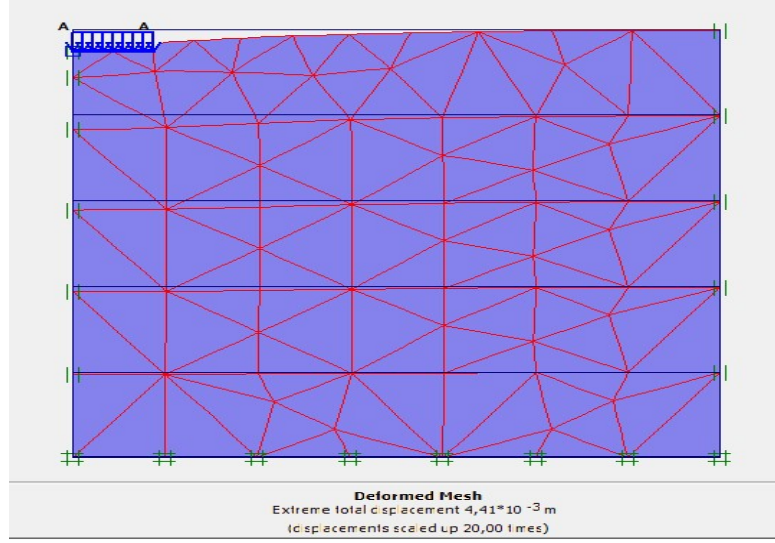
Poisson oranı 0,2;

Poisson oranı değişimine bağlı olarak yeni elastisite modülünün bulunup oturma değerleri aşağıdaki gibidir.

$$19121,99 = \frac{E}{2(1+0,2)}$$

$$E = 45892,78 \text{ kN/m}^2$$

Elastisite modülü değeri 45892,78 kN/m<sup>2</sup>, poisson oranı 0,20 ve kayma modülü 19121,99 kN/m<sup>2</sup> olan zeminde 45 cm çapındaki plaka kullanılarak modellenen yükleme testinde 323,61 kN/m<sup>2</sup> gerilme altında oluşan deplasman miktarı 4,41 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.39).



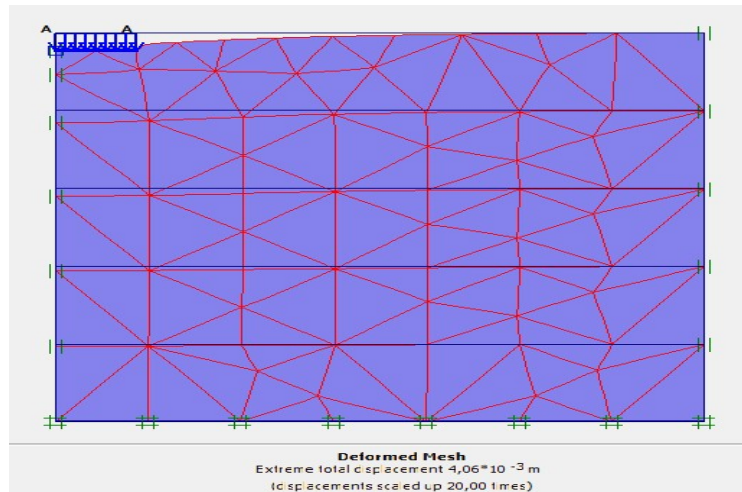
Şekil 4.39. A tabakasında poisson oranı 0,20 için uygulanan yükün deplasman değerlerinin hesabı

Poisson oranı 0,25;

$$19121,99 = \frac{E}{2(1+0,25)}$$

$$E = 47804,98 \text{ kN/m}^2$$

Elastisite modülü değeri 47804,98 kN/m<sup>2</sup>, poisson oranı 0,25 ve kayma modülü 19121,99 kN/m<sup>2</sup> olan zeminde 45 cm çapındaki plaka kullanılarak modellenen yükleme testinde 323,61 kN/m<sup>2</sup> gerilme altında oluşan deplasman miktarı 4,06 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.40).



Şekil 4.40. A tabakasında poisson oranı 0,25 için uygulanan yükün deplasman değerlerinin hesabı

A tabaka için farklı poisson oranları kullanılarak hesaplanan gerilme–deplasman değerleri Tablo 3.37 ve Tablo 3.40’da verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi kullanılan poisson oranı arttıkça zeminde oluşan deplasman değerinin küçüldüğü görülmektedir. Zeminin poisson oranına bağlı olarak zemindeki oturma değerleri Tablo 4.4’de 4,06-5,08 mm arasında hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. A tabakası için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar

Poisson Oranı	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	Deplasman (mm)
0,10	33,6	5,08
0,15	33,6	4,75
0,20	33,6	4,41
0,25	33,6	4,06

B tabakası için poisson oranlarındaki değişimin deplasman üzerindeki etkisi;

B tabakası için poisson oranı değişimine bağlı olarak yeni elastisite modülünün bulunup oturma değerleri aşağıdaki gibidir.

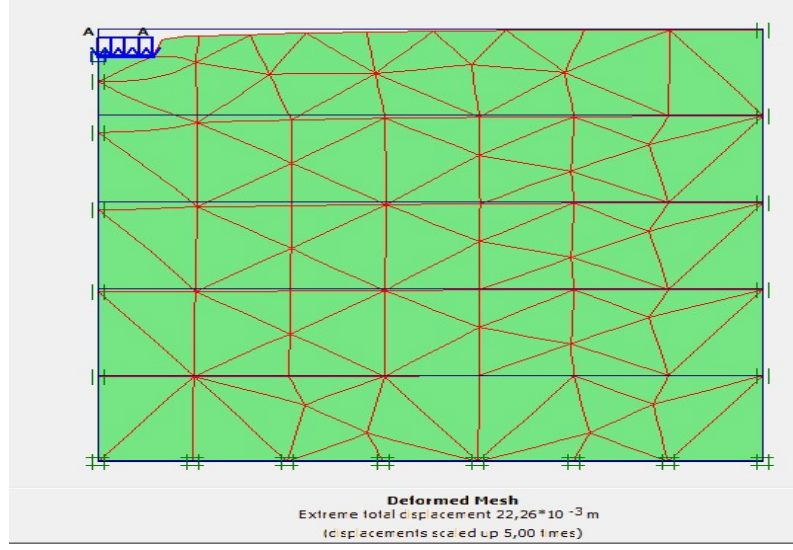
Poisson oranı 0,10;

$$20321,34 = \frac{E}{2(1+0,1)}$$

$$E = 44706,94 \text{ kN/m}^2$$

Elastisite modülü değeri 44706,94 kN/m<sup>2</sup>, poisson oranı 0,10 ve kayma modülü 20321,34 kN/m<sup>2</sup> olan zeminde 30 cm çapındaki plaka kullanılarak modellenen yükleme testinde 1167 kN/m<sup>2</sup> gerilme altında oluşan deplasman miktarı 22,26 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.41).





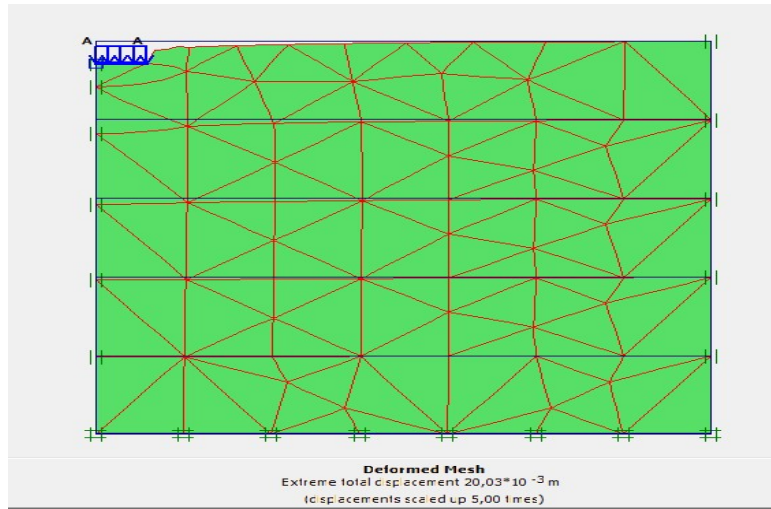
Şekil 4.41. B tabakasında poisson oranı 0,10 için uygulanan yükün deplasman değerlerinin hesabı

Poisson oranı 0,15;

$$20321,34 = \frac{E}{2(1+0,15)}$$

$$E = 46739,0,8 \text{ kN/m}^2$$

Elastisite modülü değeri 46739,08 kN/m<sup>2</sup>, poisson oranı 0,15 ve kayma modülü 20321,34 kN/m<sup>2</sup> olan zeminde 30 cm çapındaki plaka kullanılarak modellenen yükleme testinde 1167 kN/m<sup>2</sup> gerilme altında oluşan deplasman miktarı 20,03 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.42).



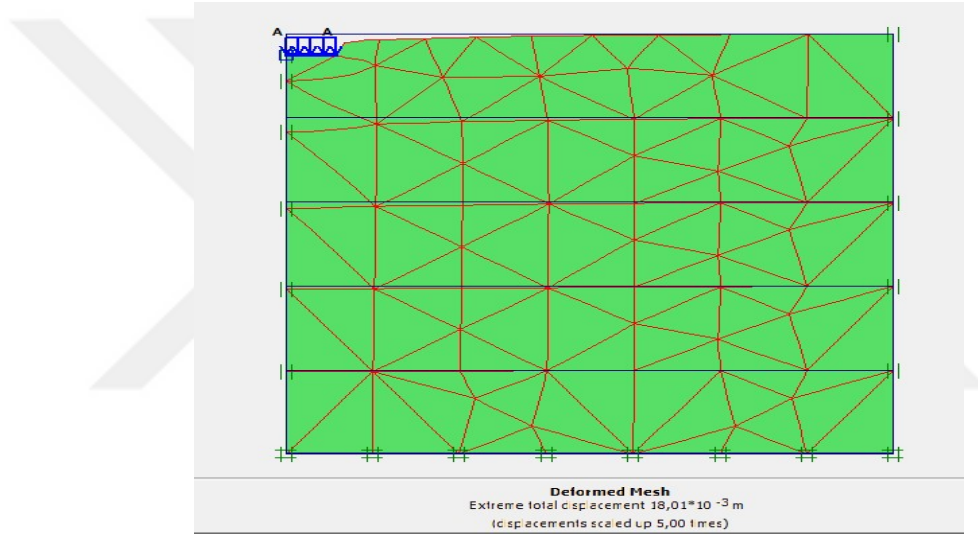
Şekil 4.42. B tabakasında poisson oranı 0,15 için uygulanan yükün deplasman değerlerinin hesabı

Poisson oranı 0,2;

$$20321,34 = \frac{E}{2(1+0,2)}$$

$$E = 48771,22 \text{ kN/m}^2$$

Elastisite modülü değeri 48771,22 kN/m<sup>2</sup>, poisson oranı 0,20 ve kayma modülü 20321,34 kN/m<sup>2</sup> olan zeminde 30 cm çapındaki plaka kullanılarak modellenen yükleme testinde 1167 kN/m<sup>2</sup> gerilme altında oluşan deplasman miktarı 18,01 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.43).



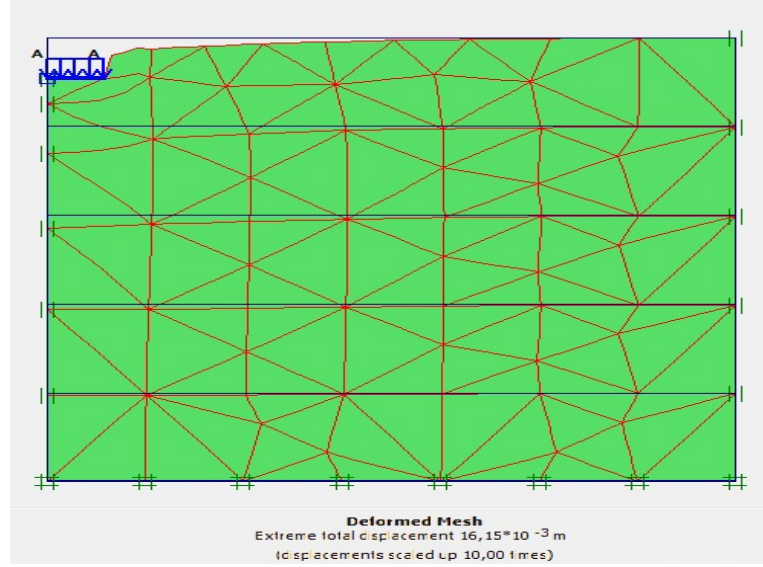
Şekil 4.43. B tabakasında poisson oranı 0,20 için uygulanan yükün deplasman değerlerinin hesabı

Poisson oranı 0,25;

$$20321,34 = \frac{E}{2(1+0,25)}$$

$$E = 50803,35 \text{ kN/m}^2$$

Elastisite modülü değeri 50803,35 kN/m<sup>2</sup>, poisson oranı 0,25 ve kayma modülü 20321,34 kN/m<sup>2</sup> olan zeminde 30 cm çapındaki plaka kullanılarak modellenen yükleme testinde 1167 kN/m<sup>2</sup> gerilme altında oluşan deplasman miktarı 16,15 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.44).



Şekil 4.44. B tabakasında poisson oranı 0,25 için uygulanan yükün deplasman değerlerinin hesabı

B tabaka için farklı poisson oranları kullanılarak hesaplanan gerilme-deplasman değerleri Tablo 4.5’de verilmiştir. Zeminin poisson oranına bağlı olarak zemindeki oturma değerleri tablo 4.5’de 16,15-22,26 mm arasında hesaplanmıştır.

Tablo 4.5. B tabakası için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar

Poisson Oranı	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	Deplasman (mm)
0,10	34,5	22,26
0,15	34,5	20,03
0,20	34,5	18,01
0,25	34,5	16,15

#### 4.4. Arazi Ve Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tablo 4.4 ve 4.5’de görüldüğü gibi zeminin poisson oranındaki değişim yükleme anında oluşan deplasman miktarını önemli bir şekilde etkilemektedir. Burada A ve B tabakalar için poisson oranı 0,1-0,25 arasında belirli aralıklarla değiştirilerek model üzerinden yapılan yüklemelerde deplasman miktarları ölçülerek karşılaştırılmıştır. Tablolardan görüldüğü gibi zemin poisson oranı arttıkça yükleme sırasında zeminde meydana gelen deplasmanın azaldığı görülmektedir. Ayrıca arazi test sonuçları ile oluşturulan modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında Plaxis ile yapılan analizlerden elde edilen değerlerin gerçek değerlere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Tablo 4.6’da zemin ve model sonuçları bir arada gösterilmiştir.

Tablo 4.6’da arazi ve model sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’de arazi ve model sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.6. Arazi ve model sonuçlarının karşılaştırılması

Tabaka no	Poisson oranı	Araziden elde edilen deplasman (mm)	Modelden elde edilen deplasman (mm)	Fark (%)
A	0,2	4,00	4,41	10,25
B	0,2	20,36	18,01	13,04

#### 4.5. Boussinesq Sonuçları İle Plaxis Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Plaxis programına göre A tabakasının zemin derinliklerine inildikçe zemine uygulanan gerilme-deplasman değerleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 4.7. A tabakası için derinliğe bağlı gerilme ve deplasmandaki değişim

z(m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	Deplasman (mm)
0,175	-217,81	3,59
0,35	-188,49	2,96
0,525	-157,69	2,37
0,7	-135,34	1,88
0,875	-121,39	1,48
1,05	-110,27	1,09
1,225	-105,07	0,000770
1,4	-101,48	0,000473
1,575	-100,11	0,000237

Tablo 4.7’de görüldüğü gibi A tabakası için 1,225 m’den sonra zemine uygulanan gerilme sonucunda deplasmanda çok ufak değişimler meydana gelmektedir.

Plaxis programına göre B tabakasının zemin derinliklerine inildikçe zemine uygulanan gerilme-deplasman değerleri Tablo 4.8’de görüldüğü gibidir. B tabakası için 1,4 m’den sonra zemine uygulanan gerilme sonucunda deplasmanda çok ufak değişimler meydana gelmektedir.

Tablo 4.8. B tabakası için derinliğe bağlı gerilme ve deplasmandaki değişim

z (m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	Deplasman (mm)
0,175	-910,07	14,34
0,35	-723,97	11,57
0,525	-510,89	7,86
0,7	-373,95	5,27
0,875	-290,40	3,28
1,05	-236,04	2,38
1,225	-204,05	1,7
1,4	-184,63	1,04
1,575	-174,11	0,000484

Plaxis ve Boussinesq sonuçları;

Denklem 4.23 ile derinliğe bağlı gerilme hesabı yapılabilmektedir. Bu denklem;

$$\sigma_z = q \left[ \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{\frac{3}{2}}} - 1 \right] \quad (4.23)$$

eşitliğindeki gibi ifade edilir. Burada q üniform yayılı yük, z derinlik, a yarıçap, z belli derinlikteki gerilmeyi ifade eder.

A tabakasının aynı derinlikte Plaxis programı ile bulunan gerilme değerleri ile boussineq formülü ile bulunan gerilme değerleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 4.9. A tabakası için Boussinesq denkleminde elde gerilmelerin karşılaştırılması

z(m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	Boussinesq Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0,175	-217,81	-248,72
0,35	-188,49	-131
0,525	-157,69	-72,321
0,7	-135,34	-44,374
0,875	-121,39	-29,634
1,05	-110,27	-21,075
1,225	-105,07	-15,712
1,4	-101,48	-12,145
1,575	-100,11	-9,6596

Tablo 4.9'da görüldüğü gibi A tabakasında derine inildikçe zemine uygulanan gerilmeler azalmakta ve belirli derinliğe inildikten sonra gerilme değerlerindeki azalış stabil kalmaktadır.

B tabakasının aynı derinlikte Plaxis programı ile bulunan gerilme değerleri ile Businessq denkleminde elde edilen gerilmelerin karşılaştırılması Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. B tabakası için Businessq denkleminde elde edilen gerilmelerin karşılaştırılması

z(m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )	Boussinesq Gerilme (kN/m <sup>2</sup> )
0,175	-910,07	-656,22
0,35	-723,97	-260,8
0,525	-510,89	-129,59
0,7	-373,95	-76,001
0,875	-290,40	-49,616
1,05	-236,04	-34,834
1,225	-204,05	-25,763
1,4	-184,63	-19,81
1,575	-174,11	-15,699

Tablo 4.10'da görüldüğü gibi B tabakasında derine inildikçe zemine uygulanan gerilmeler azalmakta ve belirli derinliğe inildikten sonra gerilme değerlerindeki azalış stabil kalmaktadır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Zemin iyileştirme uygulamaları özellikle yeterli taşıma gücüne sahip zeminlerin ilgili uygulamayı karşılayabilecek kapasiteye ulaşmasını sağlaması açısından önemlidir. Bu metotlar kireç ile zemin iyileştirmesi gibi uygulamanın kısa sürede ve ekonomik olarak yapılabilmesi gibi önemli avantajları vardır.

Tez kapsamında zemin iyileştirme metotlarından birisi olan kireç ile zemin iyileştirme yönteminin zemin taşıma gücü üzerindeki olumlu etkileri hem arazi testleri hem de sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen veriler doğrultusunda kireç katkısının zeminin taşıma gücünü arttırdığı, kireç katkılı zeminin etkiyen yükler altında daha küçük deplasmanların olduğu yani zeminin mukavemetinde artışa neden olduğu belirlenmiştir.

Araştırmanın en önemli sonucu zeminin elastisite modülü verilmeden zeminin kayma modülünü tekrarlı plaka yükleme deneyindeki gerilme-deformasyon grafiğini kullanarak bulunup sonrasında elastisite modülünü bulabilmek için kayma modülü formülü kullanılarak Plaxis te uygulanmasıdır. Plaxis programı ve plaka yükleme deney sonucundaki A tabakası için oturma değerleri 4,00-4,41 mm, B tabakası için 20,36-18,10 mm arasındadır. Bu durum Plaxis ile plaka yükleme deneyinin ortalama %90 gibi çok yüksek bir oranda çalıştığını göstermektedir. Uygulanan iki örnekte de sonuçlar birbirine çok yakın çıkmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere zemine uygulanan plaka yükleme deneyi Plaxis programı ile gerçeğe yakın bir şekilde modellenebilmektedir.

Çalışmada zemin sınıfının bulunabilmesi için dolgu zemininden alınan numunelere laboratuvarda CBR, Standart ve Modifiye Proctor deneyi, Elek analizi ve Arazi yoğunluk testleri uygulanarak arazi zemin sınıfı ML (düşük plastisiteli silt) malzemesi elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında 205 no'lu ada parselinde Alman standartları (DIN 18134) uygulanarak A ve B no'lu dolgu tabakalarının 35 cm olarak uygulanmıştır. Bu kapsamda dolgularda %2 oranında kireç kullanılarak iyileştirme yapılmıştır. Yapılan çalışmada daha sonra kireç uygulanan zemin birimleri üzerinde tekrarlı plaka yükleme testleri uygulanmış ve gerilme-deplasman eğrileri elde edilmiştir.

Plaka yükleme test sonuçlarından belirli gerilme değerlerine karşılık elde edilen oturma değerleri Plaxis programı ile tekrar modellenerek incelenmiştir. Modelleme de A ve B tabakası için poisson oranı değiştirilerek yeni elastisite modülleri hesaplanmış daha sonra hesaplanan elastisite modelleri Plaxis analizlerinde kullanılmıştır.

Deneyden elde edilen zemin parametreleri ise aşağıdaki gibidir;

A tabakası:  $BHA = 19,65 \text{ kN/m}^2$ ,  $E = 45892,78 \text{ kN/m}^2$ ,  $\nu = 0,20$ ,  $w = \%22,49$   $c_{ref} = 67,2 \text{ kN/m}^2$ ,  $\phi = 32^\circ$ ,  $d = 45 \text{ cm}$ ,

B tabakası:  $BHA = 20,15 \text{ kN/m}^2$ ,  $E = 48771,22 \text{ kN/m}^2$ ,  $\nu = 0,20$ ,  $w = \%21,32$ ,  $c_{ref} = 67,2 \text{ kN/m}^2$ ,  $\phi = 32^\circ$ ,  $d = 30 \text{ cm}$  olarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında ayrıca Plaxis programı kullanılarak zeminin poisson oranını 0,1-0,25 arasında değiştirilerek zeminde meydana gelebilecek deformasyon miktarları karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu kapsamda Boussinesq tarafından önerilen denklemler kullanılarak belirli derinliklerde zeminin farklı kademelerinde oluşan gerilme değerleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlardan kısaca bahsetmek gerekirse;

1-) Çalışma kapsamında 205 no'lu ada parselinde Alman standartları (DIN 18134) uygulanarak A ve B dolgu tabakaları 35 cm olarak uygulanmıştır. Bu kapsamda dolgularda %2 oranında kireç kullanılarak iyileştirme yapılmıştır. Daha sonra kireç uygulanan zemin birimleri üzerinde tekrarlı plaka yükleme testleri uygulanmış gerilme-yük eğrileri elde edilmiş ve tabakaların kayma modülü formülü yardımıyla



zeminin A tabakanın kayma modülü  $G = 194,94 \text{ kg/mm}^2$  ve B tabakalarının kayma modülü ise  $G = 207,22 \text{ kg/mm}^2$  olarak bulunmuştur.

2-) Plaka yükleme test sonuçlarında belirli gerilme değerlerine karşılık elde edilen oturma değerleri Plaxis programı ile tekrar modellenerek incelenmiştir. Modelleme de A ve B tabakalar için poisson oranı 0,10 - 0,25 birim arasındaki değişimine bağlı olarak A tabakasının elastisite modülü ( $E$ ) =  $42068 \text{ kN/m}^2$  -  $47804,98 \text{ kN/m}^2$  arasındadır. B tabakasının için elastisite modülü ( $E$ ) =  $44706,94 \text{ kN/m}^2$  -  $50803,35 \text{ kN/m}^2$  arasında bulunmuştur.

3-) A tabakası için gerçek sonuçlar ile Plaxis sonuçlardan elde edilen deplasmanlar karşılaştırıldığında %10,25 fark, B tabakası için gerçek sonuçlar ile Plaxis sonuçları karşılaştırıldığında ise %13,04 fark elde edilmiştir.

4-) Hem A hem de B tabakalar için poisson oranları 0,1'den 0,25'e göre değişimine bağlı olarak oturma miktarları A tabakası için incelendiğinde, poisson oranı arttıkça zeminde oluşan deplasman miktarının 5,08 mm'den 4,06 mm'ye B tabakasının ise 22,26 mm'den 16,15 mm'ye düştüğü görülmüştür.

Kireç ile zemin iyileştirme uygulamasının zeminin taşıma kapasitesini arttırdığı bu tez çalışması ile bir kez daha vurgulanmıştır. Bu çalışma ileride yapılacak bilimsel araştırmalara katkı sağlamaktadır. İleri ki çalışmalarda kireç katkısının zemin üzerindeki etkileri farklı zemin türleri için farklı bilgisayar programları kullanılarak incelenebilir.

## KAYNAKLAR

Alrubaye A.J., Hasan M., Fattah M.Y., Engineering Properties of Clayey Soil Stabilized with Lime, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, **11**, 2434-2441.

Bhagowati B., Borthakur N., Impact of Cyclic Wetting-Drying Cycle on Swelling Behaviour of Lime And Fly Ash Stabilized Expansive Soil, *50th Indian Geotechnical Conference*, Maharashtra, India, 17-19 December 2015.

Bozbey İ., Zemin Sınıflandırması ve Zemin Özellikleri – Laboratuvar Deneyleri, *İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Geoteknik Kursu*, İstanbul, Türkiye, 19-27 Kasım, 2016.

Das B. M., Soil Compaction, Editors: Gowans H., *Principles of Geotechnical Engineering*, 7th ed., Cengage Learning, USA, 114-127, 2010.

Das B., *Principles of Foundation Engineering*, 6th ed., Thomson Learning, USA, 2007.

Dipova N., Cangir B., Doğal Zeminlerin ve Yapay Dolguların Plaka Yükleme Deneyi ile İncelenmesi, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 2013, **37**, 49-62.

Doğan K., Gökay M.K., Plaka Gerilme Deney Sonuçlarının Toprak ve Kayaç Zeminlerde Gösterdiği Farklılıklar, *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Dergisi*, 2006, **21**, 161-174.

Doğan S., Sonlu Elemanlar Metodu ile Dolgu Zemin Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 259466.

Joe M., Rajesh A.M., Soil Stabilization Using Industrial Waste and Lime, *International Journal Of Scientific Research Engineering & Technology*, 2015, **4**, 799-805.

Kavak A., Earth Fill Modelling with Finite Element Method, *Mathematical and Computational Applications*, 2011, **16**, 565-575.

Kavak A., The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996, 50492.

Kaya A.G., Karayolu Tabakalarında Plaka Yükleme Deneyinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011, 275479.

Kızılcılık M.M., Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 275771.

Locat J., Berube M.A., Choquette M., Laboratory Investigations on the Lime Stabilization of Sensitive Clays: Shear Strength Development, *Can. Geotech. J.*, 1990, **27**, 294-304.

Neubauer C.H., Thompson M.R., Stability Properties of Uncured lime-Treated Fine-Grained Soil, *Highway Research Board*, 1972, **381**, 20-26.

Oh W.T., Vanapalli S.K., Scale Effect of Plate Load Tests in Unsaturated Soils, *Int. J. of Geomate*, 2013, **4**, 585-594.

Teodoru I.B., Toma I.O., Numerical Analyses of Plate Loading Test, *Universitatea Tehnica*, 2009, **55**, 57-65.

TS 1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2006.

TS 5744, İnşaat Mühendisliğinde Temel Zemini Özelliklerinin Yerinde Ölçümü, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1988.

URL-1: [http://www.imo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/0065ed90be0fa16\\_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16](http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/0065ed90be0fa16_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16), (Ziyaret tarihi: 21 Ocak 2018).

URL-2: <https://cms.inonu.edu.tr/uploads/contentfile/1359/files/s%C4%B1k%C4%B1%C5%9Ft%C4%B1rma.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 04 Şubat 2018).

URL-3: <https://drive.google.com/file/d/0B2QdE5E7GU6dMjVMbDVpdHZCVVE/view>, (Ziyaret Tarihi: 21 Ocak 2018).

Uzuner B.A., *Temel Zemin Mekaniği*, 8.Basım, Derya Kitabevi, Trabzon, 2012.

Uzuner B.A., Plaka Yükleme Deneyi Üzerine, *TMH*, 1988, **340**, 16-21.

Wang L., Reston E.Y., Analysis of Asphalt Pavement Materials and Systems Emerging Methods , *Proceedings of the Symposium on the Mechanics of Flexible Pavements*, Colorado, USA, 25-30 June, 2006.

Warmate T., Bearing Capacity Determination Using Plate Load Test in Calabar, *EJGE*, 2014, **19**, 4577-4588.

Yetimoğlu T., Kum Zemine Oturan Temellerin Taşıma Kapasitesinin Modifiye Duncan Modeli Kullanılarak Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Parametrik Analizi, *İMO Teknik Dergi*, 2003, **205**, 3057-3068.

Yıldırım S., *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, 1 Basım, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2002.



EK-A

FIELD DENSITY TEST / ARAZİ YOĞUNLUK TESTİ						
NUCLEAR METHOD / NÜKLEER METOT ( TS 1900 - 1 )						
Gauge Data / Cihaz Bilgileri						
Name of the Gauge / Cihazın Adı :	TROXLER 3440					
Serial Number / Seri No :	36983					
Laboratory Data of Filling Material / Dolgu Malzemesinin Laboratuvar Bilgileri						
Max Dry Density / Maksimum kuru yoğunluk ( kg/m <sup>3</sup> )	1691					
Optimum Moisture / Optimum su muhtevası ( % )	13,39					
Gauged Data From Field / Arazide Cihazla Ölçülmüş Değerler						
Test Number	Wet Unit Weight of Soil	Water Content	Dry Unit Weight of Soil	Relative Compaction	Coordinate	Explanation
Test No	Islak Yoğunluk ( kg / m <sup>3</sup> )	Su Muhtevası ( % )	Kuru Yoğunluk ( kg / m <sup>3</sup> )	Relatif Sıkıştırma ( % )	Tabaka ( Kot )	Açıklama
1	1776	9,60	1620	95,8	205 ADA KİREÇLİ A TABAKASI ÜST PARSEL	sıkıştırma uygun
2	1899	16,20	1634	96,6		sıkıştırma uygun
3	1823	14,00	1599	94,6		sıkıştırma uygun değil
4	1877	15,20	1629	96,4		sıkıştırma uygun
5	1873	14,30	1639	96,9		sıkıştırma uygun
6	1825	13,10	1614	95,4		sıkıştırma uygun
7	1832	13,20	1618	95,7		sıkıştırma uygun
8	1889	12,40	1681	99,4		sıkıştırma uygun
9	1895	10,80	1710	101,1		sıkıştırma uygun
10	1907	14,70	1663	98,3		sıkıştırma uygun
11	1884	12,70	1672	98,9		sıkıştırma uygun
12	1824	10,50	1651	97,6		sıkıştırma uygun

	100,00	100,00000000			
2"	50,800	100,00000000	0	0	0
1 1/2"	38,100	100,00000000	0	0	0
1"	25,400	100,00000000	0	0	0
3/4"	19,050	100,00000000	0	0	0
1/2"	12,500	100,00000000	0	0	0
3/8"	9,525	100,00000000	0	0	0
No 4	4,760	97,70554493	0	0	0
No 10	2,000	91,96940727	0	0	0
No 20	0,845	85,27724665	0	0	0
No 40	0,425	79,73231358	0	0	0
No 100	0,149	54,68451243	0	0	0,186117208
No 200	0,075	52,39005736	0	0	0

EK-B

FIELD DENSITY TEST / ARAZİ YOĞUNLUK TESTİ						
NUCLEAR METHOD / NÜKLEER METOT ( TS 1900 - 1 )						
Gauge Data / Cihaz Bilgileri						
Name of the Gauge / Cihazın Adı :	TROXLER 3440					
Serial Number / Seri No :	36983					
Laboratory Data of Filling Material / Dolgu Malzemesinin Laboratuvar Bilgileri						
Max Dry Density / Maksimum kuru yoğunluk ( kg/m <sup>3</sup> )	1738					
Optimum Moisture / Optimum su muhtevası ( % )	10,39					
Gauged Data From Field / Arazide Cihazla Ölçülmüş Değerler						
Test Number	Wet Unit Weight of Soil	Water Content	Dry Unit Weight of Soil	Relative Compaction	Coordinate	Explanation
Test No	Islak Yoğunluk ( kg / m <sup>3</sup> )	Su Muhtevası ( % )	Kuru Yoğunluk ( kg / m <sup>3</sup> )	Relatif Sıkıştırma ( % )	Tabaka ( Kot )	Açıklama
1	1929	12,70	1712	98,5	205 ADA KİREÇLİ B TABAKASI ÜST PARSEL (Sol Tarafındaki Paçya)	sıkıştırma uygun
2	1973	13,10	1744	100,4		sıkıştırma uygun
3	1930	13,40	1702	97,9		sıkıştırma uygun
4	1894	10,40	1716	98,7		sıkıştırma uygun
5	1810	8,40	1670	96,1		sıkıştırma uygun
6	1927	12,40	1714	98,6		sıkıştırma uygun
7	1820	11,70	1629	93,7		sıkıştırma uygun
8	1953	12,00	1744	100,3		sıkıştırma uygun
9	1888	9,40	1724	99,2		sıkıştırma uygun
10	1889	11,50	1694	97,5		sıkıştırma uygun
11	1941	13,40	1712	98,5		sıkıştırma uygun
12	1859	12,40	1654	95,2		sıkıştırma uygun
13	1802	7,80	1672	96,2		sıkıştırma uygun
14	1932	12,20	1722	99,1		sıkıştırma uygun

	<b>100,00</b>	<b>100,00000000</b>			
2"	<b>50,800</b>	<b>100,00000000</b>	0	0	0
1 1/2"	<b>38,100</b>	<b>100,00000000</b>	0	0	0
1"	<b>25,400</b>	<b>100,00000000</b>	0	0	0
3/4"	<b>19,050</b>	<b>100,00000000</b>	0	0	0
1/2"	<b>12,500</b>	<b>100,00000000</b>	0	0	0
3/8"	<b>9,525</b>	<b>100,00000000</b>	0	0	0
No 4	<b>4,760</b>	<b>97,98387097</b>	0	0	0
No 10	<b>2,000</b>	<b>81,85483871</b>	0	0	0
No 20	<b>0,845</b>	<b>77,01612903</b>	0	0	0
No 40	<b>0,425</b>	<b>61,85483871</b>	0	0	0
No 100	<b>0,149</b>	<b>52,41935484</b>	0	0	0,345863432
No 200	<b>0,075</b>	<b>50,32258065</b>	0	0	0
			<b>0,0000</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,3459</b>

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Kavak A., **Yıldırım T.O.**, Kil İçeren Daneli Zeminde, Bir Kireç Stabilizasyonu Uygulaması, *Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi, Katı Atık Kirlenmesi Araştırma ve Denetimi Türk Milli Komitesi*, Konya, 9-11 Mayıs, 2018.



## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'nde tamamladı. 2008 yılında girdiği Mustafa Kemal Üniversitesi İskenderun Meslek Yüksek Okulu Metalurji ve Malzeme Teknolojisi Bölümü'nden 2010 yılında Metalurji ve Malzeme teknikeri olarak mezun oldu. 2010 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne başladı. 2014 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2015 yılında Şenol İnşaat Firmasında saha mühendisi olarak göreve başladı. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılında Çelik Yapı Proje İmalat Montaj San. ve Tic. A.Ş.'de Şantiye Şefi olarak halen çalışmaktadır.

