

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOYGUN VE DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ KAVRAMLARI İLE
SIĞ TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Feyzullah GÜLŞEN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

OCAK 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOYGUN VE DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ KAVRAMLARI İLE
SIĞ TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Feyzullah GÜLŞEN
(501101321)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Aykut ŞENOL

OCAK, 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101321 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Feyzullah GÜLŞEN** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ **Doygun ve Doygun Olmayan Zemin Mekanığı Kavramları İle Sığ Temellerin Taşıma Gücü**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Aykut ŞENOL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mete İNCECİK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **17 Aralık 2012**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans çalışmalarım süresince çalışmalarına yön veren, bilgi ve tecrübesini paylaşan, günlük yaşantısında güler yüzünü hiç eksik etmeyen değerli hocam Doç. Dr. Aykut ŞENOL' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Değerli görüşlerinden yaralandığım İstanbul Teknik Üniversitesi Geoteknik Kürsüsü hocalarıma, bana vaktini ayırmaktan hiçbir zaman kaçınmayan Araştırma Görevlisi Sayın Nil TAYLAN KUTLU' ya, zor zamanlarımda yardımlarını esirgemeyen Araştırma Görevlisi Sayın Ayşegül BAYIN'a, zemin mekaniği laboratuvarı çalışanlarına, bana sonsuz destek olan ve sıkıntılarımı paylaşan tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim. Bu günlere gelebilmem için maddi ve manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan annem ve babama, tüm aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Aralık 2012

Feyzullah GÜLŞEN
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam.....	3
2. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ VE TAŞIMA GÜCÜ	5
2.1 Doygun Olmayan Zemin Mekanîği Kavramı.....	5
2.1.1 Zemin emme gerilmesi.....	7
2.1.2 Doygun olmayan zeminlerde net normal gerilme, efektif gerilme ve gerilme tensörleri	9
2.1.3 Zemin su karakteristik eğrisi	11
2.2 Taşıma Gücü	14
2.3 Kırılma Mekanizmaları	16
2.3.1 Genel kayma kırılması	17
2.3.2 Yerel kayma kırılması	17
2.3.3 Zımbalama kayma kırılması.....	18
2.4 Doygun Zeminlerin Taşıma Gücü.....	19
2.4.1 Prandtl (1921)	20
2.4.2 Terzaghi (1943).....	21
2.4.3 Meyerhof (1951)	23
2.4.4 Vesic (1975).....	23
2.5 Doygun Olmayan Zeminlerin Taşıma gücü	24
2.5.1 Broms (1964)	26
2.5.2 Steensen-Bach (1987)	27
2.5.3 Fredlund ve Rahardjo (1993)	27
2.5.4 Oloo ve arkadaşları (1997).....	29
2.5.5 Mohamed ve Vanapalli (2006)	29
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
3.1 Laboratuvar Deneyleri.....	33
3.1.1 Elek analizi ve hidrometre deneyleri	34
3.1.2 Kıvam limitleri deneyi	35
3.1.3 Standart kompaksiyon deneyi (Standart proktor deneyi).....	36
3.1.4 Dane birim hacim ağırlığı belirlenmesi ve izafi sıklık deneyi	37
3.1.5 Kesme kutusu deneyi	38
3.1.6 Tempe basınç hücresi	39
3.1.7 Basınç plakası	41

3.2 Numunelerin Mühendislik Özellikleri.....	43
3.2.1 Numune I (CL).....	43
3.2.2 Numune II (SP).....	47
3.2.3 Numune III (%50 CL + %50 SP).....	49
3.2.4 Numune IV (%25 CL + %75 SP).....	52
3.2.5 Numune V.....	54
3.2.6 Numune VI.....	55
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TAŞIMA GÜCÜ ANALİZİ.....	59
4.1 Giriş.....	59
4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	59
4.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı.....	61
4.4 GeoStudio Paket Programı.....	62
4.5 GeoStudio SIGMA/W Paket Programı Kullanılarak Modelin Oluşturulması.....	63
4.5.1 Modelin geometrisinin oluşturulması.....	64
4.5.2 Malzeme özelliklerinin tanımlanması.....	66
4.5.2.1 Lineer Elastik model (LE).....	67
4.5.2.2 Elastik plastik model (MC).....	70
4.5.3 Sınır koşulları.....	71
4.5.4 Yükün uygulanması.....	72
4.5.5 Sonlu eleman ağının oluşturulması.....	72
4.5.6 Modelin çözümü.....	73
5. TAŞIMA GÜCÜ ANALİZİ SONUÇLARI.....	75
5.1 Tamamen Kuru Zeminde Modellerin Taşıma Gücü.....	75
5.2 Doygun Zeminde Modellerin Taşıma Gücü.....	81
5.3 Doygun Olmayan Zeminde Modellerin Taşıma Gücü.....	84
5.4 Modellerin Değerlendirilmesi.....	88
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
6.1 Sonuçlar.....	96
6.2 Öneriler.....	96
KAYNAKLAR.....	99
EKLER.....	103
EK A : Taşıma Gücü Katsayıları.....	104
EK B : Plastisite Kartı.....	105
EK C: Kesme Kutusu Deney Sonuçları.....	106
EK D: VanGenuchten'e göre düzeltilmiş SWCC.....	108
EK E: Model Sonuçları.....	110
ÖZGEÇMİŞ.....	135

KISALTMALAR

a	: Zeminine bağılı hava giriş katsayısı
AKO	: Aşırı konsolide oranı
B	: Temel kısa kenar uzunluğu
c	: Kohezyon
C	: Hacimsel su muhtevasının sıfır olması durumundaki katsayı
C	: Çözünenlerin konsantrasyonu
C_u	: Uniformluk katsayısı
C_c	: Derecelenme katsayısı
DOZ	: Doygun olmayan zemin
D_f	: Temel derinliği
D_r	: İzafi sıkılık oranı
D₁₀	: Granülometre Eğrisinde %10'a Karşılık Gelen Dane Çapı
D₃₀	: Granülometre Eğrisinde %30'a Karşılık Gelen Dane Çapı
D₆₀	: Granülometre Eğrisinde %60'a Karşılık Gelen Dane Çapı
d_c	: Derinlik faktörü
d_q	: Derinlik faktörü
d_γ	: Derinlik faktörü
E	: Elastisite modülü
e	: Boşluk oranı
i_c	: Yük uygulama faktörü
i_q	: Yük uygulama faktörü
i_γ	: Yük uygulama faktörü
I_p	: Plastisite indisi
K₁	: Temel tabanı şekline göre katsayı
K₂	: Temel tabanı şekline göre katsayı
n	: Avagadro sayısı
N_c	: Taşıma gücü katsayısı
N_γ	: Taşıma gücü katsayısı
N_q	: Taşıma gücü katsayısı
s_c	: Şekil faktörü
s_q	: Şekil faktörü
s_γ	: Şekil faktörü
SWCC	: Zemin su karakteristik eğrisi
q	: Temel tabanı üzerinde zemin ağırlığında ötürü oluşan sürsaj yükü
θ_w	: Hacimsel su muhtevası
θ_s	: Doygun hacimsel su muhtevası
φ	: Kayma mukavemeti açısı
φ^b	: Emmeye bağlı içsel sürtünme açısı
R	: Genel gaz sabiti
T	: Mutlak sıcaklık
t°	: Sıcaklık (°C)
v_{wo}	Suyun özgül hacmi
w_v	: Su buharının moleküler kütlesi

$\bar{u}_v$	: Boşluk suyu buharının kısmi basıncı
u_a	: Boşluk hava basıncı
u_w	: Boşluk su basıncı
γ	: Birim hacim ağırlığı
γ_K	: Kuru birim hacim ağırlığı
χ	: Doygunluk derecesine bağlı parametre
Ψ	: Zemin emme gerilmesi
Ψ_{II}	: Ozmatik emme
λ_m	: Derinlikle matrik emme basıncı azalma oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1: Müsaade edilebilir oturma limitleri [31]	16
Çizelge 2. 2: Günümüze kadar iz bırakmış taşıma gücü çalışmaları	20
Çizelge 2. 3 : Terzaghi (1943) şekil katsayıları	22
Çizelge 2. 4 : Doygun olmayan zeminlerde yapılmış taşıma gücü çalışmaları	25
Çizelge 3. 1 : Kullanılan numuneler	33
Çizelge 3. 2 : Numune I' in endeks özellikleri	43
Çizelge 3. 3 : Numune II' in endeks özellikleri	48
Çizelge 3. 4 : Numune V' e ait özellikleri [11]	54
Çizelge 3. 5 : Numune VI' ya ait özellikleri [11]	56
Çizelge 4. 1 : Kumlar için elastisite modülü aralıkları [31]	68
Çizelge 4. 2 : Farklı Zeminlere ait Poisson Değerleri Aralıkları [31]	69
Çizelge 5. 1 : Zemin numunelerine ait Elastik-Plastik modeller için kullanılan program girdileri	77
Çizelge 5. 2: Tamamen kuru modellerde hesaplanan taşıma gücü değerleri	79
Çizelge 5. 3 : Doygun modellerde hesaplanan taşıma gücü değerleri	81
Çizelge 5. 4 : YASS B kadar aşağıda yer alan doymun olmayan modellerde hesaplanan taşıma gücü değerleri.....	85
Çizelge 5. 5 : YASS 2B kadar aşağıda yer alan doymun olmayan modellerde hesaplanan taşıma gücü değerleri.....	86
Çizelge A. 1 : Taşıma gücü katsayıları	104

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Zemindeki boşluk suyu basıncı değişimi [5].....	7
Şekil 2.2 : Normal ve kayma gerilmeleri a) kuru durumda b)doygun durumda [8]..	10
Şekil 2.3 : Doymamış zeminlerdeki gerilme tensörleri a) net normal gerilme ve matrik emme b) efektif gerilme yaklaşımına göre [8]	11
Şekil 2.4 : Doygun bir zeminin kuruma aşaması [14]	13
Şekil 2.5 : Temellerde oluşan oturmalar [24]	15
Şekil 2.6 : Genel kayma kırılmasına maruz kalmış temel ve yük oturma eğrisi [24]	17
Şekil 2.7 : Yerel kayma kırılmasına maruz kalmış temel ve yük oturma eğrisi[24] .	18
Şekil 2.8 : Şekil 2.8 Zımbalama kayma kırılmasına maruz kalmış temel ve yük oturma eğrisi[24].....	18
Şekil 2.9 : Kumda oturan dairesel temeller için kırılma türlerinin belirlenmesi [26]	19
Şekil 2.10 : Prandtl'ın taşıma gücü modeli [23]	21
Şekil 2.11 : Terzaghi taşıma gücü teorisi [23]	23
Şekil 2.12 : Taşıma gücü formülünde çeşitli YASD durumları.....	24
Şekil 2.13 : Tipik bir temel altında oluşan boşluk suyu basıncı değişimi [7].....	26
Şekil 2.14 : Tekerlek basıncı & Esnek kaldırımdaki sınır tekerlek yükü [32]	27
Şekil 2.15 : Farklı açılara göre emme değerinin toplam kohezyondaki etkisi [7]	28
Şekil 2.16 : Mohamed ve Vanapalli' nin doygun olmayan zeminlerin taşıma gücünü hesaplamalarında kullandıkları model deney düzeneği [28].....	31
Şekil 2.17 : Tahmin edilen ve hesaplanan taşıma gücü değerler	32
Şekil 3.1 : Likit limit deneyi	36
Şekil 3.2 : Kesme kutusu deneyi	39
Şekil 3.3 : Tempe basınç hücresi deneyi	41
Şekil 3.4 : Basınç plakası deneyi	42
Şekil 3.5 : Numune I'e ait granülometri eğrisi	44
Şekil 3.6 : Numune I'e ait kompaksiyon eğrisi	44
Şekil 3.7 : Numune I'e ait kesme kutusu deney sonuçları.....	45
Şekil 3.8 : Numune I'e ait zemin su karakteristik eğrisi.....	46
Şekil 3.9 : Numune II'e ait granülometri eğrisi	47
Şekil 3.10 : Numune II'e ait kesme kutusu deney sonuçları	48
Şekil 3.11 : Numune II'e ait zemin su karakteristik eğrisi	49
Şekil 3.12 : Numune III'e ait kompaksiyon eğrisi.....	50
Şekil 3.13 : Numune III'e ait kesme kutusu deney sonuçları	51
Şekil 3.14 : Numune III'e ait zemin su karakteristik eğrisi	51
Şekil 3.15 : Numune IV'e ait kompaksiyon eğrisi	52
Şekil 3.16 : Numune IV'e ait kesme kutusu deney sonuçları.....	53
Şekil 3.17 : Numune IV' e ait zemin su karakteristik eğrisi.....	53
Şekil 3.18 : Numune V' e ait zemin su karakteristik eğrisi [11]	55
Şekil 3.19 : Numune VI' e ait zemin su karakteristik eğrisi [11]	57
Şekil 4. 1 : Bir sistemin sonlu eleman ağlarına ayrılması [48].....	60
Şekil 4. 2 : Tipik iki boyutlu sonlu elemanlar ve düğüm noktaları [47].....	60

Şekil 4. 3 : Şerit ve kare temeller altında oluşacak basınç soğanları (a)Şerit Temel, (b) Kare Temel [52].....	64
Şekil 4. 4 : <Set Unit and Scale> komutu ile yapılacak işlemler	65
Şekil 4. 5 : Programda var olan geometrik objeler [51].....	66
Şekil 4. 6 : Malzeme modeli ve malzeme özelliklerinin atanması	67
Şekil 4. 7 : Killi zeminlerde drenajsız kayma mukavemetine ve plastisite indisine göre elastisite modülü değerleri [52].....	69
Şekil 4. 8 : Sınır koşullarının oluşturulması	71
Şekil 4. 9 : Sonlu eleman ağının(mesh) oluşturulması	73
Şekil 5. 1 : Dairesel temele ait modelin geometrisi	76
Şekil 5. 2 : Şerit temele ait modelin geometrisi	77
Şekil 5. 3 : Tamamen kuru dairese modelde Numune I' e ait gerilme & yer değiştirme grafiği	78
Şekil 5. 4 : Tamamen kuru şerit modelde Numune I' e ait gerilme & yer değiştirme grafiği	79
Şekil 5. 5 : Tamamen kuru dairese modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri	80
Şekil 5. 6 : Tamamen kuru şerit modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri	80
Şekil 5. 7 : Doygun dairese modelde Numune I' e ait gerilme & yer değiştirme grafiği	82
Şekil 5. 8 : Doygun şerit modelde Numune I' e ait gerilme & yer değiştirme grafiği	82
Şekil 5. 9 : Doygun dairese modelde tüm numunelere ait gerilme ve yer değiştirme grafikleri	83
Şekil 5. 10 : Doygun şerit modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri	83
Şekil 5. 11 : Doygun olmayan dairese modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri (YASS B).....	85
Şekil 5. 12 : Doygun olmayan şerit modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri (YASS B).....	86
Şekil 5. 13 : Doygun olmayan dairese modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri (YASS 2B).....	87
Şekil 5. 14 : Doygun olmayan şerit modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri (YASS 2B).....	87
Şekil 5. 15 : Dairesel modelde Numune I' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları	89
Şekil 5. 16 : Şerit modelde Numune I' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları.....	89
Şekil 5. 17 : Dairesel modelde Numune II' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları	90
Şekil 5. 18 : Şerit modelde Numune II' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları	91
Şekil 5. 19 : Dairesel modelde Numune III' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları	91
Şekil 5. 20 : Şerit modelde Numune III' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları ...	92
Şekil 5. 21 : Dairesel modelde Numune IV' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları	92
Şekil 5. 22 : Şerit modelde Numune IV' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları ...	93
Şekil 5. 23 : Dairesel modelde Numune V' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları	93
Şekil 5. 24 : Şerit modelde Numune V' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları	93
Şekil 5. 25 : Dairesel modelde Numune VI' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları	94

Şekil 5. 26 : Şerit modelde Numune VI' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları...	94
Şekil B. 1: Plastisite kartı	105
Şekil C. 1 : Numune I'ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları	106
Şekil C. 2 : Numune II'ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları	106
Şekil C. 3 : Numune III'e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.....	107
Şekil C. 4 : Numune IV'ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları.....	107
Şekil D. 1 : Numune I'e ait düzeltilmiş SWCC.....	108
Şekil D. 2 : Numune III'ye ait düzeltilmiş SWCC	108
Şekil D. 3 : Numune VI'e ait düzeltilmiş SWCC.....	109
Şekil E. 1 : Numune I'e ait dairesel tamamen kuru modelin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	110
Şekil E. 2 : Numune I' e ait dairesel doygun modelin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği.....	110
Şekil E. 3 : Numune I' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	111
Şekil E. 4 : Numune I' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	111
Şekil E. 5 : Numune I' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	112
Şekil E. 6 : Numune I' e ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği.....	112
Şekil E. 7 : Numune I' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	113
Şekil E. 8 : Numune I' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	113
Şekil E. 9 : Numune II' e ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	114
Şekil E. 10 : Numune II' e ait dairesel doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	114
Şekil E. 11 : Numune II' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	115
Şekil E. 12 : Numune II' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	115
Şekil E. 13 : Numune II' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	116
Şekil E. 14 : Numune II' e ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği.....	116
Şekil E. 15 : Numune II' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	117
Şekil E. 16 : Numune II' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	117
Şekil E. 17 : Numune III' e ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	118
Şekil E. 18 : Numune III' e ait dairesel doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	118
Şekil E. 19 : Numune III' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	119
Şekil E. 20 : Numune III' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	119

Şekil E. 21 : Numune III' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	120
Şekil E. 22 : Numune III' e ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	120
Şekil E. 23 : Numune III' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	121
Şekil E. 24 : Numune III' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	121
Şekil E. 25 : Numune IV' e ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	122
Şekil E. 26 : Numune IV' e ait dairesel doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	122
Şekil E. 27 : Numune IV' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	123
Şekil E. 28 : Numune IV' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	123
Şekil E. 29 : Numune IV' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	124
Şekil E. 30 : Numune IV' e ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	124
Şekil E. 31 : Numune IV' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	125
Şekil E. 32 : Numune IV' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	125
Şekil E. 33 : Numune V' e ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	126
Şekil E. 34 : Numune V' e ait dairesel doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	126
Şekil E. 35 : Numune V' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	127
Şekil E. 36 : Numune V' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	127
Şekil E. 37 : Numune V' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	128
Şekil E. 38 : Numune V' e ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	128
Şekil E. 39 : Numune V' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	129
Şekil E. 40 : Numune V' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	129
Şekil E. 41 : Numune VI' ya ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	130
Şekil E. 42 : Numune VI' ya ait dairesel doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	130
Şekil E. 43 : Numune VI' ya ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	131
Şekil E. 44 : Numune VI' ya ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	131
Şekil E. 45 : Numune VI' ya ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	132

Şekil E. 46 : Numune VI' ya ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği	132
Şekil E. 47 : Numune VI' ya ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B	133
Şekil E. 48 : Numune VI' ya ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B	133

DOYGUN VE DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ KAVRAMLARI İLE SIĞ TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ

ÖZET

Bu çalışmada, sıg temellerin taşıma gücüne ilişkin doygun zemin mekaniği ve doygun olmayan zemin mekaniğine göre elde edilmiş yaklaşımlar incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan GeoStudio Sigma-W 2007 programı kullanılarak farklı zemin türleri üzerinde, farklı durumlar için analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde; zeminin tamamen kuru olduğu durum, tamamen doygun olduğu durum ve doygun olmayan zemin mekaniği kavramları ile yeraltı su seviyesinin yüzeyden temel genişliğini ve temel genişliğinin iki katı kadar aşağıda yer aldığı durumlar araştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları görsel olarak elde edilip, yorumlanmıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinde altı adet zemin türü kullanılmıştır. Bu zemin türlerinden dört tanesi üzerinde, gerekli zemin mekaniği özelliklerinin belirlenmesi amacı ile İstanbul Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği labotuarında çeşitli zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar iki aşamada tamamlanmıştır. Bu aşamalardan birincisi, klasik zemin mekaniği deneylerini içermektedir. İkinci aşama ise doygun olmayan zemin mekaniği deneyleri yer almaktadır. Klasik zemin mekaniği deneylerinde; zeminlerin sınıflandırılması için elek analizi, hidrometre ve kıvam limitleri; kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesi için standart proktor deneyi ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için ise kesme kutusu deneyi yapılmıştır.

İkinci deney aşamasında ise doygun olmayan zeminlere ait zemin su karakteristik eğrisini belirlemek amacı ile deneyler yapılmıştır. Doygun olmayan zeminlerin mekanik davranışı üzerinde önemli etkisi bulunan matrik emme basınçları eksen kaydırma tekniği ile kontrol edilerek zeminlerin su tutma özellikleri belirlenmiştir. Zemin emme basıncı, doygun olmayan bir zeminin, boşluk suyunu adsorbe etme ve tutma potansiyelini ifade eden bir özelliktir. Zemindeki, su miktarı değişimi veya boşluk suyundaki eriyik madde değişimine göre emme basınçları değişmektedir. Doygun olmayan zeminlerin mekanik davranışları üzerinde önemli etkisi olan emme basıncının, zemindeki değişimini belirlemek ve ölçmek oldukça zordur. Bu konuda günümüzde halen birçok çalışma yürütülmektedir. Doygun olmayan zeminler için iki çeşit deney düzeneği kurulup sonuçlar elde edilmiştir. Bu deneyler tempe basınç hücresi ve basınç plakası deneyleridir.

Analizlerde kullanılan son iki zemin türü ise literatürde gerekli özellikleri belirlenmiş zeminlerdir. Elde edilen deneysel verilere bağlı olarak modelleme çalışmaları yürütülmüş ve analiz sonuçları değerlendirilerek, zeminlerin emme davranışının taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır.

BEARING CAPACITY OF SHALLOW FOUNDATIONS WITH RESPECT TO SATURATED AND UNSATURATED SOIL MECHANICS CONCEPTS

SUMMARY

Civil engineering structures have close relation with the ground and some structures are made entirely of soil-based materials. Soil mechanics is a specialist branch of civil engineering that addresses the investigation, analysis and prediction of soil behaviour. Unsaturated soil, which is the focus of this thesis, is an important, complex and not well-understood component of soil mechanics that presents geotechnical engineers with many challenges. The study of unsaturated soils is a practical subject.

For many years, unsaturated soils were either ignored in civil engineering design and construction analyses or were approached from the traditional framework of saturated soil mechanics. Today's civil engineer has led to realize that there is now an opportunity to reach problems involving unsaturated soil on a much more rational basis. The expanding knowledge base on the fundamental principles of unsaturated soil mechanics is increasingly being incorporated into a diverse branch of practical engineering problems.

Soil is a material which consisted of three different phases: air, liquid and solid. The air phase is generally bounded by the pore space not occupied by liquid. The matter within this pore space may be any gas, vapor, or combination of them. The liquid phase is generally bounded by the pore space not occupied by air. The solid phase consists of the soil grains or particles and may range from relatively fine-grained materials such as silts and clays, to organic material, to relatively coarse-grained materials such as sand or gravel. The concept of saturated soil refers to the condition which water fills all the voids, in other words the existing air removed and mentioned soil prism turn to two phases (solid and liquid). The state of stress in unsaturated soil is fundamentally different from the state of stress in saturated soil.

Unlike saturated soils, which are two-phase systems comprised essentially of solids and liquid only (i.e., soil particles and pore water as in a liquid-saturated system) or solids and gas only (i.e., soil particles and pore air as in a gas-saturated, or perfectly dry, system). In conventional applications of soil mechanics, soils are usually examined as saturated condition since it is the critical situation possible. Geotechnical engineers make calculations based on this critical situation and therefore design with respect to constitute safe condition. Since 33% of the earth's surface consist of arid and semi-arid climate conditions it seems obvious that calculations would be vulnerable to economic questions.

There are two important parameters that are taken into account when analyzing a structure foundation. These parameters are bearing capacity of foundation and settlement which cause by the induced stresses from constructed structure in the soil environment. Conventional soil bearing capacity and settlement calculations are

based on the saturated state of soil because of reason which has already mentioned during previous paragraph.

During the last five decades, unsaturated soil mechanics concept has developed. The bearing capacity and settlement properties of soil have been revised according to unsaturated soil mechanics. The bearing capacity and settlement calculations which made by using traditional formulas (using saturated concepts) exhibits less bearing capacity and high settlement values than real outcomes which has obtained from field experiments. This behavior may be attributed to neglecting the contribution of suction towards the bearing capacity of soils. Significant advances were made during the last twenty years towards understanding the engineering behavior of unsaturated soils; however, a valid framework for interpreting the bearing capacity of unsaturated soils has not been developed until recently.

Due to the fact that, the ground water level is founded far below the soil profile during the construction life, it is recommended that the calculations of bearing capacity and settlements are laid on unsaturated soil mechanics concepts.

Geotechnical properties of unsaturated soil such as internal angle of friction, effective cohesion, undrained shear strength, etc. depends on soil suction which formed above the ground water level. The soil suction is called as a water retention characteristic of soil. Soil suction pressure can be divided into two categories: matrix suction pressure and osmotic suction pressure. Matrix suction is defines as differences between pore air pressure and pore water pressure. On the other hand, the osmotic suction refers to osmotic pressure differences between pure water and molten salt solution. The basic design features of studies conducted on unsaturated soils by different researchers, shows that the suction pressure depends on water content in the soil. In the soil nature, water content can be defined as volumetric water content, degree of saturation or conventional water content and besides, suction pressure can be defined as total or matrix suction.

The relationship between these two parameters (suction and water content) of the soil functioned using Soil Water Characteristic Curve of the soil (SWCC). Experimental techniques for direct measurement of the soil-water characteristic curve provide a series of obtained data points comprising the relationship between soil suction and water content. Due to the costs and complexities associated with sampling, transporting, and preparing laboratory specimens or installing, maintaining, and monitoring field instrumentation, the number of measurements obtained for a given site is often too small to necessarily capture the significant variability of soil properties and stress conditions in the field. These parameters and related concepts are described in this research in more detailed.

Within this research, with the purpose of calculating bearing capacity of shallow foundations using unsaturated soil mechanics principles, two staged study system are carried out. As the first staged of study various engineering properties of samples has been determined by performing some laboratory experiments. During the second stage, soil parameters which obtained from laboratory experiments at the first stage are used in order to solving the foundation systems by use of GeoStudio Sigma-W 2007 finite element program.

The solution of shallow foundations used in Sigma-W program is conducted in three different models. These mentioned models are: fully dry soil model, fully saturated soil model and partially saturated models. In partially saturated models, the models are consisted using soil water characteristic curves which obtained in laboratory studies. The soil water characteristic curve formulated using two different experiments. These experiments are tempe pressure cell and pressure plate tests. At the study with the purpose of comparing different soil types, different soil samples are used. In partially saturated models two different criteria are investigated. The first criteria refer to ground water level beneath the designed surface as foundation width. Besides, the second criteria refer to round water level beneath the designed surface as twice of foundation width. Finite element analysis results are obtained and visually interpreted.

Six different types of soils used to finite element analysis. In order to define the necessary engineering soil properties of samples, related labouratory experiments are conducted at Istanbul Technical University Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Soil Mechanics Laboratory. Experimental studies completed in two stages. The first stage includes classical soil mechanics experiments. The second stage contains the unsaturated soil mechanics experiments. Classical soil mechanics experiments, includes classification of soil by making sieve analysis, hydrometer and consistency limits; compaction characteristics of soil by standard proctor test and determination of the shear strength properties by conducting direct shear test.

During the second stage of the experiments, the soil water characteristic curve of unsaturated soils are investigated. The unsaturated soil properties of samples are tested by using axis translation systems. The axis translation systems are based on the changing of total suction pressure is equal to changing at the matrix suction pressure. With the purpose of determining soil water characteristic curve two types of laboratory experiments are performed; tempe-pressure cell and the pressure plate.

Tempe pressure cells and pressure plated devices consist of a saturated HAE ceramic disk separating air and water chambers in a closed vessel with different dimensions in each one. Soil specimens are placed in the cell such that several pairs data points comprising the soil-water characteristic curve may be determined by applying increasing increments in air pressure. Equilibrium water content is determined for each pressure increment by weighing the entire apparatus. Once the highest level of matric suction is attained, the cell is disassembled and the final water content of the specimen is determined gravimetrically. The final water content may then be considered in light of the incremental changes in weight calculate water content values corresponding to the preceding levels of matric suction.

The last two soil types from total six soil samples chosen from literature. The modeling work carried out according to laboratory experiment outcomes. Previously, studies conducted finite element analysis using SIGMA/W of GEO-SLOPE in order to model the stress versus settlement behavior of foundations in unsaturated soil. The outcomes of the modeling studies illustrate that the suction pressure change the bearing capacity of shallow foundations.

All the above studies were encouraging; however, there is a need to conduct more model footing and field tests on different soils. Moreover, it is also important to

understand the various parameters that influence the bearing capacity and settlement behavior of unsaturated soils. Such studies will encourage the practicing engineers to extend the mechanics of unsaturated soils into practice.

1. GİRİŞ

Geleneksel zemin mekaniği uygulamalarında genellikle incelenen zemin, doymun durumda kabul edilerek hesaplamalar yapılmaktadır. Katı, sıvı ve hava olmak üzere üç fazdan oluşan zemin prizmasında en kritik durum, zeminin içersindeki boşlukların (sıvı + hava) su ile dolu olduğu koşulda oluşur. Zemin içersindeki boşlukların tamamının su ile dolu olduğu durum, zemin için doymun durum olarak isimlendirilir. Geoteknik mühendisleri de bu kritik duruma göre hesaplamalarını yapmakta ve tasarımlarını güvenli koşulda oluşturmaktadırlar. Fakat dünya yüzeyinin %33 kurak ve yarı kurak iklime sahip olduğu düşünülecek olursa, incelenen zeminlerin tasarım yapıldığı gibi doymun koşulda olmadığı gözlenmektedir.

Bir yapı temeli analiz edilirken iki önemli parametre dikkate alınır. Bu parametreler zeminin taşıma gücü ve yapıdan kaynaklanan ek gerilmeler neticesinde zemin ortamında meydana gelen oturmalarıdır. Geleneksel taşıma gücü ve oturma hesaplamalarında, birinci paragrafta anlatıldığı sebeplerden dolayı, bu parametreler doymun duruma göre elde edilir. Son elli yılda tamamen doymun olmayan zeminler için geliştirilen doymun olmayan zemin mekaniği kavramı ile zeminlerin taşıma gücü ve oturma hesaplamaları tekrar gözden geçirilmiştir [1]. Geleneksel zemin mekaniği (Doymun durumda) formülleri ile tasarlanmış temel sistemlerinde taşıma gücü arazideki gerçek sonuçlara göre daha az, oturmalar ise daha büyük sonuçlar vermektedir. Bu yüzden özellikle yapı ömrü süresince yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden oldukça aşağıda seyir eden zemin profilleri üzerine inşa edilmiş yapıların, taşıma gücü ve oturma değerleri doymun olmayan zemin mekaniği kavramları kullanılarak hesaplanması tavsiye edilir.

Doymun olmayan zeminlerde geoteknik yapıların tasarım özellikleri (kayma mukavemeti açısı, kohezyon, drenajsız kayma mukavemeti vb.) yeraltı su seviyesi üzerinde oluşan emme basıncı olarak isimlendirilen zeminin su tutma özelliğine bağlıdır. Emme basıncı ozmatik ve matrik emme olarak iki birleşenden oluşmaktadır. Matrik emme, boşluk hava basıncı ile boşluk suyu basıncı arasındaki fark; ozmatik emme ise, boşluk suyu içersinde bulunan eriyik tuzların saf su ile olan basınç farkı

olarak tanımlanırlar. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda zeminin temel tasarım özellikleri, zeminde emme basıncı değişimlerini doğuran, matrik emme ile zemin su muhtevası (doygunluk derecesi, hacimsel su muhtevası veya su muhtevası) arasındaki ilişkiden yararlanarak elde edilmektedir [2,3]. Bu iki parametre arasındaki ilişki zemine ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC, Soil Water Characteristic Curve) oluşturularak incelenmektedir. Bu parametreler ile ilgili kavramlar ileriki bölümlerde geniş bir şekilde açıklanmıştır.

1.1 Amaç

Araştırma kapsamında doygun olmayan zemin mekaniği prensipleri ile farklı zeminlerin taşıma gücünü hesaplamak için iki kademeli bir çalışma sistemi yürütülmüştür. Çalışma sistemine göre ilk olarak araştırmada kullanılan zeminlerin mühendislik özellikleri çeşitli laboratuvar deneyleri ile elde edilmiştir. İkinci aşamada ise laboratuvar deneylerinden elde edilen parametreler kullanılarak sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapan GeoStudio programı ile çeşitli temel sistemleri çözülmüştür. Temel sistemleri, profili oluşturan zeminin durumuna göre üç farklı kısımda incelenmiştir. Bu durumlar; tamamen kuru zemin, tamamen doygun zemin ve kısmi doygun (doygun olmayan) zemindir. Analizler yapılırken doygun olmayan durumda zeminler için SWCC kullanılmıştır. Doygun olmayan zeminlerde analizlerin yapılmasını sağlayan SWCC farklı zemin numuneleri için farklı iki deney sistemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu deney sistemleri basınç plakası ve tempe basınç hücresidir.

Doygun olmayan zeminlerin taşıma gücünü elde etmek için yapılan bu çalışmanın amaçları aşağıda başlıklar halinde özetlenmiştir.

- Doygun olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerini etkileyen SWCC eğrilerini iki farklı deney sistemi kullanarak elde etmek.
- Laboratuvar deneyleri ile taşıma gücü hesaplamalarında gerekli olan zemin parametrelerini elde etmek.
- Sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapan GeoStudio programı ile sığ temellerin taşıma gücünün modellenmesi.
- Aynı programda doygun olmayan zemin mekaniği parametreleri ile kısmi doygun zeminlerin taşıma gücünün hesaplanması.

- Farklı temel sistemlerinin taşıma gücüne etkisi.

1.2 Kapsam

Deneysel ve modelleme aşamalarından oluşan bu çalışmada zeminlerin farklı profillere göre taşıma gücü hesapları yapılmıştır. Deneyler sonucundan incelen zeminlerin kayma mukavemeti, kompaksiyon, sınıflandırma ve doymun olmayan zemin mekaniği özellikleri (SWCC) elde edilmiştir. Çalışma altı bölümde oluşan bir tez olarak sunulmuştur. İlk bölümde çalışmanın yapılma sebebi ve çalışmanın genel içeriği özetlenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde, zeminlerin emme gerilmesi ve taşıma gücü hesaplamalarından bahsedilmiştir. Bu kısımda emme gerilmesinin tanımı ve birleşenleri, farklı araştırmacıların taşıma gücü formülleri ve doymun olmayan zemin mekaniğinin temel birleşenleri açıklanmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmış deneyler ve bu deneylerin sonuçlarını içermektedir. Ayrıca bölümde, bu deneylerin yapılış aşamalarındaki temel bilgilere, farklı araştırmacılar tarafından elde edilen ve analizlerde kullanılan zemin özelliklerine de yer verilmektedir.

Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan GeoStudio paket programı hakkında temel bilgilere yer verilmiş ve program ile bir modelin oluşturulması aşama aşama açıklanmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde ise tasarımı yapılan iki farklı modelde incelenen zemin türlerinin doymun, tamamen kuru ve doymun olmayan durumlara ait taşıma gücü sonuçları verilmiştir.

Son bölümde ise deneysel ve model çalışmaları sonucunda elde edilen verilerden yararlanılarak çıkartılan genel sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

2. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ VE TAŞIMA GÜCÜ

Doygun olmayan zemin mekaniği kavramı 1900' lü yılların başında çalışılmaya başlanmasına rağmen geoteknik mühendislerinin bu konu üzerine ilgisi son yıllarda artmaktadır. Doymun olmayan zeminlerin (DOZ), doymun zeminlerden farkını oluşturan bazı özellikleri (zeminlerin emme gerilmesi, mukavemet özellikleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak hesaplamalarda çokça kullanılacak olan zemin su karakteristik eğrisi) bu bölüm içerisinde açıklanacaktır.

Taşıma gücü, zemin mekaniği uygulamalarında en çok karşılaşılan problemlerden biridir ve genelde doymun zemin mekaniği prensipleri ile hesaplanmaktadır. Bölümün ikinci kısmında zeminlerin taşıma gücü üzerinde durulmuştur. Taşıma gücünün nasıl hesaplanacağı, bu konu üzerinde atılmış ilk adımlardan günümüze kadar farklı araştırmacıların yaklaşımlarına değinilmiş ve zeminlerin kırılma mekanizmaları (göçme mekanizmaları) irdelenmiştir. Son kısımda ise doymun olmayan zemin mekaniğinde taşıma gücü hesaplarının üzerinde durulmuştur.

2.1 Doymun Olmayan Zemin Mekaniği Kavramı

Bir zemin prizmasının zemin danesi (katı), su ve hava fazlarından oluştuğı kabul edilmektedir. Terzaghi' ye göre 'Zemin mekaniğinde meydana gelen problemlerin kaynağı zeminin kendisi değil, boşluklarında tuttuğı sudur. Eğer susuz bir gezegende yaşamış olsaydık, zemin mekaniğine ihtiyaç olmayacaktır' [4]. Zemin mekaniğinin kurucularından olan; Karl Terzaghi'nin bu sözleri günümüzde geoteknik mühendisleri tarafından daha da iyi anlaşılmaktadır.

Klasik zemin mekaniği uygulamaları zeminlerin pozitif boşluk suyu basıncına sahip olduğu koşulları incelemektedir, fakat DOZ mekaniğinde boşluk suyu basıncının negatif olduğu koşullar da dikkate alınır.

Araştırmacılar, üç fazdan oluşan zemin yaklaşımı ile doymun ve kuru durumdaki zeminlerin kütle hacim ilişkilerini belirlemektedir. Özellikle ince dane içeren doymun

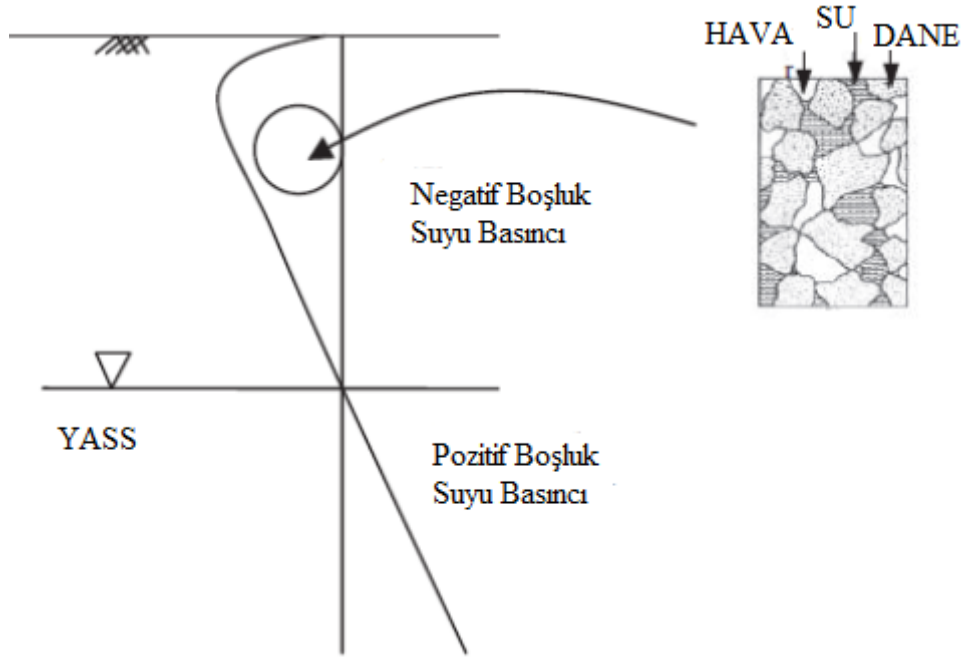
olmayan zeminlerin davranışları ise her zaman soru işaretlerini barındırmıştır. Bunu oluşturan sebeplerden birincisi, doymun olmayan durumda zemin prizmasına bir tabaka daha eklenmesidir. Bu tabaka hava ile su katmanları arasında yer alan ara yüzeydir. Hava su ara yüzeyi (contractile skin) olarak isimlendirilir ve moleküler boyuttadır [5]. Bu yüzden faz diyagramı hesaplamalarında ayrı bir tabaka olarak düşünülmez.

Zemin, kendisini oluşturan boşlukların boyutuna göre sınıflandırılabilir gibi, boşluklarındaki suyun durumuna göre de sınıflandırılır. Eğer zemindeki boşlukların tamamını su ile dolu ise *doymun zemin*, boşluklar kısmen su ile dolu ise *doymun olmayan zemin* olarak isimlendirilir. Bir zeminin bu kategorilerden hangisinde olduğunu ayırt etmek için en çok kullanılan parametre *doymunluk derecesidir*. Doymunluk derecesi (S), zemin boşluklarında yer alan suyun hacminin, tüm boşluk hacmine oranıdır. Pratikte doymunluk derecesi %98'den büyük olan zeminler doymun olarak isimlendirilir.

Doymunluk derecesinin tanımından da anlaşılacağı üzere, doymun olmayan zemin mekaniği, zemin boşluklarında havanın da bulunduğu durumu incelemektedir. Bu durum yeraltı su seviyesinin üzerinde bulunan negatif boşluk suyu basıncına sahip bölge için geçerlidir. Şekil 2.1' de doymun olmayan zemin örneği ve boşluk suyu basıncının derinlik ile değişimi gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere yeraltı su seviyesinin altında doymun durumdaki zemin için, pozitif boşluk suyu basıncı; yeraltı su seviyesi üzerinde ise negatif boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Yüzeye yakın kısımlarda ise yüksek su kaybından dolayı negatif boşluk suyu basıncında azalma meydana gelmektedir. Zemin mekaniği araştırmacıları için, bu bölgedeki zeminlerin negatif boşluk suyu basınçlarının ölçülmesi ve zemin içerisinde negatif boşluk suyu basıncı değişimini saptamak her zaman zor olmuştur. Ve genelde problemlili zeminler diye nitelendirilen zeminler, negatif boşluk suyu etkisine sahip olan zeminlerdir.

Doymun olmayan zemin mekaniğinin temelleri 1950'lerde Londra'da Imperial College'de yapılan çalışmalarla atılmıştır. Bu çalışmalar doymun zemin davranışı temel alınarak, DOZ davranışları incelenmiştir [6]. Daha sonraki yıllarda geoteknik mühendisleri bu temel yaklaşıma göre doymun olmayan zemin davranışları üzerinde çalışmalara devam etmişlerdir. Ancak konunun temel teorisi 1970'lerden sonra oluşturulmuştur [7]. Günümüzde de halen farklı geoteknik uygulamalarında soru

işaretlerini barındıran doymun olmayan zemin mekaniği üzerinde, birçok araştırmacı çalışmalarına devam etmektedir.



Şekil 2.1 : Zemindeki boşluk suyu basıncı değişimi [5]

2.1.1 Zemin emme gerilmesi

Zemin emme gerilmesi, doymun olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir [8]. Boşluk suyu basıncının neden olduğu zemin emme gerilmesi ile ilgili çalışmalar, ilk olarak 1900' lü yılların başlarında ortaya çıkmıştır [7,9]. 1943 yılında ise Edlefsen ve Anderson bu kavramı, zemin suyunun serbest enerjisi olarak tanımlamışlardır [10,11].

Doymun olmayan zeminlerin mukavemet, geçirgenlik, deformasyon vb. özelliklerini etkileyen zemin emme gerilmesi, en basit şekilde bir zeminin tuttuğu suyu çıkarabilmek için uygulanması gereken enerji olarak tanımlanır. Bu enerji termodinamik kanunlarından yararlanılarak, zemin suyunun kısmi buhar basıncına göre ölçülmektedir [12]. Kelvin denklemi kullanılarak su buhar basıncına ve diğer değişkenlere göre zemin emme gerilmesi Eşitlik 2.1 ile hesaplanır [8].

$$\Psi = -\frac{RT}{v_{wo} w_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{vo}}\right) \quad (2.1)$$

Formülde,

Ψ : Zemin emme gerilmesi ya da toplam emme (kPa)

R : Genel gaz sabiti [8,31432 J/(mol K)]

T : Mutlak sıcaklık [273,16 + t° (K)]

t° : Sıcaklık ($^{\circ}$ C)

v_{wo} Suyun özgül hacmi [(m³/kg), (1 / ρ_w)]

w_v : Su buharının moleküler kütlesi (18,016 kg/mol)

$\bar{u}_v$: Boşluk suyu buharının kısmi basıncı (kPa)

$\bar{u}_{v o}$: Aynı sıcaklıktaki saf su yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı (kPa)

Zemin emme gerilmesi matrik emme ve ozmatik emme olarak isimlendirilen iki parametrenin toplamı olarak hesaplanır.

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_{\Pi} \quad (2.2)$$

Formülde,

Ψ_m : Matrik emme (kPa)

Ψ_{Π} : Osmatik emme (kPa)

Matrik emme, boşluk hava basıncı ile boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanır ve Eşitlik (2.3) ile hesaplanır [7].

$$\Psi_m = (u_a - u_w) \quad (2.3)$$

Formülde,

Ψ_m : Matrik emme (kPa)

u_a : Boşluk hava basıncı (kPa)

u_w : Boşluk su basıncı (kPa)

Matrik emme, zemin suyunun kapiler hareketine bağlıdır. Bu yüzden çevresel değişimlerden etkilenmektedir. Özellikle yeraltı su seviyesinin değişmesini sağlayan etkenler, matrik emme gerilmesinde farklılıklar meydana getirir.

Toplam emme gerilmesini oluşturan bir diğer parametre ise ozmatik emmedir. Ozmatik emme, boşluk suyu içersinde bulunan eriyik tuzların saf su ile olan basınç farklı olarak açıklanır ve Eşitlik 2.4 ile hesaplanır [13,14].

$$\Psi_{\Pi} = nRTC \quad (2.4)$$

Formülde,

Ψ_{Π} : Ozmatik emme (kPa)

n : Bir mol çözelti içerisindeki molekül sayısı (Avagadro Sayısı)

R : Genel gaz sabiti [8,31432 J/(mol K)]

T : Mutlak sıcaklık [273,16 + t° (K)]

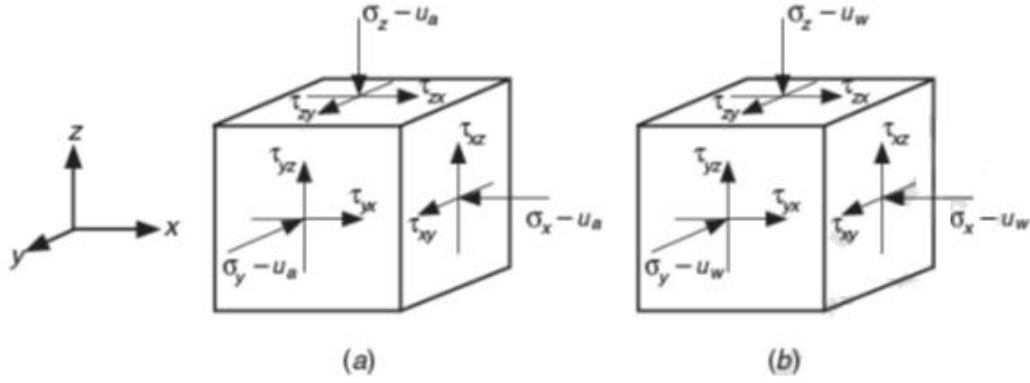
C : Çözünenlerin konsantrasyonudur.

Ozmatik emme doygun olmayan zemin mekaniği uygulamalarında zemin suyunda çözünmüş tuz miktarının az olmasından dolayı ihmal edilmektedir. Bu durum göze alınacak olursa zemin emme gerilmesindeki değişim, matrik emme birleşenindeki değişmeye eşit olacaktır. Ancak incelenen zemin, kimyasal kirlenmeye ve benzeri olaylara maruz kalmışsa zeminin ozmatik basıncında değişimler dikkate alınmalıdır. Kimyasal kirlenmeye maruz kalmış zeminlerde tuz konsantrasyonunun artması hem doygun durumda hem de doygun olmayan durumda göz önünde bulundurulmalıdır [14].

2.1.2 Doygun olmayan zeminlerde net normal gerilme, efektif gerilme ve gerilme tensörleri

Tamamen kuru zeminlerde, boşluk suyunun bulunmamasından dolayı, toplam gerilmeler; incelenen düzlemi etkileyen toplam basınca ve boşluk hava basıncına bağlıdır. Bu iki değişkene göre net normal gerilme $\sigma - u_a$ (toplam gerilme-boşluk hava basıncı) olarak hesaplanır. Şekil 2.2 (a) kübik zemin elemanı kullanılarak, net normal gerilmeler üçlü koordinat sistemi üzerinde göstermiştir. Zemin mekaniği uygulamalarında x, y ve z koordinatlarında basınç kuvvetleri pozitif ve çekme kuvvetleri ise negatif olarak gösterilmektedir.

Doygun durumda ise gerilme sistemine, boşluk suyu basıncı da eklenmiştir. Bu durumda Terzaghi'nin klasik efektif gerilme kavramı ortaya çıkar. Efektif gerilme, toplam gerilme ile boşluk suyu basıncının farkı olarak ifade edilir ($\sigma - u_w$). Şekil 2.2 (b)' de kübik eleman üzerinde doygun durumdaki gerilmeleri göstermektedir.



Şekil 2.2 : Normal ve kayma gerilmeleri a) kuru durumda b)doygun durumda [8]

Doygun olmayan zeminlerdeki gerilme dağılışı bazı problemlerde doygun durumdaki efektif gerilme yaklaşımından yola çıkılarak elde edilir [8]. Bu yaklaşımda iki farklı parametre mevcuttur. Birincisi net normal gerilme ($\sigma - u_a$), ikincisi ise matrik emmedir ($u_a - u_w$). Doymamış zeminlerin gerilme davranışları bu parametreler kullanarak açıklanır. Kartezyen koordinat sistemine göre net normal gerilme tensörü aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

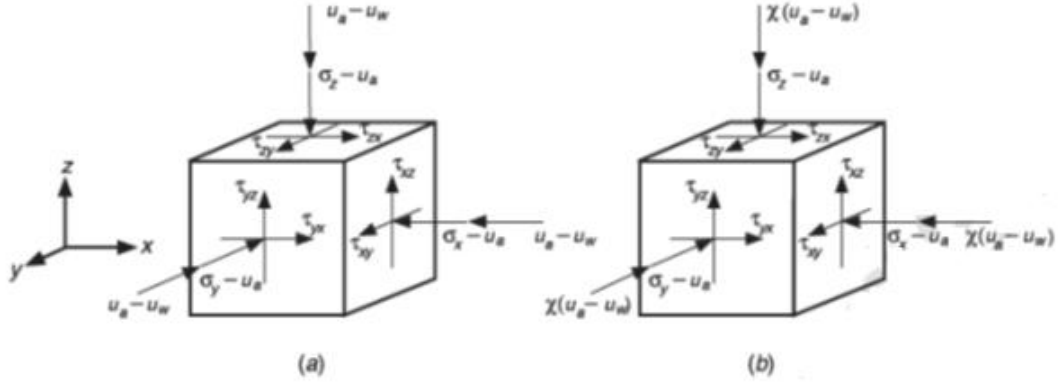
Matrik emme tensörü ise;

$$\begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Doygun olmayan zeminlerdeki tensörlerin etkilendiği kübik eleman Şekil. 2.3 (a)' da verilmiştir.

Doymamış zeminlerde efektif gerilme net normal gerilmeye ve matrik emme değerlerinden yararlanılarak Bishop tarafından Eşitlik 2.7 kullanılarak hesaplanmıştır [7].

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.7)$$



Şekil 2.3 : Doymamış zeminlerdeki gerilme tensörleri a) net normal gerilme ve matrik emme b) efektif gerilme yaklaşımına göre [8]

Doygun olmayan zeminlerde yaygın bir şekilde kullanılan bu eşitlikte χ zeminin doygunluk derecesine bağlı bir parametredir. Eğer zemin doygunsa $\chi = 1$ olarak alınır ve Eşitlik 2.7, Terzaghi'nin klasik efektif gerilme formülüne dönüşür. Eğer gerilme tensörleri efektif olarak yazılacak ise matrik emme tensörüne Bishop parametresi yazılmalıdır. Efektif durumda matrik emme tensörü;

$$\begin{bmatrix} \chi(u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & \chi(u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & \chi(u_a - u_w) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Şeklinde olur. Efektif gerilme cinsinden tensörlerin kartezyen sisteminde gösterimi Şekil 2.3 (b)' de yer almaktadır.

Zemin ortamındaki anizotopi, matrik emme değerlerinde de mevcuttur. Bu yüzden efektif gerilme tensörlerinde kullanılan Bishop parametresi her bir eksen için farklı değerler alabilmektedir [8].

2.1.3 Zemin su karakteristik eğrisi

Doygun olmayan zeminlerin mukavemet, hidrolik, sıkışabilirlik vb. davranışlarının anlaşılmasında önemli rol oynayan zemin su karakteristik eğrisi (SWCC, Soil-Water Characteristic Curve), zeminin emme basıncı altında, bünyesinde tuttuğu su miktarı olarak ifade edilir. Zemin bünyesindeki su miktarı ile emme gerilmesi arasında oluşturulmuş bir fonksiyon meydana getirir [15]. Bu fonksiyonun eksenleri; su muhtevası (hacimsel su muhtevası, gravimetrik su muhtevası veya doygunluk derecesi) ve zemin emmesidir (toplam emme veya matrik emme). Emme eksenini

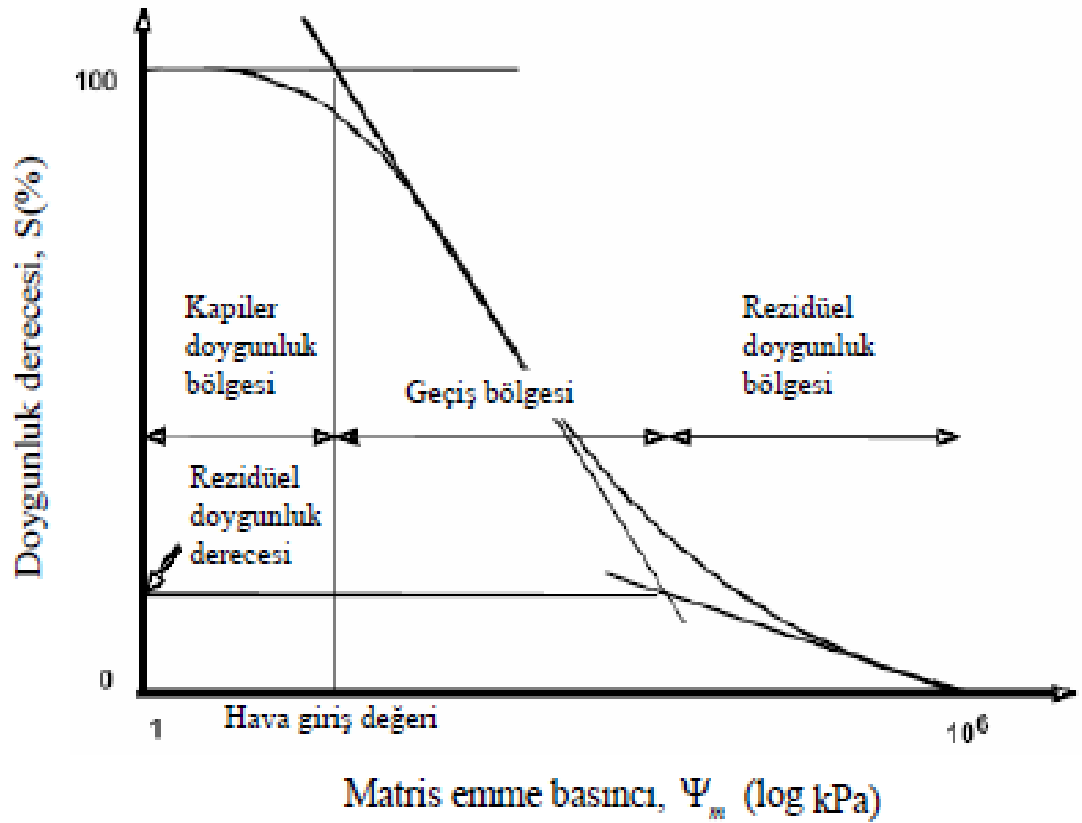
logaritmik olarak oluşturulur. Doymamış zeminlerde emme gerilmesi negatif bir değere sahiptir, fakat logaritmik eksen takımında değerler negatif olamayacağı için eksene emme gerilmesi değerleri pozitif olarak yerleştirilir.

Şekil 2.4' te doymuş bir zemin numunesinin, kuruma aşamalarını gösteren zemin su karakteristik eğrisi verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere bu eğri üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci bölge, kapiler doymunluk bölgesi olarak isimlendirilir ve matrik emme gerilmesinin uygulanması ile başlar; zeminin hava giriş değerlerine gelene kadar devam eder. İkinci bölge, geçiş bölgesidir. Bu bölge iki ayrı alt bölge olarak da gösterilebilir (Birincil geçiş bölgesi ve ikincil geçiş bölgesi olarak) [15]. Geçiş bölgesi zemin hava giriş değerinden başlar ve rezidüel (kalıcı) doymunluk derecesine kadar devam eder.. Son bölge ise rezidüel (kalıcı) doymunluk bölgesidir. Bu bölgede rezidüel doymunluk derecesinden başlar ve doymunluk derecesinin sıfır olması sonucunda tamamlanır [14].

Zemin su karakteristik eğrisini bölgelere ayrılmasını sağlayan ve eğrinin davranışında önemli rol oynayan iki parametre mevcuttur. Bunlar *hava giriş değeri* ve *rezidüel doymunluk derecesidir*. İki parametre de SWCC yardımı ile grafiksel olarak hesaplanır.

Zeminin hava giriş değeri, zemin içerisindeki en büyük boşluklardan suyun drene olması sonucunda havanın boşluklara girmesini sağlayan emme gerilmesidir. Bu değer SWCC kullanılarak elde edilir. Öncelikle $S=100$ noktasından emme gerilmesi eksenine (x eksenine) paralel bir doğru çizilir. Bu doğru ile geçiş bölgesindeki doğrusal kısım uzatılarak kesiştirilir. Elde edilen değer hava giriş değeridir (Şekil 2.4).

Rezidüel bölgeye geçişteki doymunluk derecesine *rezidüel doymunluk derecesi* denir. Eğer SWCC eksenleri doymunluk derecesi yerine su muhtevası değerini içeriyorsa, bu nokta *rezidüel (kalıcı) su muhtevası* olarak da isimlendirilir. Hava giriş değerinde olduğu gibi grafik yöntemle belirlenir. Öncelikle SWCC 1 000 000 kPa değerine kesecek x eksenini (emme basıncı) ile birleştirilir. Geçiş bölgesinde hava giriş değerini belirlemek için kullanılan lineer doğru, rezidüel doymun bölge içerisine kadar uzatılır. 1 000 000 kPa değerini kesen lineer doğru ile geçiş bölgesi lineer doğrusunun kesişim noktasının, y eksenindeki (doymunluk derecesi) değeri rezidüel doymunluk derecesini verir.



Şekil 2.4 : Doygun bir zeminin kuruma aşaması [14]

Şekil 2.4’ de, SWCC kapiler doygunluk bölgesi çok küçük bir değer aralığındadır. Geçiş bölgesi ise zemin tipine ve özelliklerine bağlı olarak doygunluk derecesinde geçiş bir yelpazeye hükmeder, fakat emme basıncı değeri özellikle kumlu numunelerde daha az değişmeler gösterir. Rezidüel doygunluk derecesi değerinin altında ise doygunluk derecesinde yavaş bir azalma gözlemlenirken, emme gerilmesi değerlerinde büyük artışlar oluşmaktadır.

SWCC elde etmek için farklı zemin türleri ve deneysel yöntemler kullanılarak çok sayıda çalışma yapılmıştır [14-17]. Deneysel çalışmaların yanında araştırmacılar parametrik modeller ve denklemler de geliştirmişlerdir [18]. GeoStudio paket programında da doymamış zeminler üzerinde yapılacak analizlerde kullanılabilen Van Genuchten (1980) ve Fredlund ve Xing (1994) denklemleri teorik çalışmalarda en sık kullanılanlarıdır [19,20].

Van Genuchten zemin su karakteristik eğrisini elde edebilmek için eşitlik 2.9’ u önermiştir.

$$\theta_w = \left[\frac{\theta_s}{1 + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n} \right]^m \quad (2.9)$$

θ_w : Hacimsel su muhtevası

θ_s : doygun hacimsel su muhtevası

Ψ : Zemin emme gerilmesi ya da toplam emme

a, n ve m : Uygun parametrelerdir. a değerinin birimi kPa^{-1} , n ; değeri zeminin boşluk büyüklüğü dağılımı ilgili, m ; değeri SWCC simetrisi ile ilgilidir. ‘ m ’ değeri genellikle $(1-1/n)$ ile $(1-1/2n)$ arasında değerler alabilmektedir [8].

Çok kullanılan denklemlerden biri olan Fredlund ve Xing denklemi Eşitlik 2.10 da verilmiştir. Bu model geliştirilirken araştırmacılar Van Genuchten modelinde kullanıldığı boşluk dağılımından yararlanmışlardır.

$$\theta_w = C(\Psi) \left[\frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (2.10)$$

θ_w : Hacimsel su muhtevası

θ_s : Doygun hacimsel su muhtevası

Ψ : Zemin emme gerilmesi ya da toplam emme

e : Euler sayısı (2,71828)

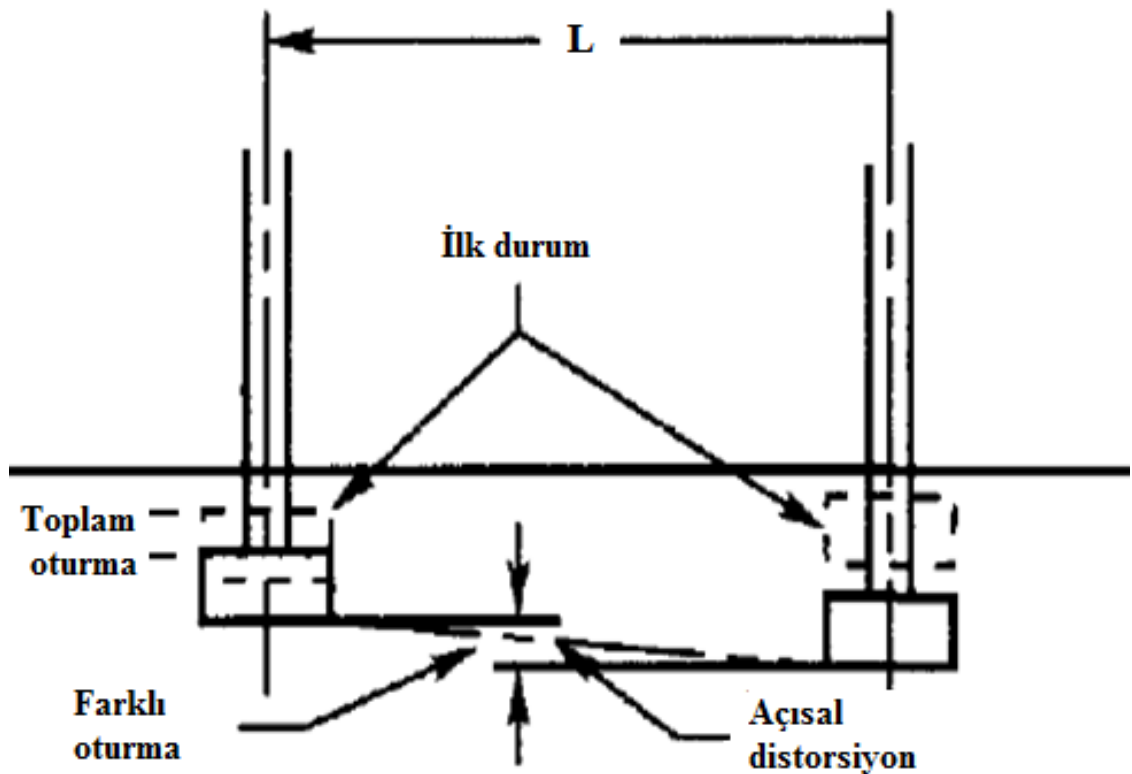
a, n ve m : Uygun parametrelerdir. a hava giriş katsayısı, eğrideki dönme noktasına bağlı, n ; geçiş bölgesindeki doğrunun eğimi, m ; rezidüel su muhtevası ile ilgilidir.

$C(\Psi)$: hacimsel su muhtevasının sıfır olduğu durumdaki düzeltme faktörü

2.2 Taşıma Gücü

Barınma, ulaşım, üretim ve benzeri amaçlarla inşa edilen yapıların hepsi, üzerinde yaşadığımız dünya ile ilişkilendirilir. Bu ilişkiyi sağlayan, unsur ise bir yapının yükünü zemine aktaran temellerdir [21].

Bir temel sistemindeki oturmalar iki şekilde ifade edilebilir, bunlar toplam oturma ve farklı oturmadır. *Toplam oturma*, temel sistemini bir noktasındaki düşey yer değiştirme; *farklı oturma* ise temel sisteminde bulunan komşu iki nokta arasındaki düşey yer değiştirme farkıdır. Şekil 2.5’ de bu tanımlar gösterilmiştir. Temel sistemindeki iki farklı nokta arasındaki oturmanın iki nokta arasındaki uzunluğa oranı ise *açısal distorsiyon* olarak tanımlanır ve ‘ β ’ ile gösterilir. Çizelge 2.1 de farklı temel türlerinde müsaade edilebilen oturma miktarları gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Temellerde oluşan oturmalar [24]

Çizelge 2. 1: Müsaade edilebilir oturma limitleri [31]

Ölçüt	Zemin Cinsi	Temel Tipi	
		Tekil, Şerit	Radye
Toplam Oturma, ΔH (mm)	Kil	75	75-125
	Kum	50	50-75
Farklı oturma, δ (mm)	Kil	45	
	Kum	32	
Açısal Distorsiyon, β (mm)	Kil-Kum	1/300	1/300

Bu araştırma kapsamında, temellerde gözlemlenen taşıma gücü parametresi sadece sınır taşıma gücü olarak değerlendirilmiştir. Farklı yükleme koşullarında oluşacak oturmaların incelenmesi yapılmamıştır. Uzuner (2006) tarafında *sınır taşıma gücü* (q_s); temelin veya temel zeminin göçme anında taşıyabileceği gerilme değeri olarak ifade edilir. Literatürde farklı araştırmacılar tarafında farklı yöntemler kullanılarak sınır taşıma gücü hesaplanmaktadır. Arazi deneyleri sonuçlarından, zeminin kayma mukavemeti değerleri kullanılarak, kayma çizgileri oluşturarak, sonlu eleman metodu kullanılarak vb. yöntemlerle sınır taşıma gücü değeri elde edilmektedir.

Gelecek bölümde taşıma gücü hesaplamalarında günümüze kadar gelen ve çok kullanılan çalışmalar ele alınmıştır. Ayrıca zeminlerde oluşacak kırılma (göçme) kavramına açıklanmış, zeminlerin kırılma mekanizmaları üzerinde durulmuştur. Bölümün sonunda ise son yirmi beş yıl içerisinde önemli gelişmelerin yaşandığı doygun olmayan zeminlerde kullanılan taşıma gücü formüllerine yer verilmiştir.

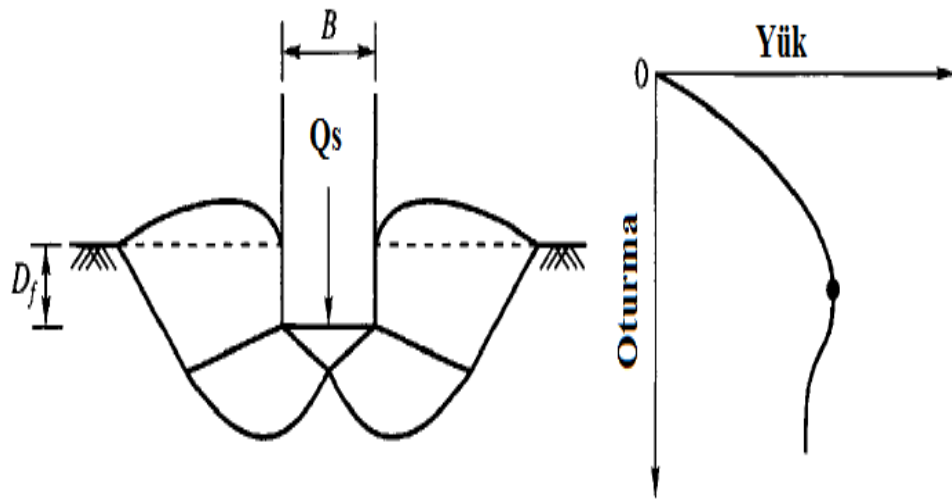
2.3 Kırılma Mekanizmaları

Zeminlerde sınır taşıma gücü göçme anında taşınan gerilme olarak tanımlanır. Eğer zemin ortamında bir plaka yüklenirse, plakadaki oturmadan yararlanılarak sınır taşıma gücü değeri elde edilebilir. Yük-oturma grafiğinin maksimum noktası bize sınır taşıma gücünü verir. Zeminde kırılmalar (göçmeler) üçe ayrılmaktadır: genel kayma kırılması, yerel kayma kırılması ve zımbalama kayma kırılması.

2.3.1 Genel kayma kırılması

Sıkı bir kum ($D_r > \%65$) veya katı bir kil ($AKO > 5$) tabakası üzerine oturan temellerin, aşırı yüklemesi halinde görülen kırılma mekanizmasıdır. Yükleme sırasında yük oturma eğrisi oldukça düşük düzeyde iken temelde ani bir göçme (kırılma) meydana gelir. Sistemde biriken enerji yoğunluğundan kırılma şiddetli gerçekleşir [23].

Şekil 2.6' da genel kayma kırılmasına maruz kalmış bir temel ve temel yüklenmesiyle oluşan yük oturma grafiği gösterilmiştir [24]. *Genel kayma kırılması*, temel çevresinde oluşan çatlaklar ve kabarmalar yüzünden kolayca fark edilir.

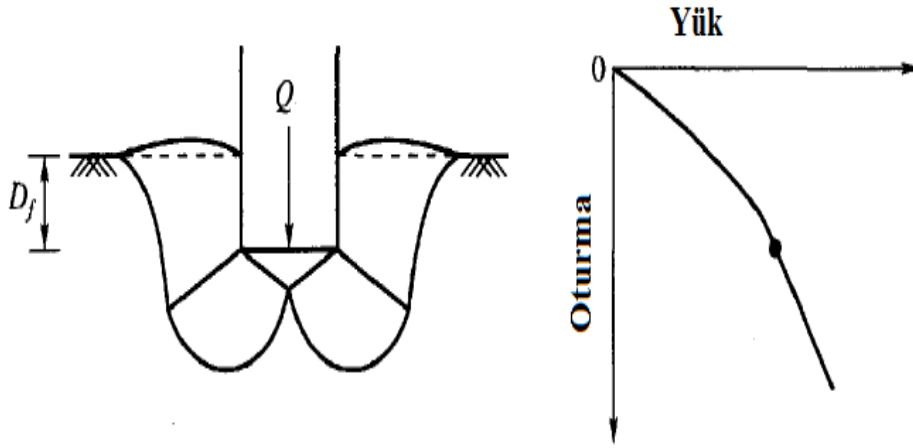


Şekil 2.6 : Genel kayma kırılmasına maruz kalmış temel ve yük oturma eğrisi [24]

2.3.2 Yerel kayma kırılması

Eğer inşa yapılacak zemin profili orta sıkı – gevşek kum veya orta sert kil ise yük oturma eğrisi Şekil 2.7' de gösterildiği gibi oluşur. İlk başta yükleme devam ederken yük belli bir değere kadar yükselir ve bu değer ilk göçme yükü olarak isimlendirilir. İlk göçme yükünden sonra yükleme devam ederse, sınır taşıma gücü değerinde kayma yüzeyi ilerleyerek zemin yüzünde görülür [25].

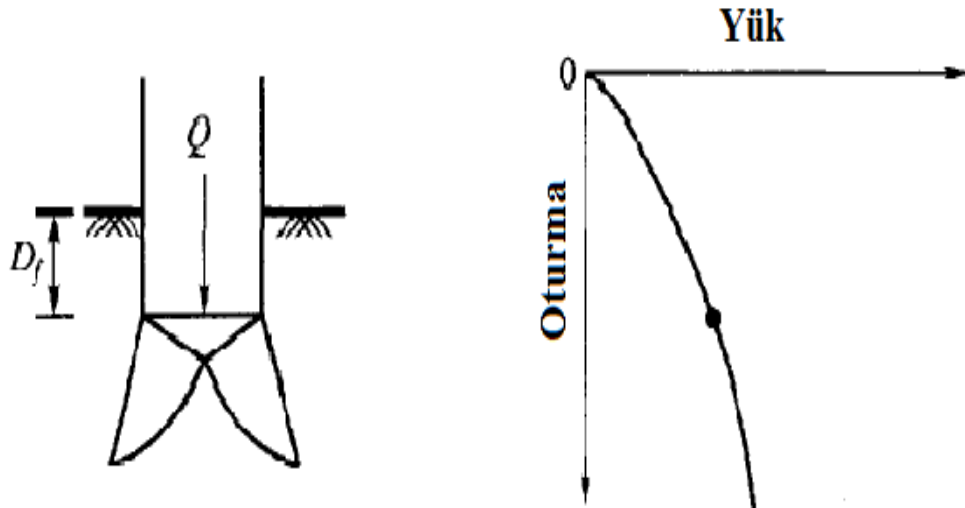
Sınır taşıma gücünden sonra yük oturma eğrisi lineer bir hal alır. Bu tür gerçekleşen göçmelere *yerel kayma kırılması* denir.



Şekil 2.7 : Yerel kayma kırılmasına maruz kalmış temel ve yük oturma eğrisi[24]

2.3.3 Zımbalama kayma kırılması

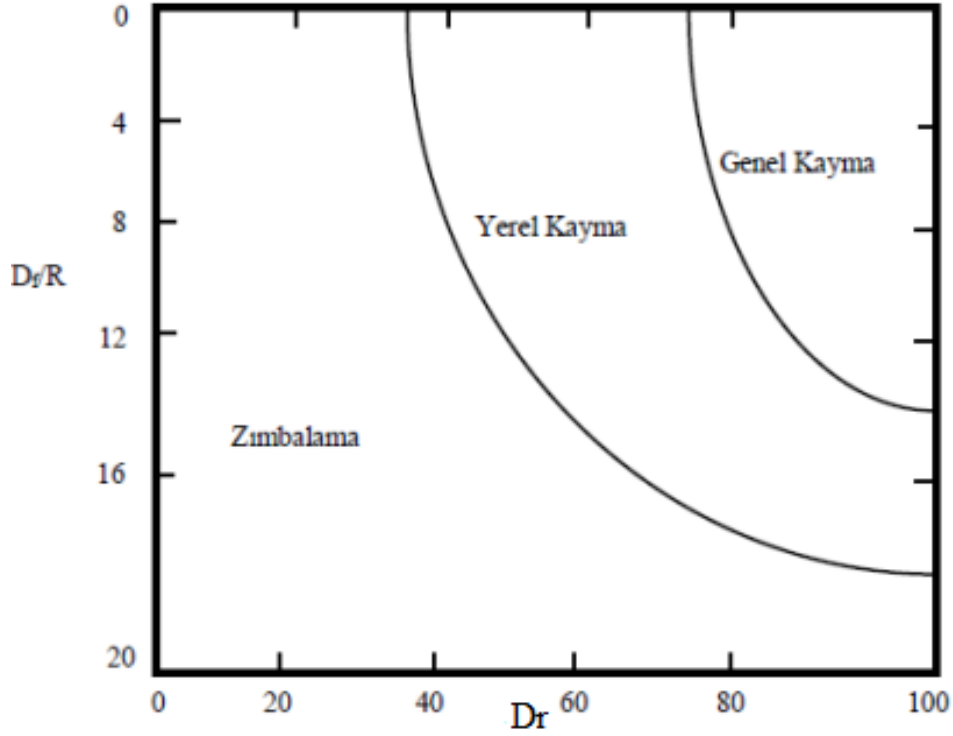
Aynı uygulama gevşek-çok gevşek kumlarda veya bataklık siltleri, yumuşak killer üzerinde yapılırsa, yük oturma grafiği Şekil 2.8' de ki gibi olur. Sınır taşıma gücü oturma ile yükleme değişiminin maksimum olduğu noktada oluşur ve bu noktadan sonra yük oturma eğrisi lineer devam eder. Bu tür kırılma mekanizmalarına ise *zımbalama kayma kırılması* ismi verilir. Temel zımba gibi zemin içerisine girdiğinden, sınır taşıma gücünü aşırı oturmalarından ayırt etmek güçleşir [23]. Zemin yüzeyinde bir değişiklik meydana gelmez.



Şekil 2.8 : Şekil 2.8 Zımbalama kayma kırılmasına maruz kalmış temel ve yük oturma eğrisi[24]

Vesic kum zemine oturan dairesel temellerin kırılma mekanizmalarını incelemiş ve

bu çalışmalarından yararlanarak Şekil 2.9 da gösterilen grafiği oluşturmuştur. Grafikteki parametreler kullanılarak zeminlerin hangi tür kayma kırılmasına maruz kalacağını tahmin edilebilir. Grafikte, D_f temelin gömme derinliğini, D_r kullanılan kumun izafi sıkılık derecesini ve R değeri de temel alanın temel çevresine oranını göstermektedir.



Şekil 2.9 : Kumda oturan dairesel temeller için kırılma türlerinin belirlenmesi [26]

2.4 Doygun Zeminlerin Taşıma Gücü

Zemin mekaniğinde en önemli uygulama konularından biri olan taşıma gücü, 1900' lü yıllardan bu güne kadar farklı araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Konunun öncü çalışmalarında birisi olan Prandtl'ın çalışması bir bakıma diğer çalışmaların tabanını oluşturmaktadır [27].

Birçok araştırmacı, gerek teorik gerek deneysel çalışmalar yaparak taşıma gücünü hesaplamışlardır. Yapılan bu çalışmaların ortak özelliği, hesaplanan taşıma gücü formüllerinin doymuş veya tamamen kuru zemin profilleri için geçerli olmasıdır. Çizelge 2.2 de Prandtl 'dan günümüze kadar iz bırakmış taşıma gücü çalışmaları gösterilmektedir [28].

Çizelge 2. 2: Günümüze kadar iz bırakmış taşıma gücü çalışmaları

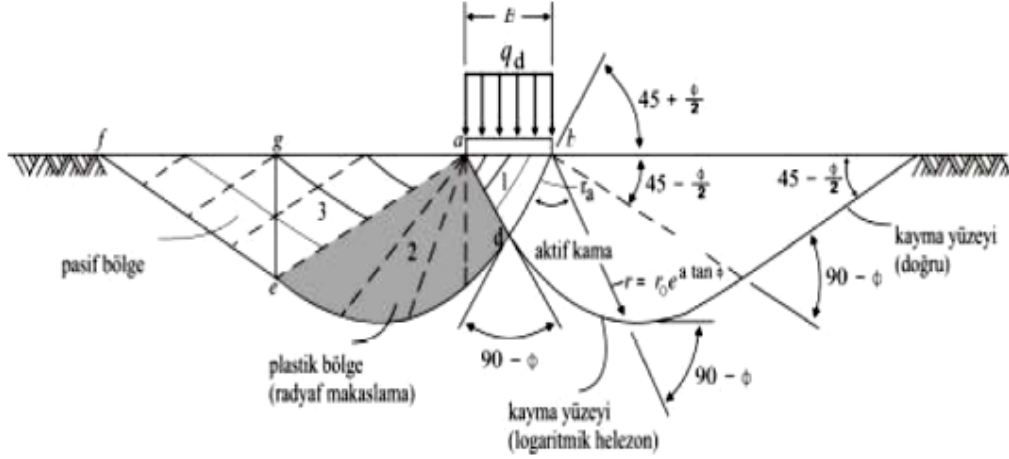
<i>Araştırmacı</i>	<i>Çalışmanın İsmi</i>
Prandtl (1921)	Şerit Temelin Kırılma Mekanizması
Terzaghi (1943)	Yüzeysel Temellerin Taşıma Gücü
Meyerhof (1951)	Temellerin Sınır Taşıma Gücü
Hansen (1969)	Sığ Derinlikteki Yüzeysel Temellerin Teorik Taşıma Gücü
Vesic (1973)	Yüzeysel Temellerin Sınır Taşıma Gücü Analizi
Bolton ve Lau(1993)	Mohr-Coulomb teorisine göre dairesel ve şerit temellerin dikey taşıma gücü
Bowles (1996)	Temel Analizi ve Tasarımı

Yukarıdaki tabloda konuları ve araştırmacıları verilen çalışmalardan bazıları aşağıda açıklanmıştır.

2.4.1 Prandtl (1921)

Taşıma gücü hesaplarının temellerini oluşturan çalışma 1921 yılında Prandtl tarafından yapılmıştır. Prandtl bu çalışmasında zemin yüzeyine oturmuş şerit temeli yükleyerek temelin göçme mekanizmasını değerlendirmiştir. Çalışmasında göçmenin olduğu durumda temelin hemen altında aktif bir kamanın, temelin oturduğu yüzeyin yukarı hareketini sağlayan pasif bir kamanın varlığını ortaya çıkarmıştır. Çalışmada zemin homojen ve ağırlıksız olarak kabul edilmiştir [27].

Şekil 2.10’da Prandtl’a ait taşıma gücü modeli verilmiştir. Yükleme yapılırken, elastik denge durumunda kalan 1 No’ lu kamanın 2 No’ lu bölgeyi iterek kesmesi ile $r_0 e^{\alpha \tan \phi}$ değişken yarıçaplı, logaritmik spiral biçimli kayma yüzeyleri oluşur [23]. 3 No’ lu bölgede ise pasif zemin kaması meydana gelmektedir.



Şekil 2.10 : Prandtl'in taşıma gücü modeli [23]

2.4.2 Terzaghi (1943)

Terzaghi, Prandtl'in yaptığı çalışmayı genişleterek günümüzde en çok kullanılan taşıma gücü teorisini oluşturmuştur. Teorisinde, Prandtl'in daha önceden ortaya çıkardığı temel altında ve yanlarında oluşan kayma yüzeylerini kabul etmiş, fakat bu kabullere ek olarak aşağıda sunulan değişiklikleri yapmıştır [29]. Şekil 11 ' de Terzaghi'nin taşıma gücü hesaplamalarında kullandığı model gösterilmiştir.

- 1) Gömme derinliği temel genişliğinden büyük değildir.
- 2) 1 No' lu kamanın yatayla yaptığı açı $45 + \phi/2$ yerine ϕ olarak kabul edilmiştir.
- 3) Temel tabanı sürtünmelidir (pürüzlü taban).
- 4) D_f temel derinliği boyunca zeminin kayma direnci ihmal edilir.
- 5) Temel tabanı üzerindeki zeminin ağırlığı göz önüne alınır (sürsaj).

Yukarıda sıralanmış kabulleri kullanarak, limit denge durumuna göre Terzaghi tarafından sınır taşıma gücü Eşitlik 2.8' deki formülle hesaplanır. Bu eşitlikten de anlaşılacağı gibi bir temelin taşıma gücü: temelin boyutuna, temel zemininin birim hacim ağırlığına ve kayma mukavemeti parametrelerine bağlıdır.

$$q_s = K_1 c(N_c) + q(N_q) + K_2 B\gamma(N_\gamma) \quad (2.8)$$

Formüldeki sembollerin anlamları aşağıda verilmiştir:

c : Kohezyon, kPa

ϕ : Kayma mukavemeti açısı

q : Temel tabanı üzerinde zemin ağırlığında ötürü oluşan sürsaj yükü,
kPa

γ : Temel tabanı altındaki zeminin birim hacim ağırlığı, kN/m³

B : Temel genişliği, m

K₁ ve K₂ : Temel tabanı şekline göre katsayılar (Çizelge 2.3)

N_c, N _{γ} , N_q : Temel tabanı altındaki zeminin kayma mukavemeti açısına bağlı taşıma gücü katsayıları (**Ek A**)

K_{p γ} : pasif toprak basıncı katsayısı

N_c, N _{γ} ve N_q değerli Terzaghi tarafından aşağıda gösterilmiş formüllerle hesaplanır.

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (2.9)$$

$$N_q = \frac{a_\theta^2}{2 \cos^2(45 + \phi/2)} \rightarrow \quad (2.10)$$

$$a_\theta = e^{n \tan \phi}, (n = 0.75\pi - \frac{\phi}{2}) \quad (2.11)$$

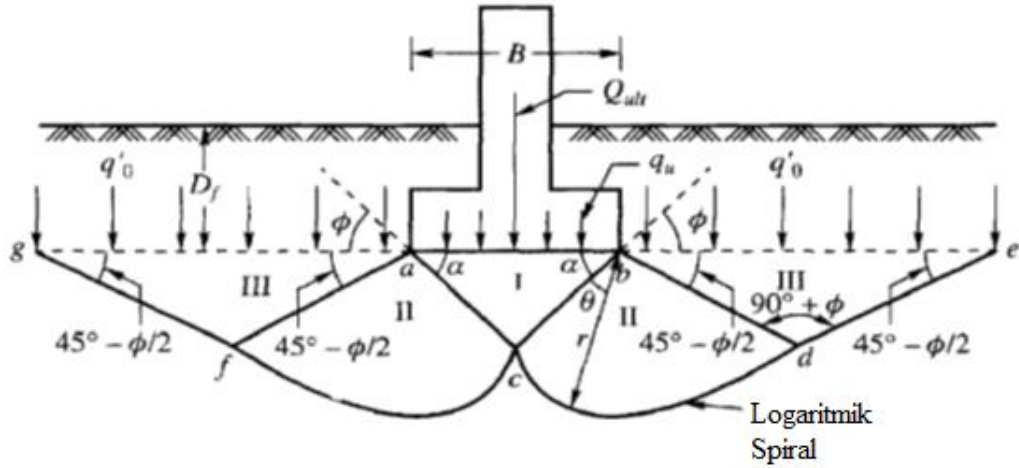
$$N_\gamma = \frac{1}{2} \tan \phi \frac{K_{p\gamma}}{\cos^2(\phi/2)} \quad (2.12)$$

Çizelge 2.3' de taban şekline bağlı katsayılar gösterilmiştir.

Çizelge 2. 3 : Terzaghi (1943) şekil katsayıları

Temel Tabanı Şekli	Şerit L = ∞	Dikdörtgen B < L	Kare B = L	Daire B = L = D
K ₁	1	1 + 0,2(B/L)	1,2	1,2
K ₂	0,5	0,5 – 0,1(B/L)	0,4	0,3

Terzaghi yerel kayma kırılması oluşan yumuşak veya gevşek zeminler için modifiye edilmiş kohezyon ve taşıma gücü katsayılarının kullanılmasını tavsiye eder. Modifiye edilmiş kohezyon değeri normal kohezyon değerinin 2/3'üne (2/3 c) eşittir. Modifiye taşıma gücü faktörleri ise 3/2 oranında azaltılmış içsel sürtünme açısına göre hesaplanır ($\phi_{\text{mod}} = \tan^{-1}(2/3 \tan(\phi))$).



Şekil 2.11 : Terzaghi taşıma gücü teorisi [23]

2.4.3 Meyerhof (1951)

Meyerhof (1951) sınır taşıma gücü için Terzaghi eşitliğine benzer bir bağıntı (Eşitlik 2.13) önermiştir, fakat bu bağıntıda kendisinin önerdiği taşıma gücü katsayılarını kullanmıştır [30,31].

$$q_s = cN_c + qN_q + 0.5B\gamma N_\gamma \quad (2.13)$$

Eşitlikte,

N_c, N_γ, N_q : Meyerhof tarafından hesaplanan tabanı altındaki zeminin kayma mukavemeti açısına bağlı taşıma gücü katsayıları (**Ek B**)

2.4.4 Vesic (1975)

Vesic (1973) kendisinden önce yapılan çalışmaları deneysel olarak kontrol edip taşıma gücü katsayılarını, şekil katsayılarını kendi yaklaşımı ile tekrar hesaplamıştır. Vesic tarafından önerilen taşıma gücü formülü Eşitlik 2.14' de gösterilmektedir.

$$q_s = cN_c s_c d_c i_c + qN_q s_q d_q i_q + 0.5B\gamma N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (2.14)$$

Eşitlikte,

N_c, N_γ, N_q : Vesic tarafından hesaplanan tabanı altındaki zeminin kayma mukavemeti açısına bağlı taşıma gücü katsayıları (**Ek A**)

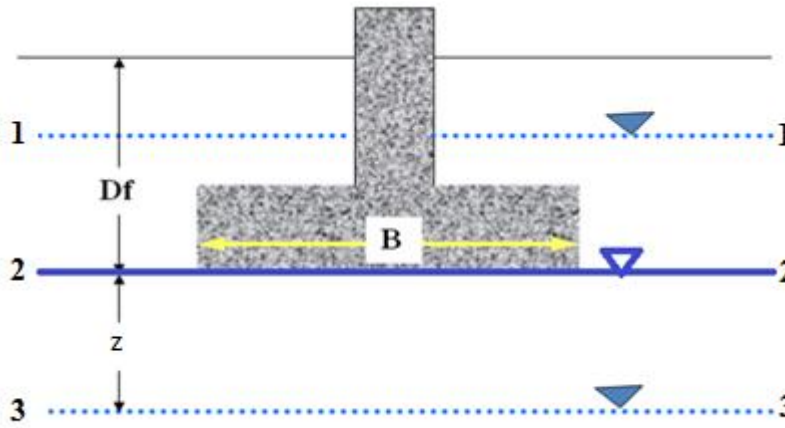
s_c, s_q, s_γ : Şekil faktörleri

d_c, d_q, d_γ : Derinlik faktörleri

i_c, i_q, i_γ : Yük uygulama faktörleri

Vesic çalışmasında yeraltı suyunun değişik konumlarında taşıma gücü değişimini de incelemiştir. En yüksek yeraltı su seviyesini belirlemek hesaplamaların ilk aşamasını oluşturmaktadır. Zeminde yeraltı suyu varsa, taşıma gücü formülündeki 3. Terimde içinde bulunan temel altındaki zeminin birim hacim ağırlığının değişimi göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 2.12 de yeraltı su seviyesi değişimlerine göre, eğer yeraltı su seviyesi temel tabanı düzeyinde veya daha yukarıda ise (1-1 konumu); 3.terimdeki birim hacim ağırlığı su altındaki birim hacim ağırlığı (γ') alınır. Şayet, YAS temel tabanından itibaren en az temel genişliği kadar aşağıda ise 3. terimdeki γ değeri, γ_n olarak alınır. YAS (3-3 ile 2-2) arasında ise γ' ile γ_n arasında lineer interpolasyon yapılarak bulunur Eşitlik 2.15 'de gösterilmiştir.

$$\gamma = \gamma' + \left[\frac{z}{B} \right] (\gamma_{sat} - \gamma') \quad (2.15)$$



Şekil 2.12 : Taşıma gücü formülünde çeşitli YASD durumları

2.5 Doymun Olmayan Zeminlerin Taşıma gücü

Yerinde ölçülen taşıma gücü değerleri, genelde klasik zemin mekaniği formülleri ile hesaplanan veya tahmin edilen taşıma gücü değerlerden daha yüksek sonuçlar vermektedir. Arazideki taşıma gücündeki artışın nedeni, doymamış zeminlerde gözlemlenen emme gerilmesinin ihmal edilmesi olduğu düşünülmektedir [7].

Doymamış zeminlerdeki taşıma gücü ile ilgili ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda başlamıştır. Özellikle son yıllarda çeşitli araştırmacılar bu konuya ilgi duymuş ve farklı çalışmalar ortaya çıkmıştır, fakat yapılan bu yenilikçi çalışmalara rağmen,

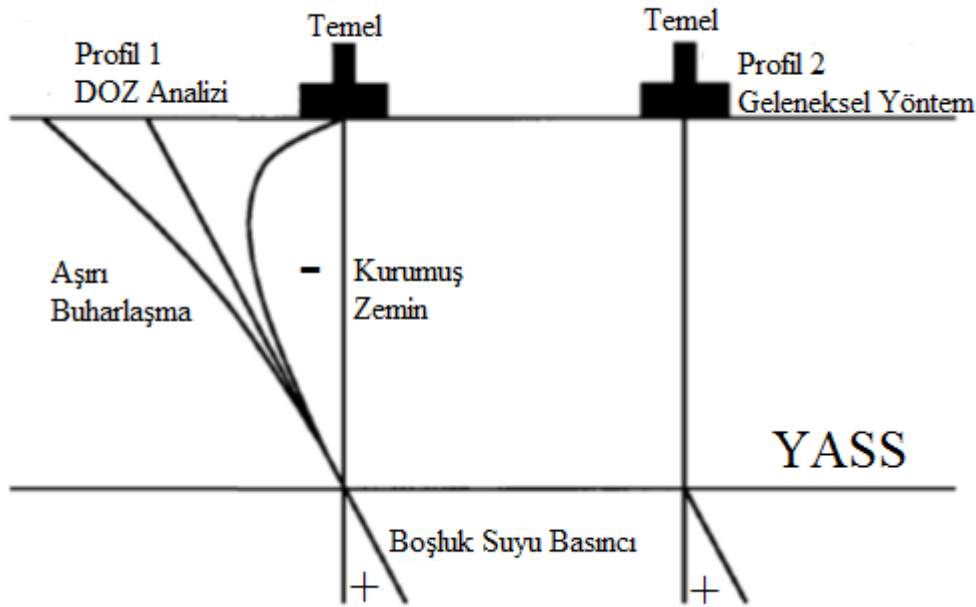
taşıma gücü analizlerinde geleneksel formüllerin kullanılmasına devam edilmektedir. Çizelge 2.4’ de doymun olmayan zeminlerde yapılan taşıma gücü çalışmaları gösterilmiştir [28,30].

Çizelge 2. 4 : Doymun olmayan zeminlerde yapılmış taşıma gücü çalışmaları

<i>Araştırmacı</i>	<i>Çalışmanın İsmi</i>
Broms (1964)	Doymunluk Derecesinin Esnek Kaplamaların Taşıma Gücüne Etkisi
Siva Reddy ve Mogaliah (1970)	Kısmi Doymun Zeminlerde Taşıma Gücü
Ismael (1985)	Kuweyt Zemini Üzerinde Yükleme Deneyi ile Emin Taşıma Gücü Hesabı
Steensen–Bach ve ark. (1987)	Kapiler Ek Gerilmeler –Gerçek mi değil mi?
Frendlund ve Rahardjo (1993)	Doymun Olmayan Zeminlerin Taşıma Gücü
Oloo (1994)	Hafif Yüklendiş Yollarda Taşıma Gücü Hesaplanmasına Yönelik Bir Yaklaşım
Schnaid ve ark. (1995)	Doymamış Yüzeysel Temellerin Yük–Oturma Eğrileri
Oloo (1997)	Kaplanmamış Yolların Taşıma Gücü
Miller ve Muraleetharan (1998)	Doymun Olmayan Zeminlerde Arazi Deneyleri
Georgiadis (2003)	Kısmi Doymun Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi
Costa (2003)	Plaka Yükleme Deneyi üzerine Matrik Emme Basıncının Etkisi
Youngfu Xu (2004)	Doymamış Şişen Zeminlerde Taşıma Gücü
Mohamed ve Vanapalli (2006)	Doymamış Zeminlerin Taşıma Gücü Hesabına Yarı–Ampirik Yaklaşım
Oh ve Vanapalli (2009)	Temel Yapıları için Doymun Olmayan Zemin Mekanığı
Rui Sun ve Vanapalli (2010)	Model Deneylerle Doymun Olmayan Zeminlerin Taşıma Gücü ve Oturma Davranışlarının İncelenmesi
Uchaipichat ve Man-konsung (2011)	Doymamış Kaba Daneli Zeminlerindeki Taşıma Gücü Karakteri

Taşıma gücü hesaplamalarında çoğu zaman 2.2.4’ te anlatılmış geleneksel taşıma gücü formülleri kullanılmaktadır. Özellikle kurak veya yarı kurak hava rejimlerine sahip bölgelerde klasik taşıma gücü formüllerinin kullanılması inşaat mühendisliği açısından ekonomik tasarım yapma koşulunu sağlamaz.

Şekil 2.13’ de inşa edilmiş bir tekil temelin geleneksel yaklaşımla ve doymamış yaklaşımla boşluk suyu basıncı değişimleri gösterilmiştir. Profil 1 de doymun olmayan zemin mekaniği yaklaşımıyla; yeraltı su seviyesi üzerinde negatif boşluk suyu basıncı etkisinde oluşan emme gerilmesi gösterilmiştir. Profil 2 de ise geleneksel yöntemdeki boşluk suyu basıncı kavramı gösterilmiştir. Geleneksel taşıma gücü yönteminde yeraltı su seviyesi üzerindeki emme gerilmesi ihmal edilmektedir. Geleneksel taşıma gücü formülleri kullanılarak elde edilen değerler, arazide elde edilen değerlere göre daha fazladır. Özellikle doymamış koşulların etkisi altında kalan coğrafyalarda, geleneksel yöntemin kullanılması önerilmez [7].



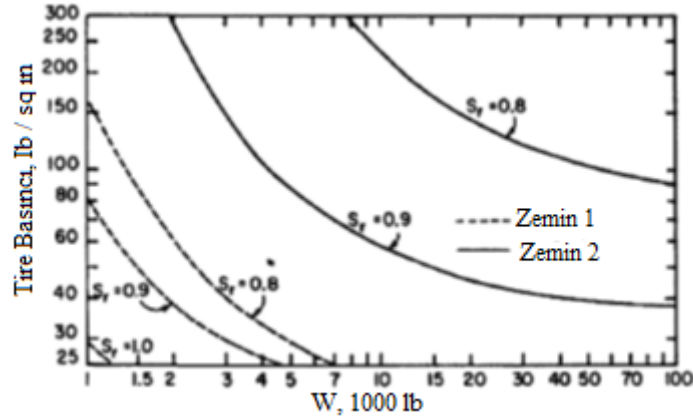
Şekil 2.13 : Tipik bir temel altında oluşan boşluk suyu basıncı değişimi [7]

Çizelge 2.4’ de konuları ve araştırmacılarının isimleri verilmiş olan çalışmalardan bazıları bu kısımda açıklanacaktır.

2.5.1 Broms (1964)

Broms (1964) doymunluk derecesinin esnek kaplamalar üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmasında göçmenin doymun kısımda oluşacağı varsayımı ile yola çıkmış ve taşıma gücünü doymunluk derecesinin (S), kohezyonun (c) ve içsel sürtünme (ϕ) açısının bir fonksiyonu olarak elde etmiştir [32]. Araştırmacı çalışmasında doymunluk derecesinin %100’ den % 90’ a düşmesi sonucunda, taşıma gücünün siltli zeminde yaklaşık % 2, killi zeminlerde ise % 8 arttığını elde etmiştir.

Bu çalışmada, araştırmacı emme basıncının etkisini düşünmese de doygunluk derecesi ile taşıma gücü arasındaki değişimi incelemiştir [32]. Ve doygunluk derecesindeki azalmanın taşıma gücünü değerini artırdığını bulmuştur. Broms, çalışmaları sonucunda tekerlek basıncı ve nihai tekerlek yükü arasındaki ilişkiyi içeren bir grafik olarak sunmuştur. Çalışmadan elde edilen bu grafik Şekil 2.14’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.14 : Tekerlek basıncı & Esnek kaldırımdaki sınır tekerlek yükü [32]

2.5.2 Steensen-Bach (1987)

Araştırmacılar doygun olmayan zeminlerin taşıma gücündeki değişimi gözlemlemek için model deney düzenekleri oluşturmuşlardır [33]. Bu deneyleri hem doygun hem de doygun olmayan koşullarda yapılmıştır. Deney düzeneği 200mm çapında ve 120 mm yüksekliğindeki çelik test kuyusu ve model temelden oluşmaktadır. Doymamış koşullardaki matrik emme değeri tansiyometre kullanılarak ölçülüp, SWCC elde edilmiştir. Deneyler iki farklı kum numunesi kullanılmış ve deney sonuçlarına göre; doymamış koşullardaki taşıma gücü değerleri; doygun duruma göre dört ile altı kat arasında bir artış gösterdiği belirlenmiştir.

2.5.3 Fredlund ve Rahardjo (1993)

Fredlund ve Rahardjo (1993) geleneksel taşıma gücü formülünü geliştirerek doymamış koşullardaki zeminler için bir taşıma gücü formülünü oluşturmuşlardır. Çalışmada, geleneksel formülde kullanılan kohezyon terimine matrik emme basıncının etkisi incelemiştir. Doygun olmayan zeminlerin taşıma gücü

hesaplamasında kullanılacak kohezyon teriminin eşitlik 2.16' da verilen denklemle hesaplanacağını belirtilmiştir.

$$c_{unsat} = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.16)$$

Formülde,

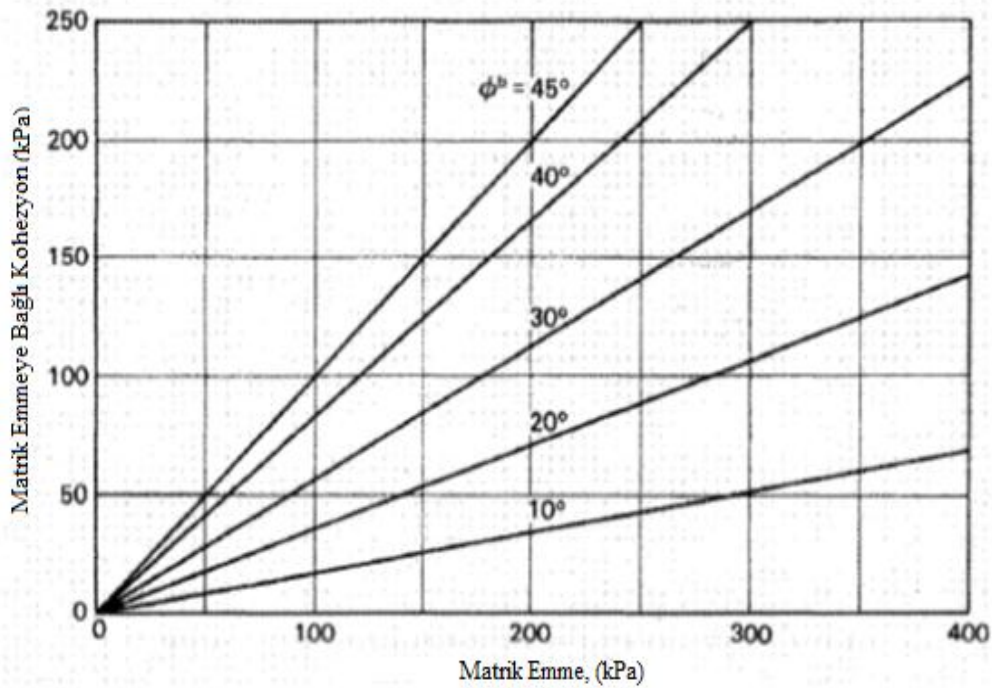
c_{unsat} : toplam kohezyon, kPa

c' : efektif kohezyon, kPa

$(u_a - u_w)$: Matrik emme (Ψ_m), kPa

ϕ^b : Emmeye bağlı içsel sürtünme açısı

Eşitlikten de anlaşılaçağı üzere doymamış zeminlerdeki toplam kohezyon iki parametreye bağılıdır. Bunlardan ilki geleneksel taşıma gücü denkleminde de kullanılan zeminin efektif kohezyonu, diğeri ise matrik emme değeridir. Matrik emme basıncına göre toplam kohezyondaki değışim Şekil 2.15' de gösterilmiştir [7,31].



Şekil 2.15 : Farklı açılara göre emme değerinin toplam kohezyondaki etkisi [7]

Araştırmacılar çalışmalarını teorik problemler üzerinde kullanarak hem taşıma gücündeki hem de toplam kohezyonda meydana değışmeleri incelemiştir. Ayrıca

farklı sığ temel tiplerini kullanarak çözümler yapılmıştır. Kil zemine oturan kare temel üzerinde yapılan hesaplamalarda matrik emme değerinin serbest basınç değerine eşit olduğu koşulda, zeminin taşıma gücünün ilk duruma göre %27 oranında arttığı bulunmuştur [7].

2.5.4 Oloo ve arkadaşları (1997)

Oloo ve arkadaşları 1997 yılında yayınladıkları stabilize olmamış yollar üzerindeki çalışmalarında alt temel tabakasındaki emme gerilmesinin, taşıma gücüne etkisini incelenmiştir. Çalışma sonuncunda eşitlik 2.17 elde edilmiştir [34]

$$q_s = [c' + (u_a - u_w)_b (\tan \phi' - \tan \phi^b) + (u_a - u_w)_s \tan \phi^b] N_{co} + 0.5 \left(\gamma - \lambda_m \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \right) N_{\gamma o} \quad (2.17)$$

Araştırmacılar sonraki çalışmalarında kullanılması çok da kolay olmayan bu eşitlikte basitleştirme yapmışlardır. Basitleştirme matrik emme değerinin tüm tabaka boyunca eşit alınarak ve zemindeki hava giriş değeri sıfıra yakın kabul ederek yapılmıştır. Eşitliğin son hali 2.18' de verilmiştir.

$$q_s = [c' + (u_a - u_w)_b \tan \phi^b] N_{co} + 0.5 B \gamma N_{\gamma o} \quad (2.18)$$

Formülde,

λ_m : derinlikle matrik emme basıncı azalma oranı

$N_{co}, N_{\gamma o}$: Oloo'nun taşıma gücü faktörleri

$(u_a - u_w)_b$: hava giriş değeri, kPa

$(u_a - u_w)_s$: yüzeydeki matrik emme değeri, kPa

2.5.5 Mohamed ve Vanapalli (2006)

Mohamed ve Vanapalli model deney sistemi oluşturup granüler zeminlerde matrik emmenin taşıma gücüne etkisini incelemişlerdir. Şekil 2.16' da araştırmalarında kullanılan deney düzeneği verilmektedir. Çalışmada iki farklı model temel sistemi (100 mm x 100 mm ve 150 mm x 150 mm) kullanılmıştır. Tank içerisindeki emme gerilmesini tansiyometre, taşıma gücünü ise yükleme hücresi ve veri toplama ünitesi kullanılarak ölçülmüştür.

Araştırmada farklı matrik emme değerlerinde yük deplasman eğrileri oluşturulmuştur. Deney sistemi doymuş koşullarda da denenerek model temelin yüklenmesine bağlı deformasyonlara ulaşılmıştır. Doymuş ve doymamış koşullardaki grafiklerden zemin koşullarının mukayesesi yapılmıştır. Deneylerde ortalama emme gerilme değerleri kullanılmış (2, 4 ve 6 kPa olmak üzere) ve iki farklı temel tipine göre sonuçlar verilmiştir.

Araştırmacılar çalışmalarının neticesinde, gerek gözlemlenen gerek tahmin edilen taşıma gücü değerleri yardımı ile doymuş durumdaki zemine ait kayma mukavemet parametrelerini (c' ve ϕ') kullanarak eşitlik 2.19 oluşturulmuştur [28]. Eşitlikte kullanılan bazı değerler temel zeminine ait SWCC kullanılarak elde edilir.

$$q_s = [c' + (u_a - u_w)_b(1 - S^\psi) \tan \phi' + (u_a - u_w)_{AVG} S^\psi \tan \phi'] N_c \xi_c + 0.5 B \gamma N_\gamma \xi_\gamma \quad (2.19)$$

Eşitlikte,

q_s : sınır taşıma gücü

ψ : ortalama matrik emme değerine bağlı uygun parametre

N_c, N_q : Terzaghi'nin taşıma gücü faktörleri

N_γ : Kumbhokjar'nin taşıma gücü faktörü

ξ_c, ξ_γ : Vesic tarafından önerilen şekil faktörleri sırasıyla Eşitlik 2.20, 2.21 ve 2.22 ile hesaplanır [26].

$$\xi_c = \left[1 + \left(\frac{N_q}{N_c} \right) \left(\frac{B}{L} \right) \right] \quad (2.20)$$

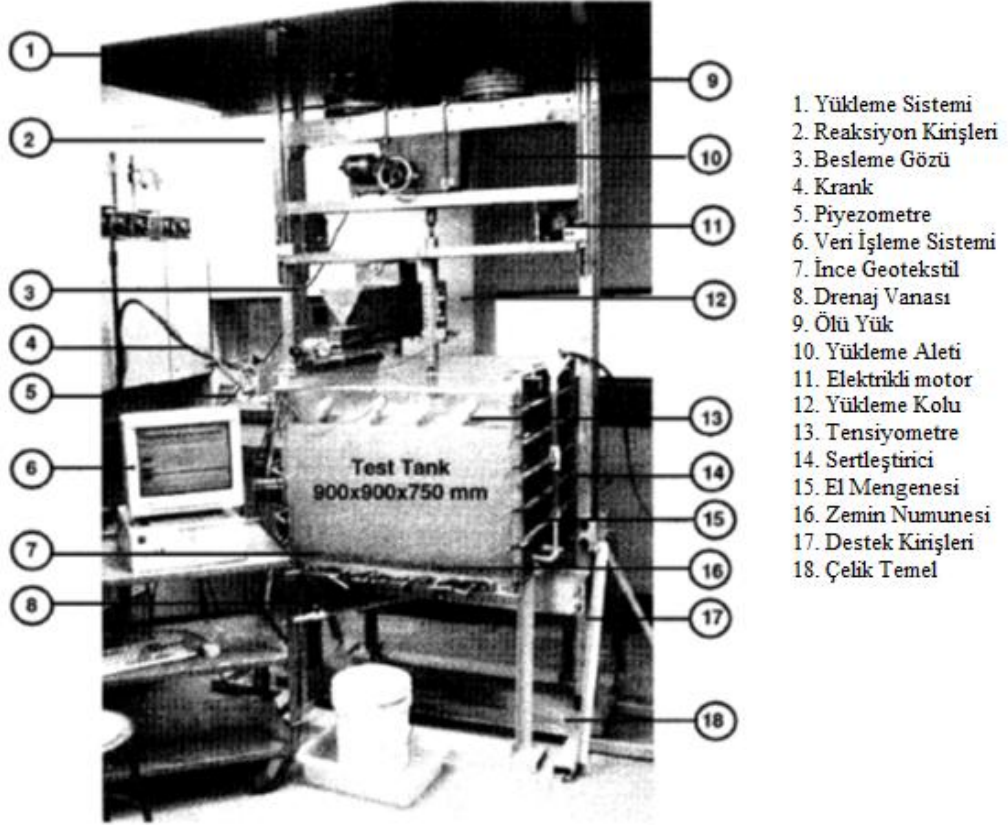
$$\xi_q = \left[1 + \left(\frac{N_q}{N_c} \right) \left(\frac{B}{L} \right) \right] \quad (2.21)$$

$$\xi_\gamma = \left[1.0 - 0.4 \left(\frac{B}{L} \right) \right] \quad (2.22)$$

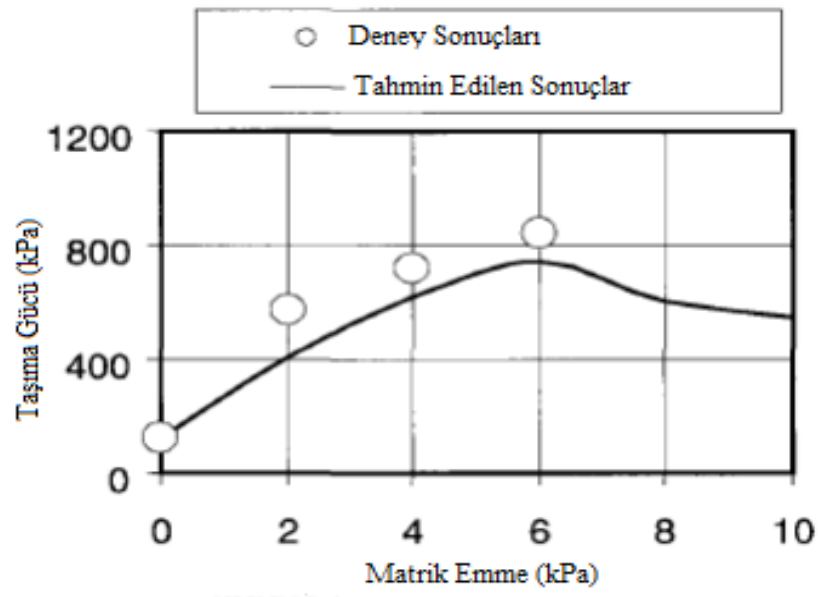
Eşitlik 2.16 'de kullanılan ortalama matrik emme gerilmesine bağlı uygun parametre (ψ) ile plastisite indeksi (I_p) arasındaki ilişki Eşitlik 2.23' de verilmiştir [28].

$$\psi = -0.0031(I_p)^2 + 0,3988(I_p) + 1 \quad (2.23)$$

Araştırmacılar çalışmalarının sonuçlarını; laboratuarda oluşturdukları model deney sisteminden elde edilen taşıma gücü değerleri ile önerdikleri formülasyon arasında ilişki kurarak sunmuşlardır. Şekil 2.17 ‘deki grafik de bu ilişki gösterilmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere önerilen eşitlik ile deney sonuçları uygunluk gösterir.



Şekil 2.16 : Mohamed ve Vanapalli' nin doygun olmayan zeminlerin taşıma gücünü hesaplamalarında kullandıkları model deney düzeneği [28]



Şekil 2.17 : Tahmin edilen ve hesaplanan taşıma gücü değerler

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar genel olarak iki aşamada yapılmıştır. Aşamalardan birincisi tezde kullanılan zemin türlerinin indeks ve fiziksel özelliklerini belirlenmesi, ikinci ise zeminlerin doymun olmayan özelliklerinin belirlenmesidir. Bu araştırmada altı farklı zemin kullanılmıştır. Zemin türlerinin iki tanesi doğal, iki tanesi doğal zeminlerin karışımı ile elde edilmiş yapay ve diğer iki tanesi ise daha önce farklı araştırmacılar tarafından çalışılmış zeminlerdir. Her bir zemin türü üzerinde bu türe ait indeks özellikleri, kayma mukavemeti parametreleri ve doymun olmayan zemin mekaniği parametreleri (SWCC, Zemin Su Karakteristik Eğrisi) belirlenmiştir. Farklı araştırmacılarından elde edilen zeminler için ise, yine bu özelliklerin belirlenmiş olması göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan numuneler Çizelge 3.1’ de sıralanmıştır:

Çizelge 3. 1 : Kullanılan numuneler

<i>Numune No</i>	<i>Numune Adı</i>	<i>Zemin Türü</i>	<i>Açıklama</i>
I	Şile kili	CL	Doğal numune
II	Silivri kumu	SP	Doğal numune
III	Karışım I	%50 CL + % 50 SP	Karışım
IV	Karışım II	%25 CL + % 75 SP	Karışım
V	Kayapınar kili	CH	Doğal numune
VI	Havuzlubahçe silti	ML	Doğal numune

3.1 Laboratuvar Deneyleri

Çizelge 3.1’ de bazı özellikleri verilen ve numaralandırılan numunelerin indeks, kayma mukavemeti ve doymun olmayan zemin mekaniği özelliklerini belirlemek için gerekli deneyler yapılmıştır. Bu deneyler elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri, piknometre, kompaksiyon, kesme kutusu, basınç plakası ve tempe basınç hücresidir.

Deneylerin yapıları ve deneylerde kullanılan standartlar ile ilgili şartnameler bu kısımda açıklanacaktır. Deneylerde genelde ASTM (American Society of Testing Material) standartları göz önünde bulundurulmuştur.

3.1.1 Elek analizi ve hidrometre deneyleri

Deney programında ilk adım numunelerin sınıflandırılmasıdır. Sınıflandırma için; kaba daneli zeminlerde elek analizi, ince daneli zeminlerde elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Deney çalışmaları yürütülürken ASTM D422 standardı kullanılmıştır [35].

Zemin danelerinin sınıflandırılmasında ilk kullanılan test elek analizidir. Elek analizi yapılırken incelenecek zeminden gerekli miktarda yaş numune alınır ve bu numune 24 saat süre ile 105 °C' lik etüvde kurutulur. Kuru numune dane çapını bulabilmek için bir dizi standart elekten geçirilir ve eleklerden geçen yüzdelere (%P) eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanır. Elekten geçen yüzde incelenen elek üzerinde kalan zemin miktarı tartılarak belirlenir. Deney sonuçları yatay eksende tane çapı (mm) ve düşey eksende geçen yüzde olarak oluşturulan bir eğri şeklinde yarı logaritmik eksen takımına göre gösterilir [36].

$$\% P = \frac{\text{Elekten Geçen Zemin Miktarı}}{\text{Elemeye Tabi Tutulan Zemin}} \times 100 \quad (3.1)$$

İnce daneli zeminlerde, dane çaplarının büyük bir kısmı 0,075 mm' den küçüktür. Bu zeminlerin küçük dane çapından dolayı elek analizi yapmak mümkün değildir. Bu tür zeminlerde dane çapı dağılım eğrisini elde etmek için hidrometre deneyi kullanılır. Deney, 200 no' lu elek altına geçmiş olan numuneden 1000 cm³'lük bir süspansiyon oluşturup, bu süspansiyonu meydana getiren danelerin sıvı içerisinde çökme hızlarındaki farklılıkların değerlendirilmesine dayanmaktadır. Katı maddelerin çökme hızları Stoke kanunundan yararlanarak hesaplanır. Hidrometre denilen alet ile belirli sürelerde süspansiyonun birim hacim ağırlığı ölçülür [36].

Numunelerin dane çaplarının küçük olduğu koşullarda yıkamalı elek analizi deneyi yapılmaktadır. Yıkamalı elek analizinde incelenecek numune 200 no' lu elek üzerinde yıkanır. Eleğin üstünde kalan ve eleğin altına geçen numuneler ayrı kaplarda kurutulduktan sonra standart elek analizi yapılır [37].

Yapılan elek analizi deneylerinde yıkamalı elek analiz tercih edilmiştir. Çalışılan zeminlerde dane çaplarının küçük olması ve bu danelere silt ve kil numunelerin yapışma olasılıklarından dolayı yıkamalı analizin daha güvenilir olacağı düşünülmüştür. Elek analizin deneylerinde killi numuneler için 350 gr, kumlu numuneler için ise 500 gr zemin kullanılmıştır. Hidrometre deneyleri ise 50 gr numune ile yapılmış ve ayrıştırıcı madde olarak da sodyum hexametaphosphate kullanılmıştır.

3.1.2 Kıvam limitleri deneyi

İnce daneli zeminlerin sınıflandırılmasında dane çapı eğrisinin yanı sıra Casagrande plastisite kartı da kullanılır. Plastisite katına göre zeminlerin sınıflandırılması için zemin numunesine ait likit limit (plastik ve likit durumları ayıran sınır su muhtevası) ve plastik limit (plastik ve yarı katı durumu ayıran sınır su muhtevası) değerleri gerekir [38]. Likit limit iki farklı yöntem kullanılarak elde edilir. Bunlardan birincisi Casagrande yöntemi, diğeri ise düşen koni yöntemidir. Numunelere ait likit limit değerleri Casagrande yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Likit limit deneyi, etüvde kurutulmuş ve 40 no' lu elekten elenmiş numune ile yapılır. Deney sırasında değişik su muhtevalarında numuneler hazırlanır, bu numunelerin Şekil 3.1' de görülen Casagrande aletine koyulur. Standart numune yerleştirilmesi yapıldıktan sonra, numune açıklığının 13 mm kapanmasının sağlamak amacıyla alet kolunun değişik su muhtevalarındaki düşüş sayısı belirlenir. Likit limit değeri aletin 25 vuruşuna denk gelen su muhtevası yüzdesidir. Deney esnasında 25 vuruşa denk gelen su muhtevasının hesaplanmasının zorluğundan dolayı deney, farklı su muhtevaları ve vuruş sayıları elde etmek prensibi ile yapılır. Elde edilen veriler neticesinde yarı logaritmik eksen takımı üzerinde su muhtevası – vuruş sayısı (logaritmik eksene yerleştirilir) grafiği oluşturulur. Bu grafikte 25 vuruşa denk gelen su muhtevası incelenen zeminin likit limit değeridir [39]. Şekil 3.1' de likit limitin yapılış aşamaları gösterilmiştir.

Plastik limit deneyi ise likit limit için hazırlanan numunenin birinci veya ikinci noktasından (özellikle birinci noktadan) alınan numuneden yapılır. Bu numune üzerinde su muhtevasını azaltmak için yoğurma işlemi uygulanır. Zeminin plastik özelliğini koruduğu en düşük su muhtevası plastik limit olarak isimlendirilir [40]. Bu

nokta hazırlanan numunenin düzgün bir yüzey üzerinde yaklaşık olarak 3 mm çapında silindirler oluşturulduğu noktadaki su muhtevasıdır [39].

Tez çalışmasında killi numuneye ait likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Deneyler, aynı zemin örneğine ait farklı numuneler hazırlanarak kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 : Likit limit deneyi

3.1.3 Standart kompaksiyon deneyi (Standart proktor deneyi)

Killi numunelerin ve karışım numunelerinin doygun olmayan zemin mekaniği özelliklerini belirlenmesi için yapılan deneylerde, numuneler optimum su muhtevası değerine yakın şartlar altında standart proktor sıklığında hazırlanmıştır. Optimum su muhtevası değerini belirlemek için standart proktor deneyleri yapılmıştır.

Deney sırasında ASTM D698 şartnamesindeki A yöntemi göz önünde bulundurulmuştur [41]. Deneyin ana prensibi; farklı su muhtevalarında hazırlanmış numuneleri, standart bir kalıp kullanarak belirli sayıda ve belirli tabakalar halinde

standart bir tokmak ile sıkıştırmaktır [40]. Deneyde hacmi bilinen kabı dolduran zemin ağırlığından, ıslak birim hacim ağırlığı (γ_n) ve numunenin hazırlandığı su muhtevası (w) değerinden Eşitlik 3.2 kullanılarak kuru birim hacim ağırlığı elde edilir. Bu işlem 5-6 defa tekrarlanarak uygulanır. Deney sonuçları kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevasının eksen takımını oluşturduğu grafikte sunulur. Deney sonuçlarından elde edilen doğrunun tepe noktası optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) değerlerini verir.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1 + w} \quad (3.2)$$

3.1.4 Dane birim hacim ağırlığı belirlenmesi ve izafi sıklık deneyi

Dane birim hacim ağırlığının belirlemede piknometre denilen saydam cam şişeler kullanılır [42]. Deney yapılacak zemin numunesi (4 no' lu elekten geçen) etüvde 24 saat süre zarfında kurutulur. Piknometre ilk olarak damıtık su ile doldurulur ve kurutulup tartılır (W_1). Sonra piknometre belli bir miktar zemin ve su ile doldurularak tartılır (W_2) [36]. Deney yapılırken piknometreyi dolduran damıtık su içerisinde hava kabarcıkları kalmamalıdır. Deney sonunda aşağıdaki eşitlik kullanılarak zeminin dane birim hacim ağırlığı belirlenir:

$$\gamma_s = \frac{W_k}{W_k - (W_2 - W_1)} \quad (3.3)$$

γ_s : dane birim hacim ağırlığı , (gr/cm^3)

W_k : kuru zemin numunesi , (gr)

W_1 : piknometre + saf su , (gr)

W_2 : piknometre + saf su + kuru zemin numunesi , (gr)

İzafi (Rölatif) sıklık, kaba daneli zeminlerinde minimum ve maksimum boşluk oranlarını göre zeminin doğal konumunu ifade eden bir değerdir. İzafi sıklık değerinin belirlenebilmesi için o zemin örneğine ait minimum ve maksimum boşluk oranlarının bilinmesi gerekir. Bu değerler sabit bir hacme sahip numune kabının gevşek veya sıkı şekilde kuru numune ile doldurulup ağırlığının ölçülmesiyle elde edilir. Minimum boşluk oranını elde etmek için numune tabakalar halinde titreşim uygulayarak yerleştirilip, ağırlığı ölçülürken; maksimum boşluk oranın elde etmek

için ise numune huni yardımı ile titreşim uygulanmadan doldurulup ağırlığı belirlenir. Bir zemin numunesinin izafı sıklığı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\gamma_k = \frac{\left[\frac{1}{\gamma_{k(min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_k} \right]}{\left[\frac{1}{\gamma_{k(min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_{k(max)}} \right]} = \left[\frac{\gamma_k - \gamma_{k(min)}}{\gamma_{k(min)} - \gamma_{k(max)}} \right] \left[\frac{\gamma_{k(max)}}{\gamma_k} \right] \quad (3.4)$$

γ_k : zeminin doğıal kuru birim hacim ağırlığı, gr/cm³

γ_{kmin} : zeminin en gevşek kuru birim hacim ağırlığı, gr/cm³

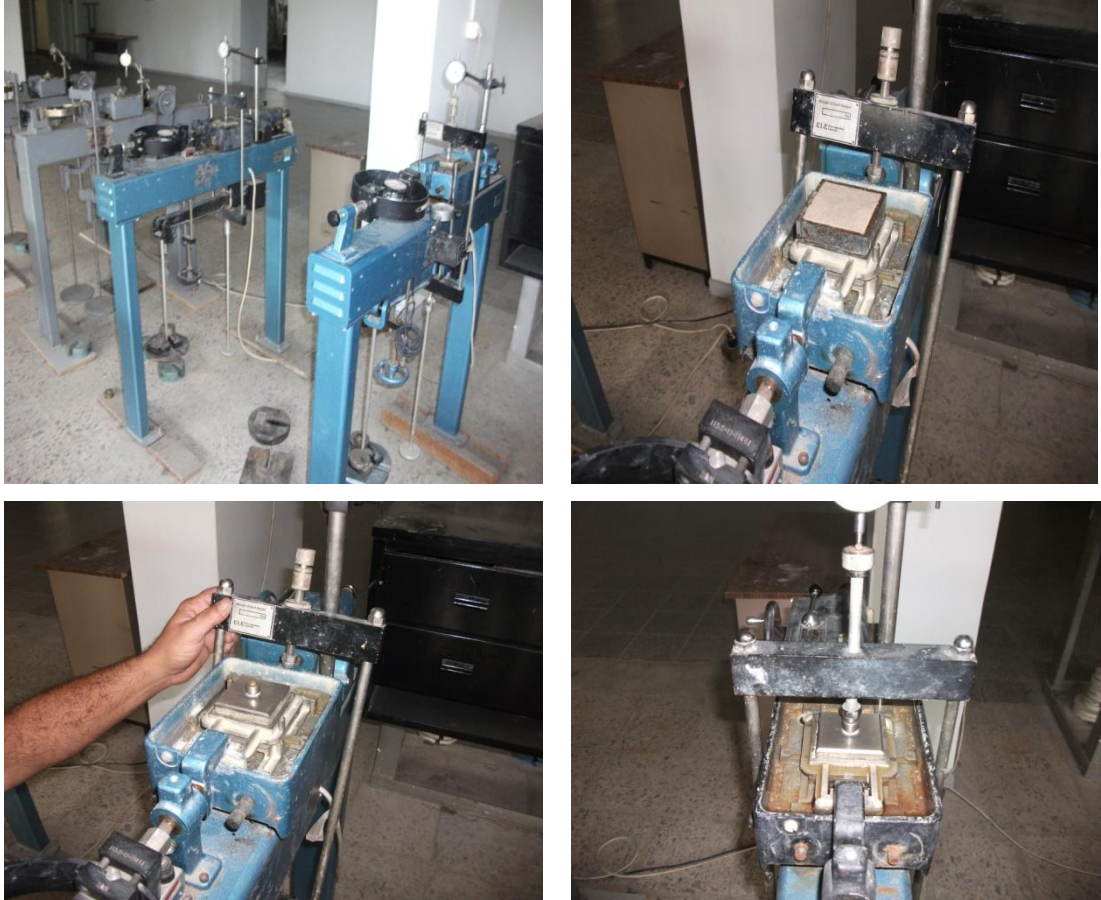
γ_{kmax} : zeminin en sıkı kuru birim hacim ağırlığı, gr/cm³

3.1.5 Kesme kutusu deneyi

Geoteknik mühendisliğı uygulamalarında kullanılan kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek için farklı deney türleri mevcuttur. Gerek arazide yapılan deneyler neticesinde gerekse de laboratuvar deneyleri ile kayma mukavemeti parametreleri belirlenebilir. Çalışmamızda gerekli kayma mukavemeti parametreleri kesme kutusu deneyi ile elde edilmiştir.

Kesme kutusu deneyi ASTM D3080 standartlarına göre yapılmıştır. Deney yapılırken arazideki sıklılığında veya arazideki kıvamında hazırlanmış numune şekil 3.2' de görülen kesme kutusu haznesine konulur. Kesme kutusu haznesi dikdörtgen kesit olabileceğı gibi dairesel kesitli de olabilir. Bu hazne iki parçadan oluşmaktadır. Haznenin st kısmı kendisine uygulanan kuvvet neticesinde kayarken, alt kısmı ise sabit kalır. Deney yapılırken numunenin düşey hareketini önlemek ve arazideki doğıal koşulları oluşturmak amacı ile normal kuvvet uygulanır. Kesme işlemine başlamadan önce numune üzerine uygulanan normal kuvvetin etkisi altında numunenin konsolide olması beklenir. Konsolidasyon süresi numunenin cinsine göre değışmektedir. Kumlu numunelerde konsolidasyon daha çabuk gerçekleşirken, killi numunelerde bu süre uzamaktadır [43]. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra önceden belirlenmiş kayma yüzeyi boyunca numunenin yer değıştirmeleri(yatay ve düşey olarak) gözlemlenir. Deneyde uygulanan yatay kuvvet, bir motor sistemi sayesinde sağılanır. Kesme kutusu deneyi yapılırken önemli bir hususta numunenin kesilme hızıdır. Kesme hıza göre deneyin drenajlı veya drenajsız koşullarda gerçekleştiğı ortaya çıkar.

Deney, farklı normal kuvvetler uygulanarak tekrarlanır ve sonucunda kayma gerilmeleri ile normal gerilmelerin ilişkilendirildiği kırılma zarfı elde edilir. Deney esnasında kırılmanın veya göçmenin kayma gerilmesinin en büyük değerinde meydana geldiği kabul edilir. Deney sonuçları kayma gerilmesi - eksenel boy değişimi ve kayma gerilmesi - normal gerilme olan iki ayrı grafik türü oluşturularak sunulur. Şekil 3.2’ de kesme kutusu deneyinin yapılışı ve hazırlanan numune gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Kesme kutusu deneyi

3.1.6 Tempe basınç hücresi

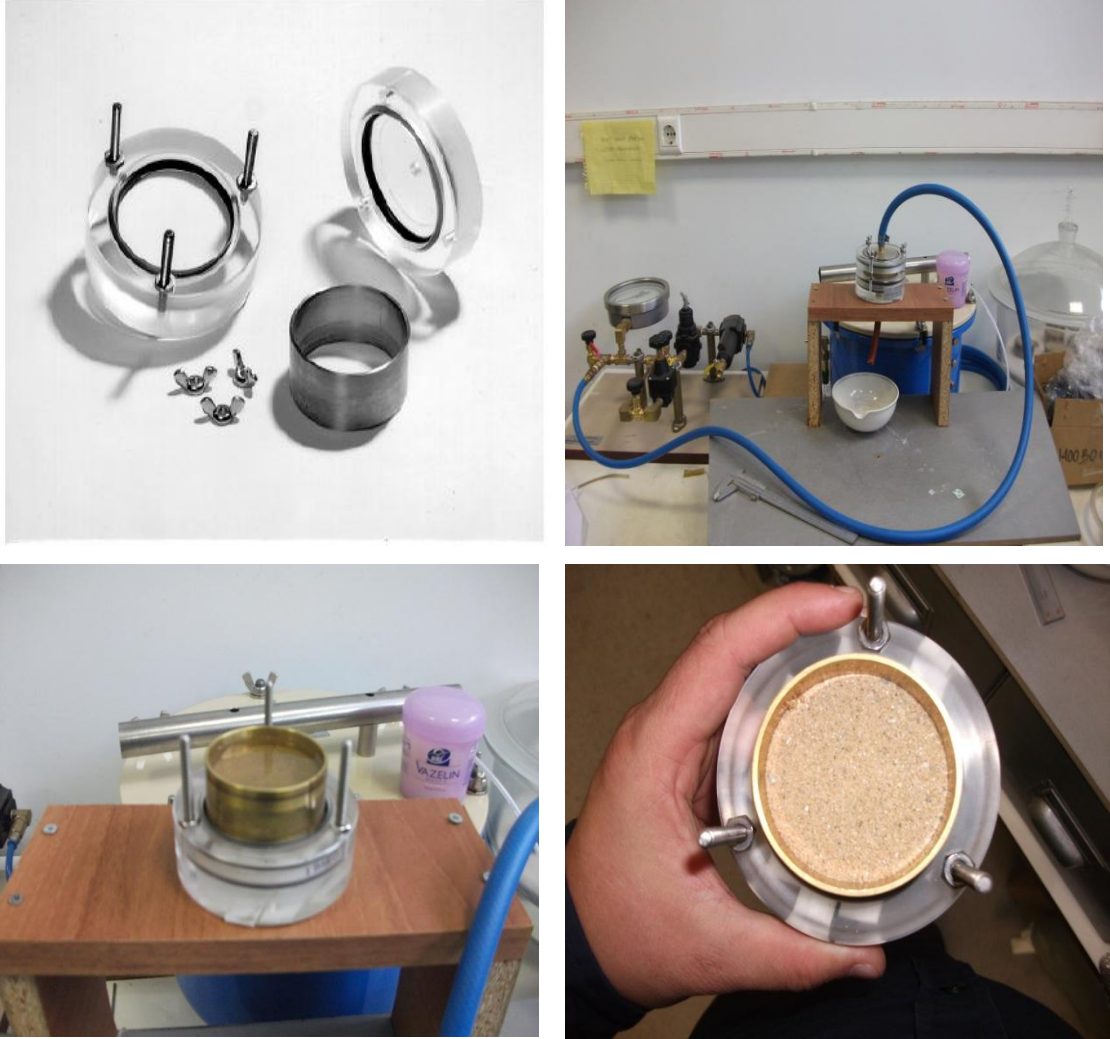
Kaba daneli zeminler için zemin su karakteristik eğrisinin (SWCC) belirlemede Tempe basınç hücresi yaygın olarak kullanılmaktadır. Deney eksen kaydırma tekniğine göre tasarlanmıştır. Eksen kaydırma tekniği doymamış zeminlerde matrik emme basıncını, yüksek hava giriş değerine sahip seramik diskler kullanılarak kontrol altında tutma veya ölçme işlemidir [11]. Tempe basınç hücresi kullanılarak 0-100 kPa arasında matrik emme değerine sahip zeminler için zemin su karakteristik

eğrileri elde edilebilmektedir. Tempe basınç hücresinin ve basınç plakası aletinin çalışma prensipleri aynıdır. İki alet arasındaki en önemli fark ise, aletlerde emme basıncı ölçümü yapma için kullanılan zemin türleridir. Tempe basınç hücresi daha düşük basınç kademelerinde çalışırken, daneli zeminlerin deneylerinde kullanılır; basınç plakası aleti ise 0-1600 kPa değerlerine kadar emme basıncı okumalarını yapabilmekte ve genelde ince daneli zeminler için kullanılmaktadır.

Şekil 3.3' de görüldüğü üzere tempe basınç hücresi taban haznesi, yüksek hava giriş değerine sahip seramik disk, üst kapak, o-ring, numune kabı, pul ve alete ait özel vida sistemlerinden oluşmaktadır. Deneyin yapılabilmesi için Tempe basınç hücresi aletinin yanı sıra basınç kaynağı, hassas terazi, basınç ölçer ve drenaj kabı gereklidir. Şekil 3.3' de laboratuvarımızdaki çalışır durumdaki tempe basınç hücresi gösterilmiştir. Deneye başlamadan önce yüksek hava giriş değerine sahip (HAE) diskin doyurulması gerekmektedir. Disk doyurulurken öncelikle basınç hücresinin alt kısmındaki yerine yerleştirilir. Sonra hücrenin konumundan daha yüksekteki su kaynağından düşük akış hızında, hücrenin altındaki besleme borusu kullanılarak diskin üzerine su akışı sağlanır. Diskin içerisinde bulunan havanın dışarıya çıkıp boşlukların su ile dolması için düşük bir basınç uygulanır (5-10 kPa). Sistem oluşturulduktan sonra diskin doyması için bir gün beklenir.

Disk doyurulduktan sonra örselenmemiş ince daneli numune veya arazideki sıklığa göre hazırlanmış kuru kum numune tempe basınç hücresine yerleştirilir Besleme borusu kullanılarak numunenin doyurulması sağlanır. Doyurulan numunenin ağırlığı tartılır. Numune doyurulduktan sonra, hücrenin drenaj kabı bağlanır. Küçük basınç değerlerinden başlayarak hücre içerisine basınç verilir. Bu esnada drenaj borusundan drenaj kabına su çıkışı başlar. Deneye su çıkışı durduğu anda (yaklaşık bir gün) ara verilir ve çıkan su tartılır. Her basınç kademesinde aynı işlem yapılarak zemin doygunluk derecesi matrik emme veya su muhtevası matrik emme eğrisi oluşturulur. Çalışma yapılırken numunenin drenaj kısmında hava kaparcıklarının oluşmamasına, drenaj suyunun buharlaşmamasına ve hassas terazi kullanılmasına dikkat edilmelidir. Özellikle sıcak iklim koşullarında drene olan su buharlaşmaktadır. Deney yapanın buharlaşmayı önleyecek önlemleri almaması deney sonuçları etkileyecektir. Yapılan deneyde numuneden drene olan suyun buharlaşmasını önleyemediğimiz görülmüş ve ölçümler drene olan suya göre değil de zemin numunesinin tartarak elde edilmiştir.

Bu işlem sırasında numunede her basınç kademesinden sonra ağırlık azalmıştır. Azalan ağırlık emme basıncı neticesinde numuneden drene olan sudur [44].



Şekil 3.3 : Tempe basınç hücresi deneyi

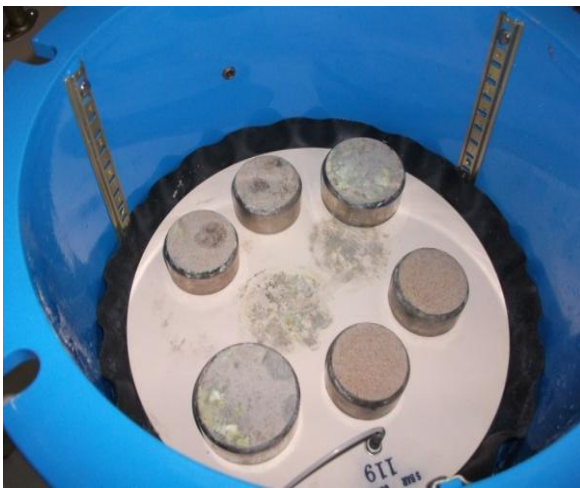
3.1.7 Basınç plakası

Zeminlerin Su Karakteristik Eğrisini belirlemede kullanılan başka bir yöntemde basınç plakası yöntemidir. Bu yöntem ile farklı zemin numunelerin için 0-1600 kPa arasında değişen matrik emme basıncı uygulanarak, eksen kaydırma prensibine göre doymun olmayan zemin mekaniği özellikleri belirlenebilir (SWCC). Şekil 3.4’ de gösterilen laboratuvarımızdaki basınç plakası aleti kullanılarak, killi zemin numuneleri ve karışım numunelerinin zemin su karakteristik eğrileri elde edilmiştir. Alet üç ana birleşenden oluşur. Bu birleşenler; yüksek dayanımlı çelik basınç tenceresi, yüksek hava giriş değerine sahip seramik disk ve seramik diskin de üzerine monte edildiği kauçuk membrandır. Deney aletimizde kullanılan seramik disk maksimum 500 kPa

hava giriş değerine dayanabildiği için deneylerimiz de bu değer üzerindeki noktalar için basınç ölçümleri yapılamamıştır. Güvenli tarafta kalabilmek amacı ile uygulanan maksimum matrik emme basınç değeri 450 kPa olarak seçilmiştir.

Deneyin yapılışı basitçe belirli su muhtevalarında hazırlanmış zemin numunelerinin doyurulup, bu numunelere basınç kaynağından sağlanan matrik emme basıncı neticesinde, numunelerdeki boşluk suyunun dışarı atılması şeklindeyir. Deneye başlamadan önce seramik disk doyurulmalıdır. Seramik doyurulurken saf su kullanılır. Disk doyurulurken dikkat edilmesi gereken bir başka hususta, seramik diskin gözeneklerinde hava kabarcıkları oluşmamasıdır. Gözenekler doymun durumda tamamen saf su ile dolmalıdır. Bunu sağlamak için, doymun sırasında küçük değerlerde (5 – 10 kPa) basınç uygulanır. Numunenin doyurulması ise desikatör kullanılarak veya alet içerisinde yapılabilir. Numunenin doymun noktası temel ktle hacim bağıntıları kullanılarak kontrol edilmelidir.

Deneye başlangıç aşamaları tamamlandıktan sonra numuneler seramik diskin üzerine yerleştirilir (şekil 3.4). Aletinın kapağı hava girişi olmayacak şekilde kapatılıp, basınç uygulanmaya başlanır. Uygulanan basınç neticesinde zemin içerisindeki boşluk suyu tahliye olur. Zemin içerisindeki su çıkışı sona erene kadar aynı basınç kademesinde çalışılmaya devam edilir. Bu kademe sonrasında ring numuneler tartılır ve kaybettikleri su miktarı belirlenir. İşlemler farlı basınç değerlerinde tekrarlanarak, zemin-su karakteristik eğrisi oluşturulur [45].



şekil 3.4 : Basınç plakası deneyi

3.2 Numunelerin Mühendislik Özellikleri

3.2.1 Numune I (CL)

Çalışmada analizleri yapılan ilk numune İstanbul ilinin Şile semti civarından temin edilmiş zemindir. Bu zemin numunesi üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde numunenin düşük plastik kil olduğu saptanmıştır. Numune üzerinde elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmış ve dane dağılım eğrisi elde edilmiştir. Numunenin dane dağılımı eğrisini Şekil 3.5’ de gösterilmektedir.

Numuneye ait endeks özellikleri yardım ile Çizelge 3.2 oluşturulmuştur. Çizelge 3.2’de numunenin likit limit, plastik limit, dane birim hacim ağırlığı değerleri ve numunenin içerisindeki ince dane ve kaba dane yüzdeleri görülmektedir.

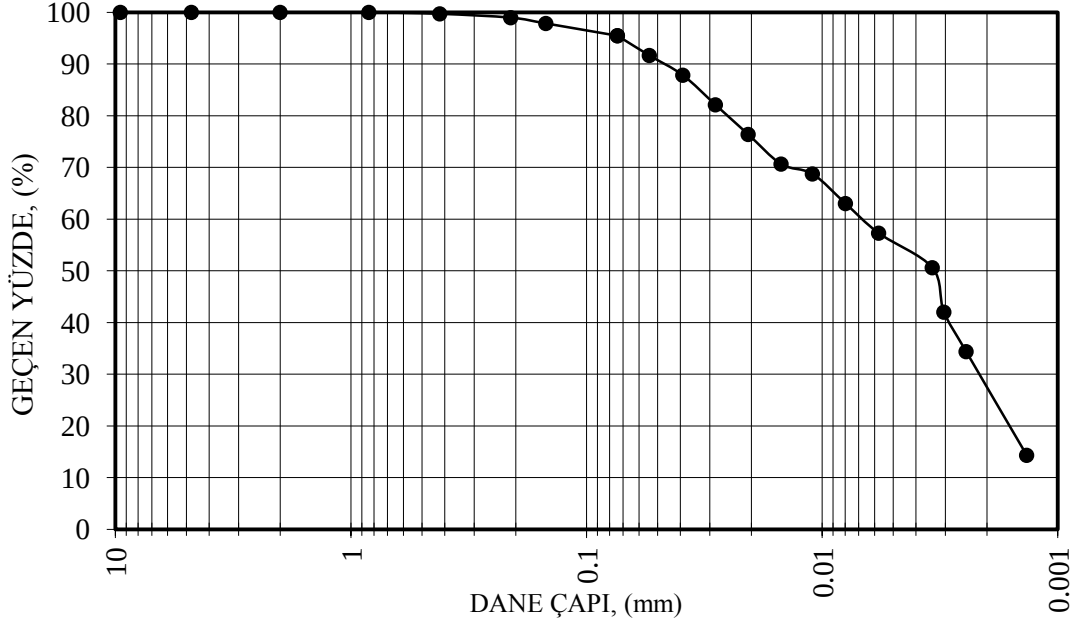
Çizelge 3. 2 : Numune I’ in endeks özellikleri

<i>Numunenin Adı</i>	<i>Numune I</i>
Çakıl (%)	0
Kum (%)	5
Kil+Silt (%)	95
Likit Limit (%)	41
Plastik Limit (%)	22
USCS Göre Sınıflandırılması	CL
Dane birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	26.95

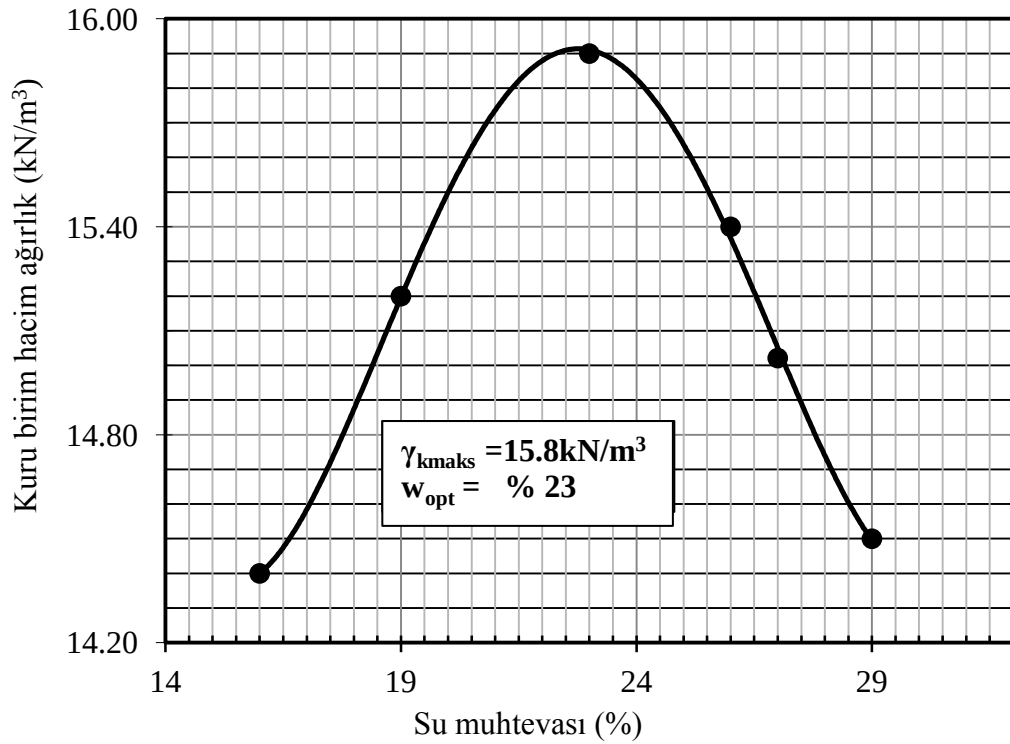
Şekil 3.5 ‘e ve Çizelge 3.2’ de sunulmuş deney sonuçları neticesinde numune birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre sınıflandırılmıştır. Numunede ince dane oranı kaba dane oranından fazla olduğu için sınıflandırma yapılırken Casagrande plasite kartı kullanılmıştır. Casagrande plastisite kartı ekler kısmında verilmiştir. Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre numune düşük plastik kildir.

Bölüm 3.2’ de geniş bir şekilde anlatılmış ve açıklanmış olan standart proktor deneyi numune kullanılarak yapılmıştır. Deney neticesinde numunenin kompaksiyon eğrisi

belirlenmiş ve bu eğri üzerinden maksimum kuru birim hacim ağırlığı ile optimum su muhtevası değerleri hesaplanmıştır. Numuneye ait kompaksiyon eğrisi şekil 3.6’ da gösterilir.

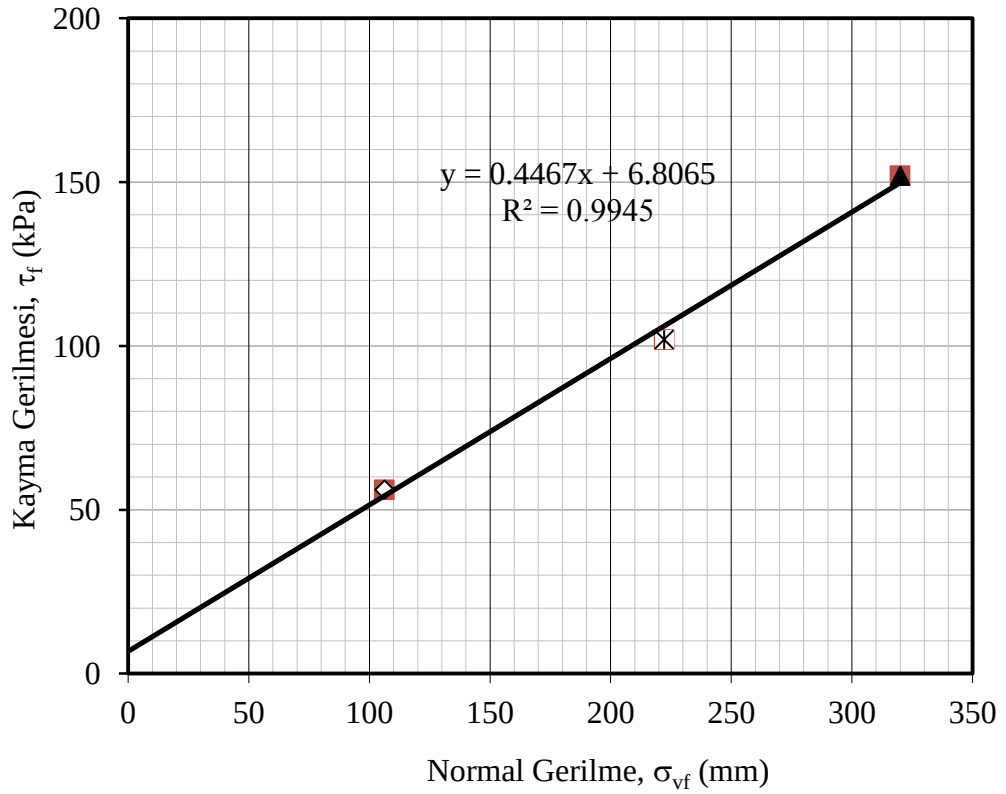


Şekil 3.5 : Numune I'e ait granülometri eğrisi



Şekil 3.6 : Numune I'e ait kompaksiyon eğrisi

Sonlu elemanlar metodu analizlerinde temellerin taşıma gücü değerlerinin hesaplanmasında kullanılacak olan kayma mukavemeti parametreleri killi numune için konsolidasyonlu drenajlı kesme kutusu deneyi yapılarak elde edilmiştir. Deney sırasında düşük kesme hızı uygulanarak numunenin drenajı sağlanmıştır. Optimum su muhtevasında standart proktor kalıbında hazırlanmış numuneye, 90 cm³ lük kesme kutusu haznesi batırılarak kesme kutusu deneyi için numune temin edilir. Bu numune bir gün süre ile konsolidasyona bırakılmış ve konsolide olduktan sonra düşük kesme hızı uygulanarak (0,012cm/sn) kesme başlatılmıştır. Deney üç farklı eksenel yük altında tekrarlanmış ve kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir. Deneye ait sonuçlar şekil 3.7’ de ve ekler kısmında verilmektedir.

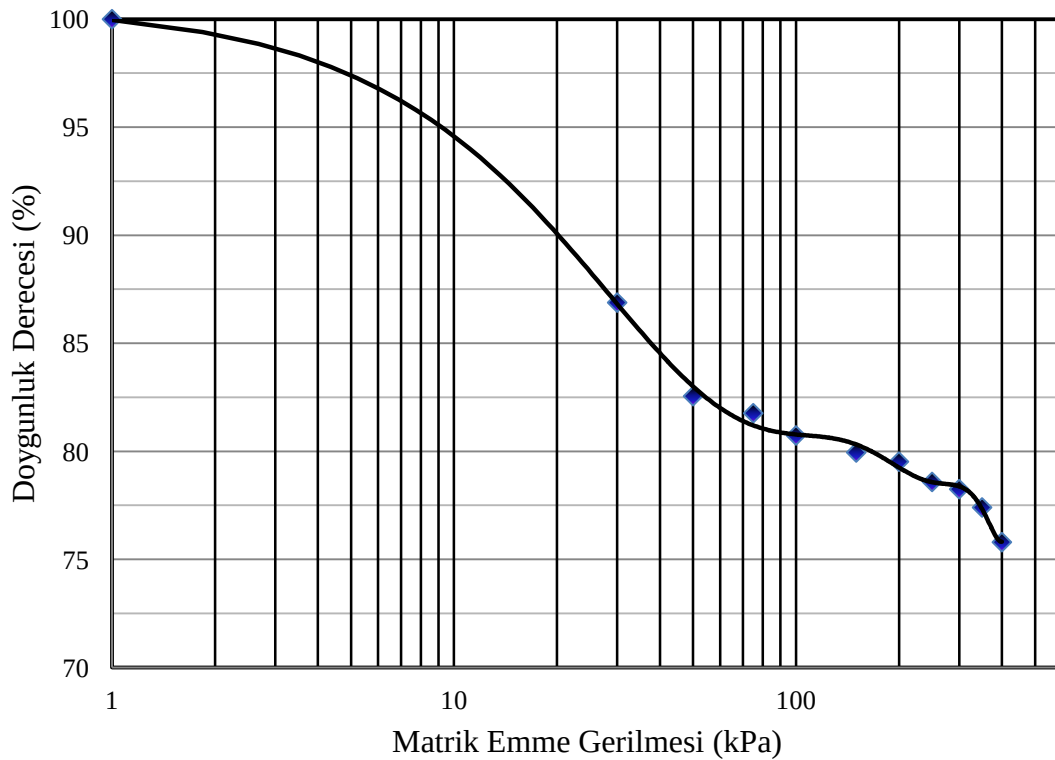


Şekil 3.7 : Numune I’e ait kesme kutusu deney sonuçları

Tez kapsamında yürütülen birinci deneysel çalışma basamağı kesme kutusu deneyi ile tamamlanmıştır. Bu aşamada yapılan deneyler geleneksel zemin mekaniği özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan ve hemen her zemin mekaniği laboratuvarında yer alan deney düzenekleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneyisel çalışmamın ikinci basamağını ise incelenen zemin numunesinin doymuş olmayan zemin mekaniği özelliklerinin temini oluşturmaktadır. Bu aşamada killi numuneler için basınç plakası kumlu numuneler için ise tempe basınç hücresi deneyleri yapılmıştır.

Basınç plakası deneyinin yapılışı önceki kısmında detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu deney neticesinde eksen kaydırma tekniği ile çalışan deneysel düzenek kullanılarak, matrik emme basınç ile zeminin su muhtevası parametreleri (S , doymuşluk derecesi; w , su muhtevası, θ , volumetrik su muhtevası) arasındaki ilişkisi elde edilir. Deney genelde örselenmemiş numuneler üzerinde yapılır. Ve zeminin doğal koşullarındaki zemin su karakteristik eğrisi (SWCC) elde edilir. I no'lu numuneye için yapılan basınç plakası deneyinde kullanılan zemin optimum su muhtevasında standart proktor sıkılığında hazırlanmıştır. Doyurulan numuneler farklı emme basınçları uygulanarak Şekil 3.8' de görülen SWCC elde edilmiştir. İnce daneli zeminlerde zemin suyunun drenajı yüksek basınç değerlerinde gerçekleştiğinden, uygulanan emme basıncı numuneye ait tam SWCC' e ulaşmamızı sağlamamıştır. Bu yüzden sonlu elemanlar analizinde VanGenuchten metoduna göre düzeltilmiş eğriler kullanılmıştır (**Ek D**).



Şekil 3.8 : Numune I'e ait zemin su karakteristik eğrisi

3.2.2 Numune II (SP)

Tezde analizleri yapılan ikinci numunemiz ise İstanbul ilinin Silivri bölgesinden elde edilen zemindir. Numune üzerinde elek analizi yapılmış ve sonuçları Şekil 3.9’ da gösterilmiştir. Numune üzerinde yapılan elek analizi sonuçlarına göre D_{60} , D_{30} ve D_{10} dane boyutları belirlenip, üniformaluluk ve derecelenme katsayıları eşitlik 3.5 ve 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca numuneye ait dane birim hacim ağırlığı, numune içerisindeki çakıl, kum ve silt, kil yüzdeleri hesaplanıp Çizelge 3.3 oluşturulmuştur. Çizelge 3.3 de bu numuneye ait maksimum ve minimum boşluk oranlarına da verilmektedir. Bu değerleri elde etmek için yapılan deneyler ve hesaplamalar önceki bölümlerde açıklanmıştır.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.5)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (3.6)$$

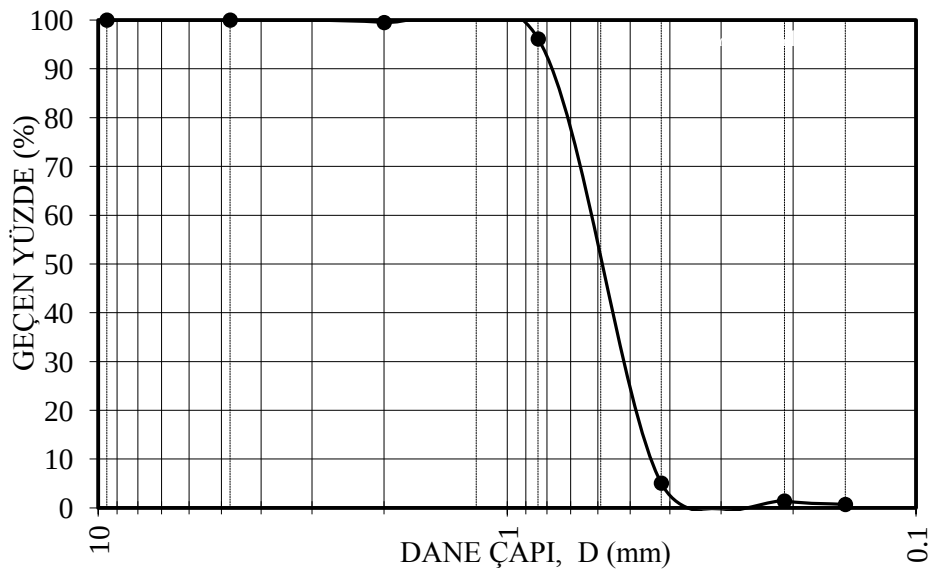
C_u : üniformaluk katsayısı

C_c : derecelenme katsayısı

D_{60} : % 60 geçen miktarına tekabül eden dane çapı (mm)

D_{30} : % 30 geçen miktarına tekabül eden dane çapı (mm)

D_{10} : % 10 geçen miktarına tekabül eden dane çapı (mm)

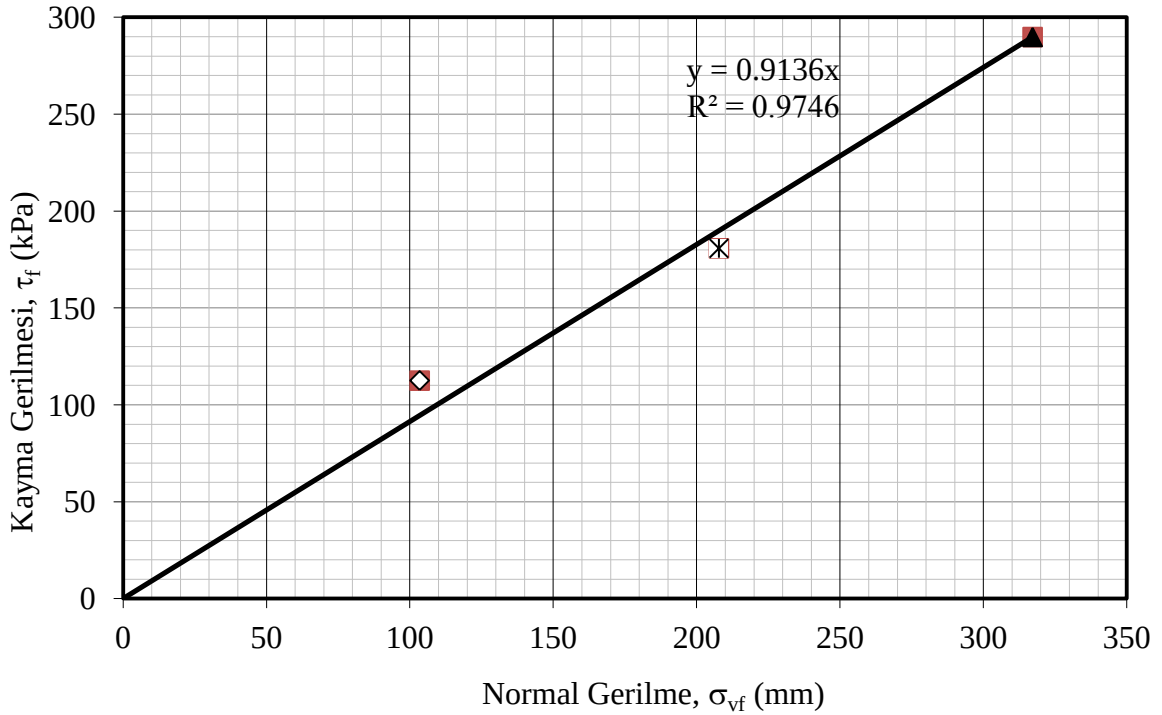


Şekil 3.9 : Numune II’e ait granülometri eğrisi

Çizelge 3. 3 : Numune II' in endeks özellikleri

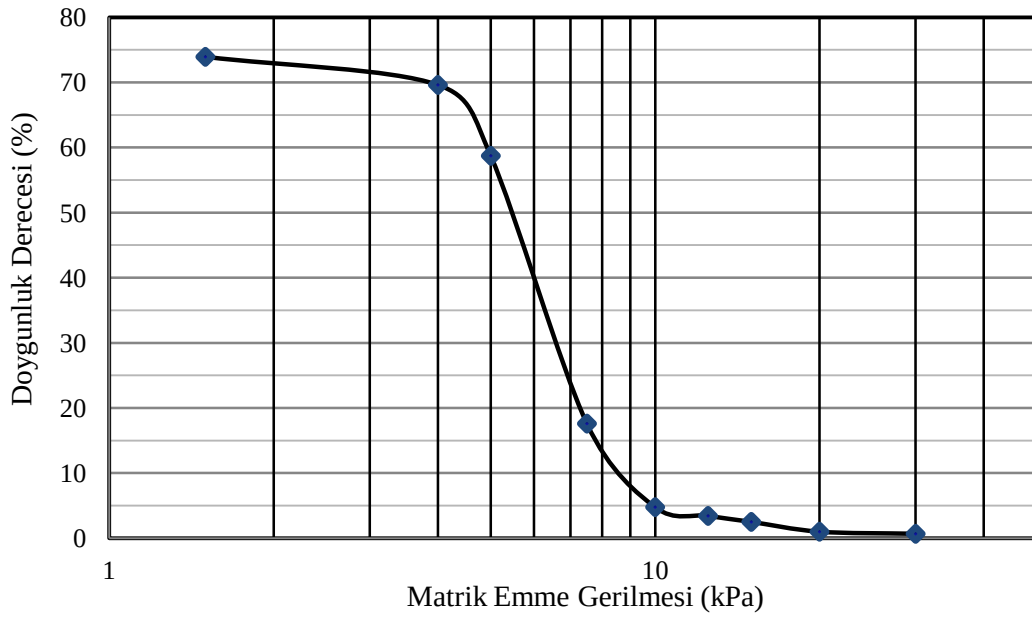
<i>Numunenin Adı</i>	<i>Numune II</i>
Çakıl (%)	0
Kum (%)	100
Kil+Silt (%)	0
Maksimum boşluk oranı (e_{mak})	0,756
Minimum boşluk oranı (e_{min})	0,589
USCS Göre Sınıflandırılması	SP
Dane birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	26. 1

Kum numunede kayma mukavemeti parametreleri elde etmek için kesme kutusu deneyi yapılmıştır. %50 izafi sıkılık ($D_r = \%50$) değerine göre hazırlanmış numune, 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal kuvvet değerlerinde kesilmiştir. Deney neticesinde elde edilen sonuçları şekil 3.10' da gösterilmektedir. Ayrıca farklı normal kuvvetler altındaki deney sonuçları ekler kısmında verilmiştir.



Şekil 3.10 : Numune II'e ait kesme kutusu deney sonuçları

Deney çalışmalarının ikinci aşamasında ise doymun olmayan zemin mekaniği özellikleri tempe basınç hücresi kullanılarak elde edilmiştir. %50 izafi sıklıkta hasırlanan numune hücreye yerleştirilmiş, basınç plakası deneyine göre daha az emme basıncı uygulanarak zemin su karakteristik eğrisi elde edilmiştir (Şekil 3.11). Deney sonuçlarından da anlaşılacağı üzere kum daneleri arasındaki geniş boşluklar neticesinde matrik emme basınç değerleri kumlu numuneler de killi numunelere göre daha küçük değerlerde zemin suyunun çıkışını sağlamıştır. Deney neticesinde kil ve karışım numunelerine göre tam bir eğri elde edilmiştir.



Şekil 3.11 : Numune II'e ait zemin su karakteristik eğrisi

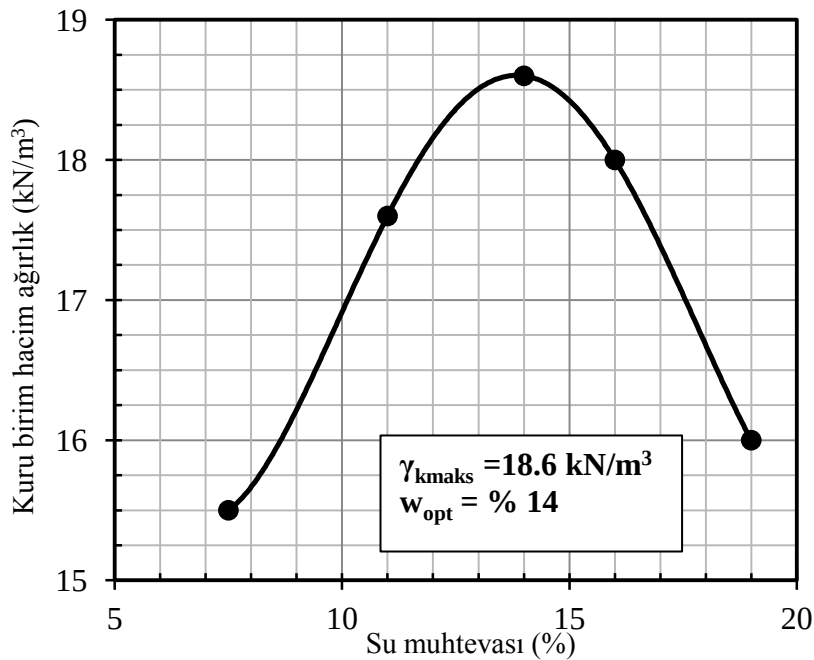
3.2.3 Numune III (%50 CL + %50 SP)

Farklı numunelerin doymun olmayan zemin mekaniği özelliklerini belirlemek amacı ile deneysel çalışmada iki doğal numune kullanılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışım numuneleri Şile kili ile Silivri kumunun belirli yüzdelerde kuru olarak karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Birinci karışım numunesi kuru ağırlıkları eşit miktarda kullanılarak, ağırlıkça %50 CL (Şile Kili) ve %50 SP' den (Silivri Kum) oluşan III no' lu numunedir. Karışım oluşturulurken kurutulmuş kil numunesi 40 no' lu (0.420 mm) elekten elenir. Karışımı oluşturacak olan diğer numune kum numunesi ise yıkandıktan sonra kurutulur. Hazır hale gelmiş bu iki numune istenilen yüzdelerde karıştırılarak yeni numune elde edilir. Karışım numunesi hazırlanırken birleşen olarak kullanılan numuneler küçük ölçülerde yayvan bir kap içerisine konmuş ve bu kap içerisinde homojen bir yüzde oluşturacak şekilde

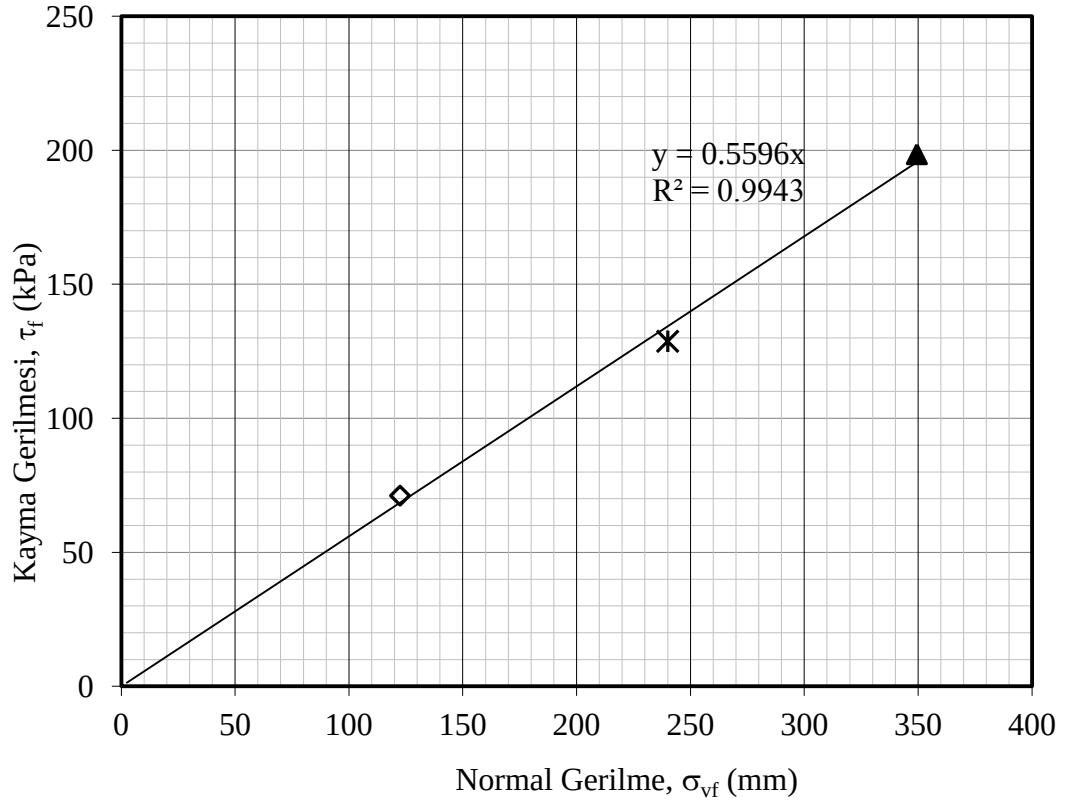
kariştırılmıştır. Hazırlanan numune III' ün dane birim hacim ağırlığı 2.64 t/m^3 olarak hesaplanmıştır.

III no' lu numunenin doygun olmayan zemin mekaniğı özellikleri basınç plakası aleti kullanılarak hesaplanmıştır. Deney kil zeminde olduğı gibi optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde yapılır. Bu numuneler standart proktor sıklığında hazırlanır ve ring batırarak elde edilir. şekil 3.12' de numune III' e ait kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir. Numunenin optimum su muhtevası %14 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 18.6 kN/m^3 olarak hesaplanmıştır.

GeoStudio paket programında kullanılacak kayma mukavemeti parametreleri III no' lu numune için kesme kutusu deneyinden belirlenmiştir. Deney numunesi optimum su muhtevasında ve proktor sıklığında hazırlanmış (basınç plakası deneyinde olduğı gibi) ve kesme kutusu haznesinde bir gün boyunca konsolidasyona bırakılmıştır. Numune içerisinde ki suyun drenajına izin verecek şekilde düşük hızda kesme kesilmiştir. Deney numunesi hazırlanırken numunelerin aynı su muhtevasında ve aynı enerji uygulanarak hazırlanmasına önem gösterilmiştir. Kesme işlemi diğerk zemin numunelerinde olduğı gibi 100 kPa, 200kPa ve 300kPa normal yükler altında yapılmıştır. Deneye grafikler ekler kısmında verilmektedir. Deneyden elde edilmiş olan deney sonuçları ve kayma mukavemeti parametreleri ise şekil 3.13' de gösterilmiştir.

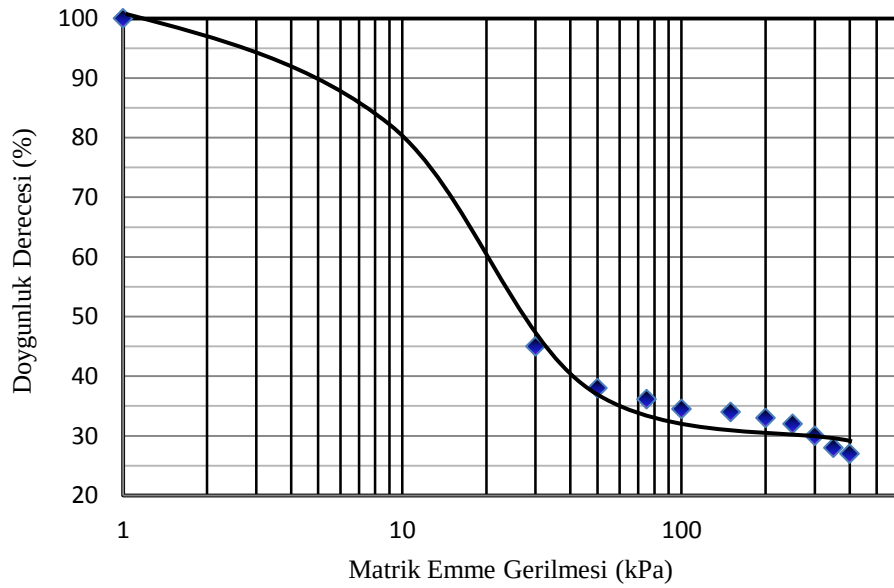


Şekil 3.12 : Numune III'e ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 3.13 : Numune III'e ait kesme kutusu deney sonuçları

Numune üzerinde yapılan basınç plakası deneyi sonucunda numune ait zemin su karakteristik eğrisi belirlenmiştir. Doygun olmayan zemin mekaniği analizlerinde çoğu zaman kullanılan bu eğri Numune III için Şekil 3.14' verilmiştir.

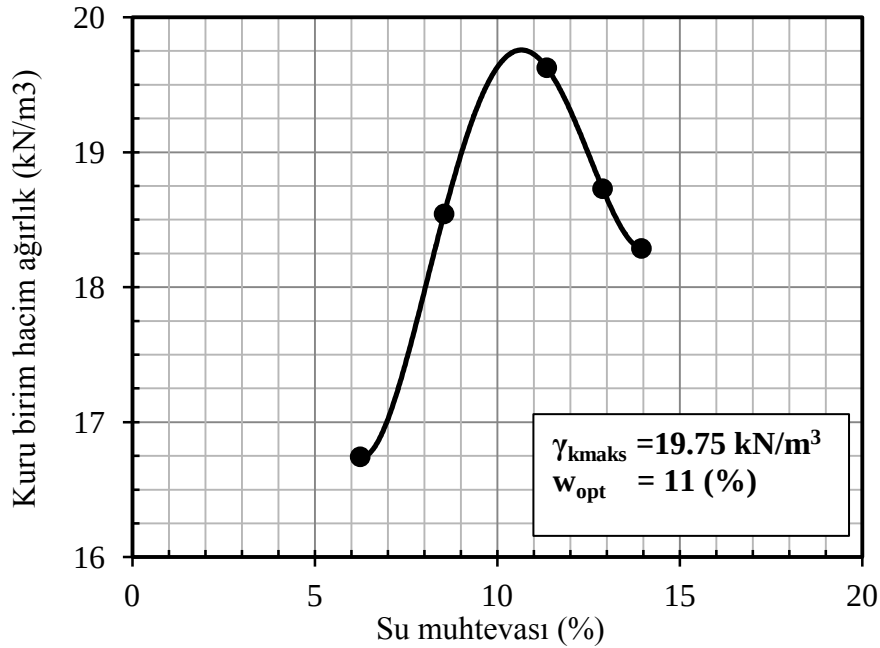


Şekil 3.14 : Numune III'e ait zemin su karakteristik eğrisi

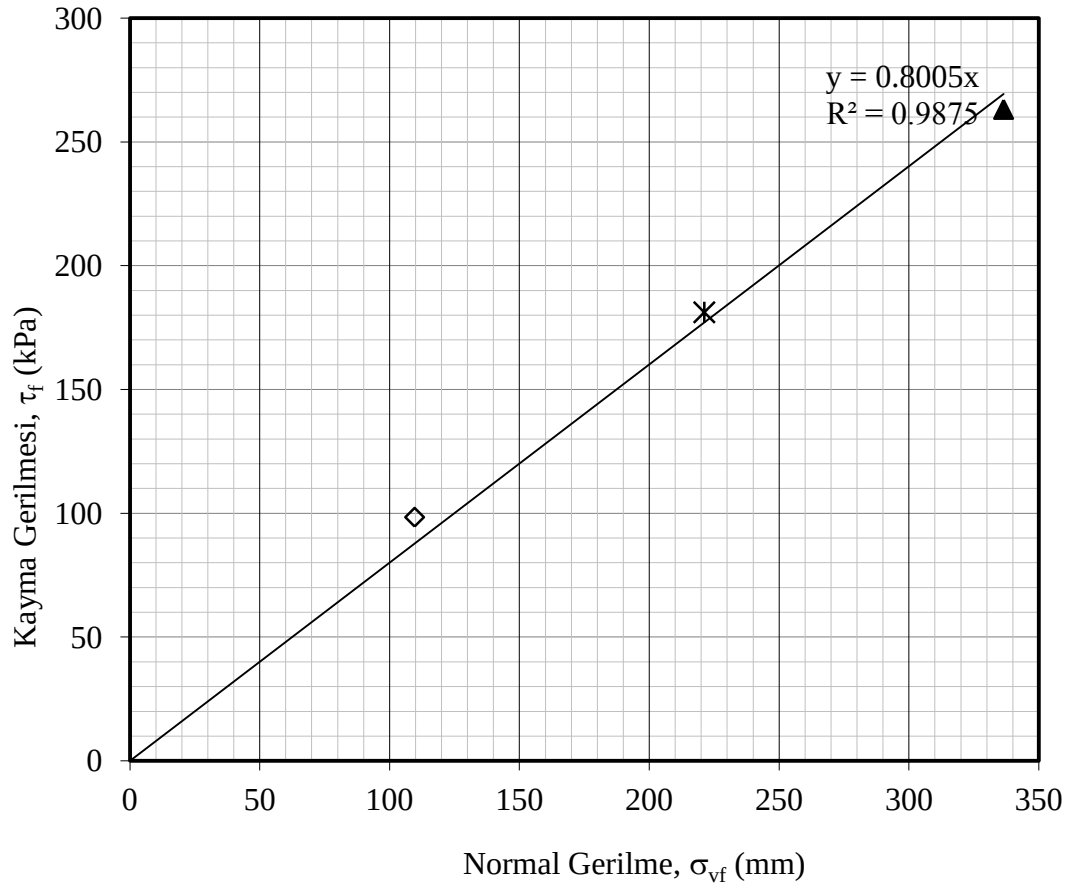
3.2.4 Numune IV (%25 CL + %75 SP)

Hazırlanan ikinci karışım numunesi %25 şile kili (CL) ve %75 Silivri kumunun (SP) karıştırılması ile elde edilmiştir. Numune hazırlanırken birinci karışımın hazırlanmasında yapılan aşamalar tekrarlanmıştır. Karışım üzerinde dane birim hacim ağırlığını belirlemek amacıyla piknometre deneyi, kompaksiyon özelliklerinin belirlemek amacıyla standart proktor deneyi ve kayma mukavemeti değerlerini elde edilmesi için ise kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Piknometre deneyinden elde edilen dane birim hacim ağırlığı 2.66 t/m^3 olarak hesaplanmıştır. Kompaksiyon deneyi sonuçları Şekil 3.15 de, kesme kutusu deneyi sonuçları ise Şekil 3.16 da gösterilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre karışımın optimum su muhtevası %11, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 19.75 kN/m^3 tür. Kesme kutusu deneyinden ise karışım numunemizin içsel sürtünme açısı 34° olarak elde edilmiştir.

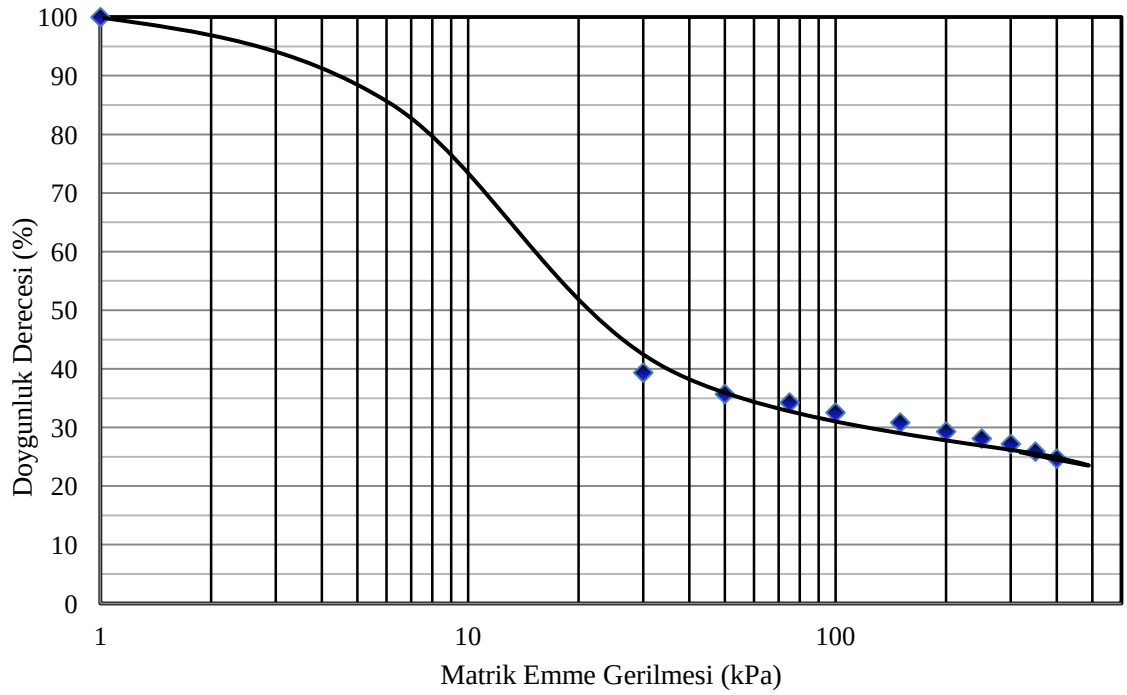
Numunenin doygun olmayan zemin mekaniği özellikleri ise ince daneli zeminlerde kullanılan basınç plakası deneyinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Deneyin yapılış prosedürü numunenin hazırlanma safhası önceki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen doygunluk derecesi matrik emme ilişkisi (SWCC) Şekil 3.16' da gösterilmektedir. Bu eğriden de anlaşılacağı üzere karışım numunesini oluşturan kil miktarı azaldıkça matrik emme basınç değerleri daha küçük doygunluk derecelerinde elde edilir.



Şekil 3.15 : Numune IV'e ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 3.16 : Numune IV'e ait kesme kutusu deney sonuçları



Şekil 3.17 : Numune IV' e ait zemin su karakteristik eğrisi

3.2.5 Numune V

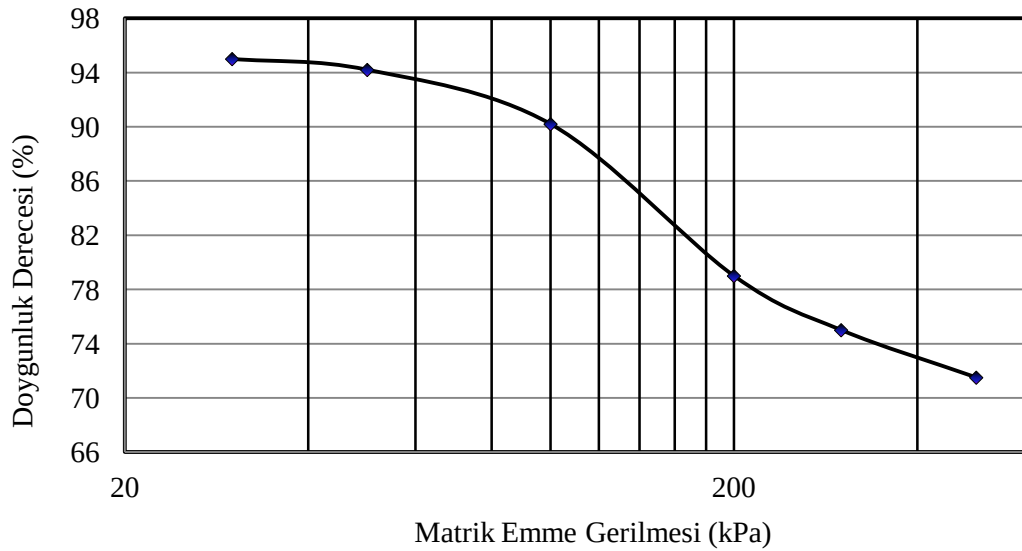
Çeşitli profiller üzerine oturan temellerin taşıma gücü davranışlarını belirlemek ve farklı zemin parametrelerini sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamalar yapan GeoStudio programında kullanmak amacı ile araştırmacılar tarafından gerekli özellikleri belirlenmiş farklı zemin türleri analizlerde kullanılmıştır. Bu zeminler Kayadelen tarafından 2005 yılında özellikleri yayınlanmış Kayapınar kili ve Havuzlubahçe siltidir. Kayadelen numune üzerinde elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri, üç eksenli basınç deneyi ve doymun olmayan zemin mekaniği özelliklerinin belirlenmesinde ise kendi tasarladığı matrik emme kontrollü ve yanal basınçların ölçülebildiği konsolidasyon deneyi yapmıştır [11]. Paket programında tasarım aşamasında kullanılabilinecek gerekli parametreler bu deney serilerinden elde edilebileceği için araştırmacının verileri kullanılmıştır. V no' lu numune Diyarbakır ilinin Kayapınar beldesinden temin edilmiştir [11]. Çizelge 3.4' te kayapınar kiline ait endeks özellikleri gösterilmiştir. Numune V dane dağılım eğrisine göre %65 kil, %30 silt ve %5 kum danelerinden oluşmaktadır. Zemin numunesi birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre sınıflandırılmış ve zeminin türü yüksek plastik kil (CH) olarak bulunmuştur. Kayadelen tarafından yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi neticesinde numune V' in efektif içsel sürtünme açısı değeri 16° dir. Numunenin efektif kohezyon değeri ise sıfırdır [11].

Çizelge 3. 4 : Numune V' e ait özellikleri [11]

<i>Numunenin Adı</i>	<i>Numune V</i>
Çakıl (%)	0
Kum (%)	5
Kil+Silt (%)	95
Likit Limit (%)	77
Plastik Limit (%)	32
USCS Göre Sınıflandırılması	CH
Dane Birim Hacim Ağırlığı (t/m^3)	2.65

Efektif İçsel Sürtünme açısı (ϕ)	16°
Efektif Kohezyon (kPa)	0

Numune V'in matrik emme basınçları geliştirilen yeni deney düzeneğinde eksen kaydırma tekniği kullanılarak belirlenmiştir [11]. Geliştirilen bu deney aleti kullanılarak elde edilen düşey efektif yükün sıfır olduğu durumdaki SWCC Şekil 3.18' de verilmektedir. Kayadelen tarafından tasarlanmış deney aletinde sükûnetteki yatay basınç değerleri ölçerken doymamış zemin mekaniği koşullarında da deney sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, aletteki ödemetre hücresi ve düşey yükleme düzeneyi ile numuneye ait konsolidasyon parametreleri hesaplanmıştır [11].



Şekil 3.18 : Numune V' e ait zemin su karakteristik eğrisi [11]

3.2.6 Numune VI

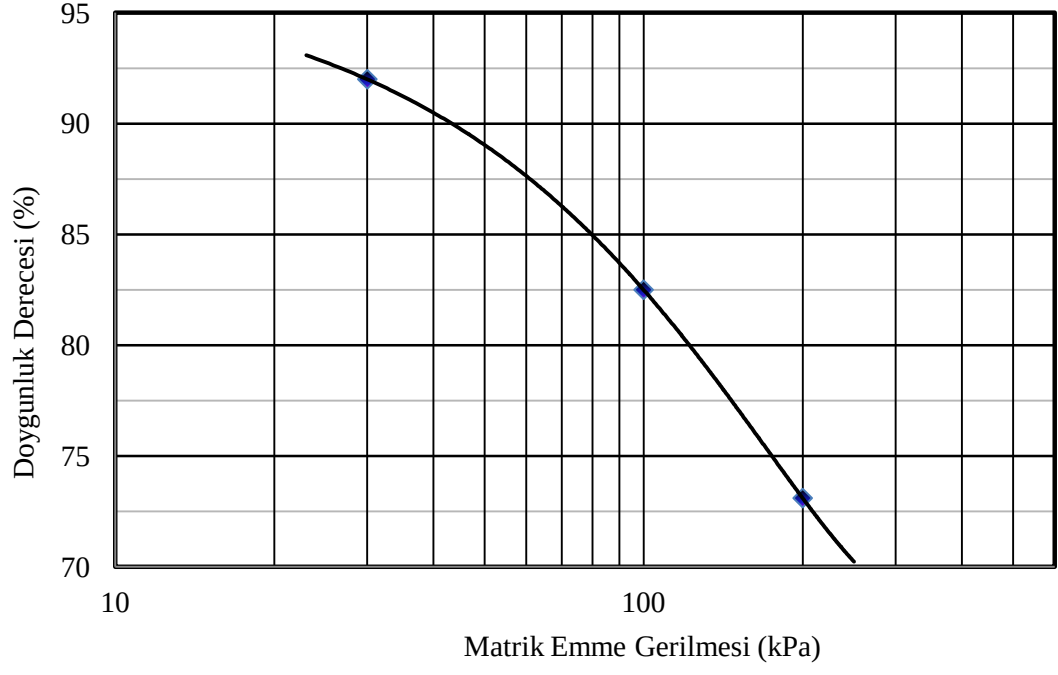
Sonlu elemanlar programında verileri kullanılan diğer bir zemin ise, özellikleri yine Kayadelen tarafından 2005 yılında belirlenmiş olan Havuzlubahçe siltidir. Havuzlubahçe silti, Adana ilinin Havuzlubahçe semtinde elde edilmiştir [11]. Zemin üzerinde tezde daha önce açıklanmış deneyler yapılmış ve gerekli parametreler belirlenmiştir. Çizelge 3.5' te havuzlubahçe siltinin endeks özellikleri verilmektedir. Kayadelen tarafından yapılan dane dağılım eğrisine göre zemin numunesi %32.8 kil, %58.2 silt ve %9 kum danelerinde oluşmaktadır. Zemin numunesi birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre sınıflandırılmış ve düşük plastik kil (CL) olarak adlandırılmıştır. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi neticesinde

numune VI' nın efektif içsel sürtünme açısı değeri 28° ve efektif kohezyon değeri ise 9.58 kPa olarak hesaplanmıştır [11].

Havuzlubahçe silti de Kayapınar kilinde olduğu gibi aynı araştırmacının tasarladığı deney aleti kullanılarak, sükûnetteki zemin basıncı koşullarında farklı düşey yükleme yapılarak yatay gerilmeler incelenmiştir. Deneyin doygun olmayan koşullarda da yapılabilmesinde dolayı matrik emme doygunluk derecesi eğrisi oluşturulmuştur. Havuzlubahçe Siltine ait matrik emme doygunluk derecesi eğrisi Şekil 3.19' de gösterilmektedir. Paket programda bu zemine ait taşıma gücü hesaplamalarında Şekil 3.19' deki eğri kullanılmıştır.

Çizelge 3. 5 : Numune VI' ya ait özellikleri [11]

<i>Numunenin Adı</i>	<i>Numune VI</i>
Çakıl (%)	0
Kum (%)	9
Kil+Silt (%)	91
Likit Limit (%)	32
Plastik Limit (%)	11
USCS Göre Sınıflandırılması	CL
Dane birim Hacim Ağırlığı (t/m^3)	2.66
Efektif İçsel Sürtünme açısı (ϕ)	28°
Efektif Kohezyon (kPa)	9.58



Şekil 3.19 : Numune VI' e ait zemin su karakteristik eğrisi [11]

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TAŞIMA GÜCÜ ANALİZİ

4.1 Giriş

Araştırmanın bu bölümünde, taşıma gücü analizlerinin yapıldığı GeoStudio Sigma-W 2007 paket programı ve programda bir modelin çözüm aşamaları hakkında genel bilgiler verilecektir. Program iki boyutta sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapmaktadır. Çalışmada farklı zemin profilleri üzerine oturan sığ temellerin doymuş ve doymuş olmayan zemin mekaniği parametreleri ile çözümü yapılmıştır. Sigma-W programı kullanılarak model çözüm yapılırken, problemin geometrisinin oluşturulması, malzeme özelliklerinin atanması, sınır koşullarının belirlenmesi ve problemin çözümü olmak üzere dört ana aşama tamamlanmalıdır. Bu aşamalar hakkında gerekli bilgiler bu bölümde sunulacaktır.

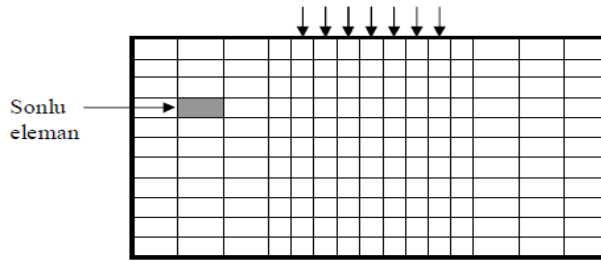
4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, çeşitli mühendislik problemleri için kabul edilebilir yaklaşımlar yapılarak, sayısal çözümlere ulaşılmasını sağlayan bir yöntemdir. İlk olarak yapı mühendisliği analizlerinde kullanılmıştır. Bu yöntemin ilk çalışmaları Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz çözümleridir [46]. Yöntemin "Sonlu Elemanlar" olarak ilk telâffuz, Clough (1960) tarafından yapılan çalışmada ortaya çıkarmaktadır. Başlangıç çalışmalarında iki boyutlu analizler için çözüm yapılırken, sonraki yıllarda yöntem geliştirilerek, üç boyutlu problemlerde de uygulanmıştır.

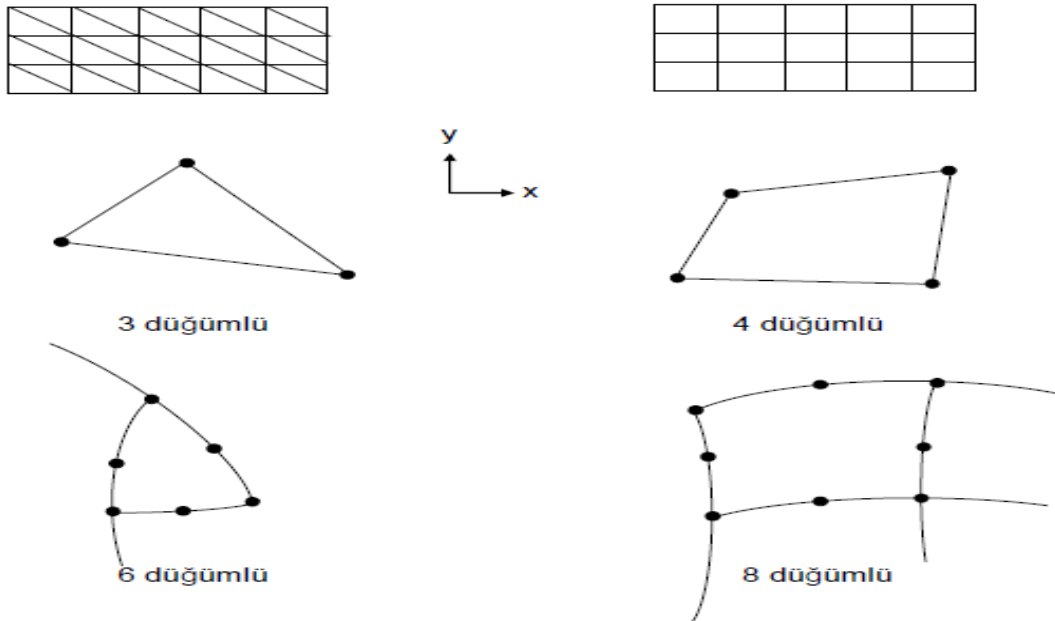
Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) karmaşık yapı sistemlerini veya mühendislik problemlerini küçük parçalar halinde modelleme fikrine dayanır. Bu uygulamalar genellikle mühendislik problemlerinde çokça kullanılır. Yönteminin ilk çalışmaya başlandığı yıllarda el ile çözüm yapılırken, günümüzde bilgisayar teknolojisinde meydana gelen hızlı gelişmeler neticesinde paket programlar kullanılarak daha karmaşık sistemlerin veya problemlerin çözümü yapılabilmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminin ana fikri; Şekil 4.1' de görüldüğü gibi, incelenecek problemi basit geometrik şekle sahip çok sayıda küçük elemana ayırmaktır. Küçük

elemanlara bölünen sistemde, denklemler bir eleman için yazılmakta ve integre edilerek sistem denklemleri elde edilmektedir [47]. Problemin çözümüne ulaşmak için ayrılmış küçük bölgelere *sonlu eleman*, bölgelerin birleşimi ise *sonlu elemanlar ağı (mesh)* olarak adlandırılır. Bir sonlu elemanlar ağını diğer bir ağa birleştiren nokta ise *düğüm noktasıdır (node)*. Elemanlar, iki veya üç boyutlu olarak seçilebilmektedir. Elemanın şekli belirlenirken, uygulanacak yükün ve yapının geometrisi dikkate alınmalı ve uygun düzlemler oluşturulmalıdır. İki boyutlu problemlerde, sonlu elemanlar üçgen, dörtgen veya yamuk şeklinde seçilerek incelenebilir. Doğum noktaları belirlenirken ise elemanın geometriksi önemli rol oynar. Eğer düzgün geometrik şekle sahip eleman inceleniyor ise, düğüm noktaları elemanın köşesine; eğrisel yüzeylere sahip eleman için ise, yüzeyin orta noktalarına yerleştirilir [47]. Şekil 4.2' de tipik iki boyutlu elemanların ve düğüm noktalarının yerleştirilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 4. 1: Bir sistemin sonlu eleman ağlarına ayrılması [48]



Şekil 4. 2 : Tipik iki boyutlu sonlu elemanlar ve düğüm noktaları [47]

4.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı

SEY, inşaat mühendisliğinde karşılaşılabilecek tüm yapıların veya yapı sistemlerinin tasarım ve analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında ise son otuz yılda kullanımı artmıştır. Geoteknik mühendisliği ilgi alanlarından; temel veya temel sistemlerinin tasarımında, şevlerin stabilite analizlerinde, geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında, zeminde oluşan yük deformasyon ilişkilerinde, zemin suyu akışlarında sıkça SEY kullanılarak, analizler yapılmaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümlen ilk problemler Zienkiewicz ve Cheung (1964) tarafından gerçekleştirilmiştir [49]. Zienkiewicz ve Cheung (1964), payandalı bir barajın temel sistemini lineer üçgen elemanları kullanarak SEY ile çözmüşlerdir. Bu uygulamanın ardından sonlu elemanlar yöntemi kazıklı temellerin, barajların, kazıların, şevlerin ve diğer geoteknik problemlerin analizleri için de uygulanmıştır.

SEY, genelde lineer-elastik özellik gösteren malzemelerde veya bu malzemelerden inşa edilmiş yapılarda sıkça uygulanmaktadır, fakat bildiği üzere zemin lineer elastik davranış gösteren bir malzeme değildir. Bu yüzden geoteknik mühendisliğinde, sonlu elemanlar yöntemi kullanılırken ek iyileştirmeler yapılmaksızın sadece kısıtlı sayıda problem çözülebilir veya doğru zemin davranışı modellenmeden gerçek sonuçların uzağında yanlış analizler yapılır.

Geoteknik mühendisliği problemleri genelde, deplasman yöntemi kullanılarak formüle edilmektedir. Şekil fonksiyonu belirlenirken, polinomlar veya seriler kullanılmaktadır. Aşağıda bir deplasman probleminin, SEY ile yapılan bir çözümü gösterilmektedir [47,49].

$$\{\delta\} = [N]\{d\}_e \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1' de $\{\delta\}$ deplasman birleşeni, $[N]$ şekil fonksiyonu ve $\{d\}_e$ ise düğüm noktasındaki deplasman değeridir.

Elemanda meydana gelen şekil değiştirmeler düğüm noktası deplasmanı cinsinden;

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\}_e \quad (4.2)$$

yazılır. Eşitlik 4.2’ de $[B]$ elemanın şekil değiştirme matrisidir. Gerilme değerleri ise $[D]$ elastisite matrisi kullanılarak Eşitlik 4.3’ deki gibi, şekil değiştirme fonksiyonu ile ilişkilendirilmiştir.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (4.3)$$

Bir sonraki adımda problemin çözümünde uygulanacak uygun bir varsayım geliştirilip (enerjinin minimum olması prensibi vb.) her bir düğüm noktasındaki değerler için bir denklem takımı elde edilir [47] (Eşitlik 4.4):

$$\{f\} = [k]\{d\}_e \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.4’ de $\{f\}$ eleman yük vektörü, $[k]$ da eleman rijitlik matrisidir. Yapılan bu işlemler her sonlu eleman için tekrarlanır ve uygun şekilde integre edilerek tüm sistem için sonuca ulaşılır. Eşitlik 4.5’ de tüm sisteme ait çözüm gösterilmiştir.

$$\{F\} = [K]\{d\}_e \quad (4.5)$$

Eşitlikte;

$\{F\}$: sistem yük vektörü

$[K]$: sistem rijitlik matrisi

$\{d\}$: sistem deplasman vektörüdür.

Bu sisteme sınır koşulları uygun satır/sütun işlemleri uygulanır ve indirgenmiş sistem elde edilir [47].

4.4 GeoStudio Paket Programı

GeoStudio, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan, farklı geoteknik problemleri için bünyesinde farklı analiz kısımları bulunduran (SLOPE/W, SIGMA/W; SEEP/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W, VADOSE/W) bir bilgisayar programıdır. Zemin ortamında meydana gelen deformasyon, stabilite, zemin suyu akışı, deprem etkileri vb. analizleri için çözüm yapabilmektedir.

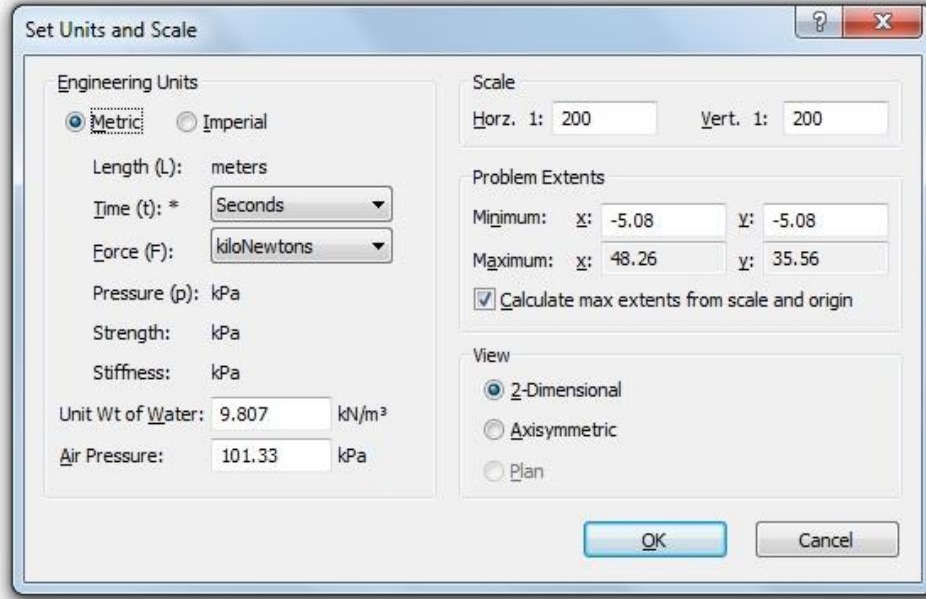
Programın kodları ilk olarak 1977 yılında Profesör D.G. Frendlung tarafından Saskatchewan Üniversitesinde şev stabilite problemlerini çözebilmek için yazılmıştır. İlk ticari versiyonları bilgisayar teknolojisinin gelişmemesinden dolayı sadece sınırlı sayıda kullanılmıştır. 1980’li yıllarda kişisel bilgisayar sayısının artması, bilgisayar fiyatlarındaki düşüş ve bilgisayarlardaki bellek problemi yüzünden programda düzenlemeler yapılmıştır. 1983 yılında kodları tekrar yazılmış ve PC-SLOPE ismiyle piyasaya sunulmuştur. Seksenli yılların sonunda bilgisayar teknolojisinde kullanıcıya daha iyi görsellik sunan CAD (Computer Aided Design) sistemleri yerini almıştır. Program da bu yeniliği takip etmiş ve Microsoft işletim sistemi ile uyumlu çalışacak versiyonu üretilip, tekrar isimlendirilerek SLOPE/W ismi ile satışı başlatılmıştır. Sonraki yıllarda programın, farklı geoteknik uygulamalarında da kullanılabilmesi için, analiz kısımlarına ayrılmış ve paket program genel bir isimle GeoStudio olarak piyasaya sunulmuştur [50].

Günümüzde program geniş bir kullanıcı yelpazesi içerisinde geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında ihtiyaç duyulan; zemin-yapı etkileşimi, gerilme – şekil değiştirme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zeminde sıcaklık değişimi ve zemin dinamiği konularında kullanılmaktadır. Programdan elde edilen sonuçlar pratikte kullanılabilecek değerler vermektedir.

Bu çalışmada, GeoStudio versiyon 7’ de yer alan ve yük-deformasyon analizleri yapan SIGMA/W kullanılmıştır. Program hem başlangıç seviyesinde hem de karmaşık uygulamalarda çözüm yapılabilmektedir. SIGMA/W, zemindeki gerilmeleri, farklı yüklemelerin zeminde meydana getirdiği gerilme değişimlerini, bu gerilmelerden kaynaklanan oturmaları ve benzeri analizleri yapabilmektedir. Ayrıca, yüklemeler neticesinde zemindeki boşluk suyu basıncı değişimlerini, kademeli olarak yapılacak inşa sistemlerinin (kazı, dolgu, iksa vb.) çözümlerini ve zemin yapı ilişkisini de incelenmektedir [51].

4.5 GeoStudio SIGMA/W Paket Programı Kullanılarak Modelin Oluşturulması

DeneySEL çalışmalardan elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak, farklı zemin profilleri üzerine oturan sığ temellerin, hem doygun hem de doygun olmayan koşullarda taşıma gücü analizi modellenmiştir. SIGMA/W programı kullanılarak modellerin oluşturulması ve bu modellerin çözümü sırasında izlenecek adımlar maddeler halinde ana hatları ile aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 4. 4 : <Set Unit and Scale> komutu ile yapılacak işlemler

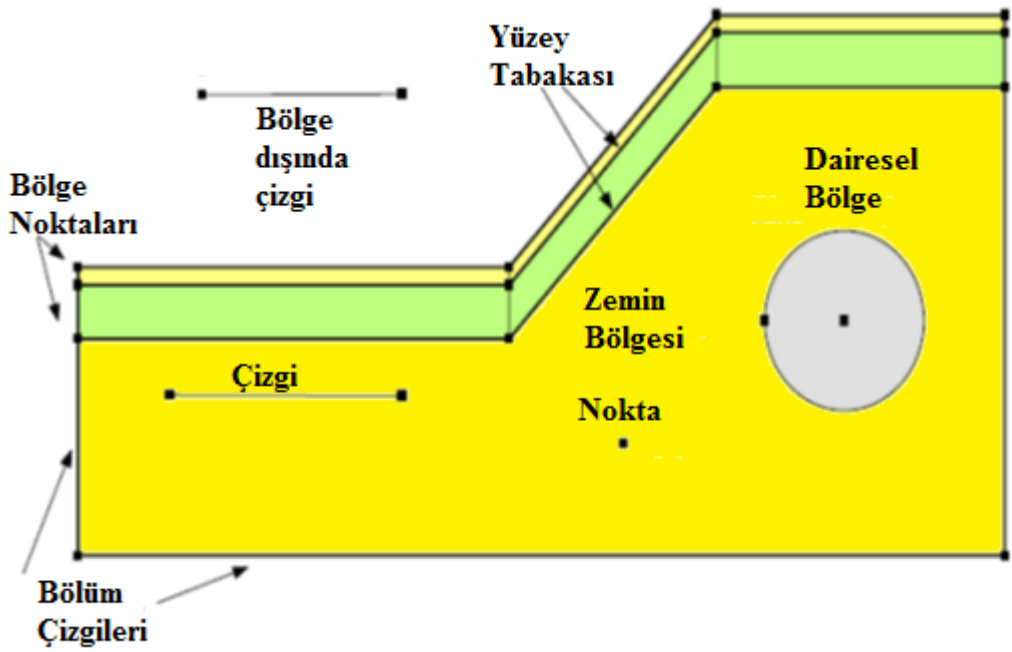
Programda, incelenecek problem tipine göre düzlem şekil değiştirme veya eksenel simetrik geometri idealizasyonları dikkate alınabilmektedir. Modellerde tank problemi için eksen simetrik, şerit temel problemi için ise düzlem şekil değiştirme durumu seçilmiştir.

Modellemeye başlamadan önce yukarıda gösterilen ayarların yapılması şarttır. Şayet, <set> komutu altında yer alan seçenekleri incelenecek probleme göre düzenlenmez ise, alınacak sonuçlar gerçek problemin davranışını yansıtmaz.

İlk ayarlamalardan sonra <sketch> komutu kullanılarak modelin geometrisi oluşturulur. Bu aşamada GeoStudio programı içerisinde yer alan farklı geometrik şekiller kullanılabilir. Şekil 4.5' de GeoStudio programında yer alan bütün geometrik objeler ile oluşturulmuş bir model gösterilmektedir [51]. Şekilden de anlaşılacağı üzere program nokta, çizgi, daire, eğri ve eksen çizgilerini oluşturan geometrik objelere sahiptir.

Modelde <Sketch> menüsü kullanılarak oluşturulan geometri, <Draw> menüsü altında yer alan komutlar ile bölgeler veya farklı geometrik yapılar (çizgi, nokta vb. gibi) olarak atanmadan tamamlanmaz. Bu yüzden <Sketch> menüsü kullanılarak oluşturulmuş modeller, <Draw> menüsü kullanılarak tanımlanırlar. Tamamlanmış modelde profilin oluşturduğu bölgeler <Modify> menüsündeki <Objects> komutu kullanılarak kontrol edilebilir. Paket programlarda, modelin geometrisini

oluşturmak çok önemli olsa da, model için doğru malzeme özelliklerini atamak, gerçekçi sonuçlar almak için şarttır.



Şekil 4. 5 : Programda var olan geometrik objeler [51]

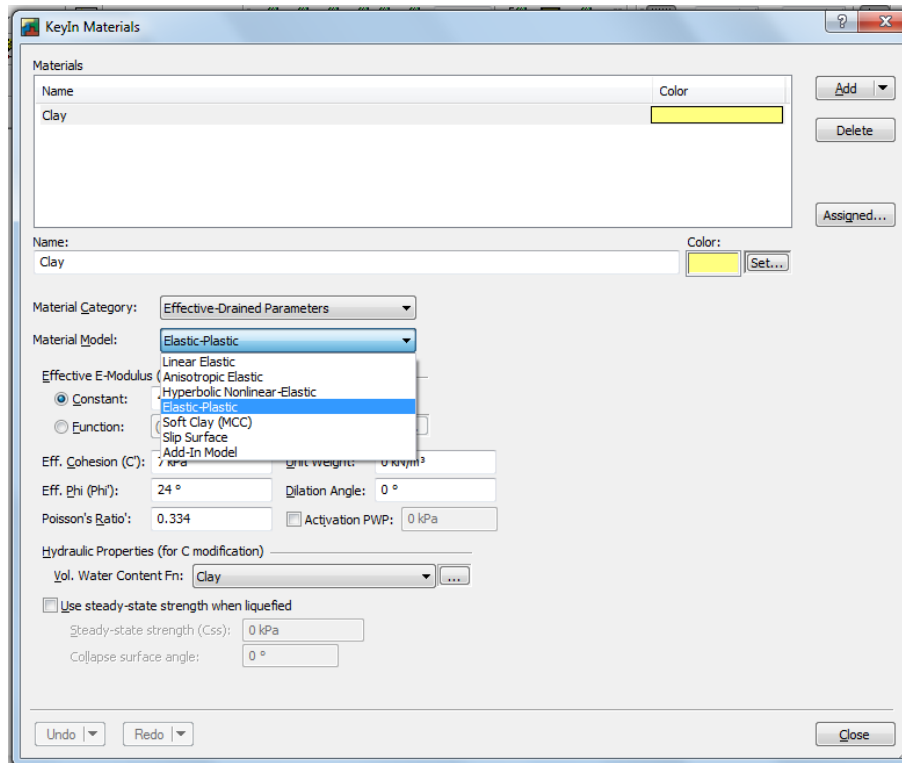
4.5.2 Malzeme özelliklerinin tanımlanması

Malzeme bünye modelleri, yük etkisi altındaki bir malzemede meydana gelecek gerilmeler ve deformasyonlar arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Sayısal model çalışmalarında, malzeme özelliklerinin programa atanması ile zemin elemanının davranışı incelenir. Bu araştırmada oluşturulan modellerde kullanılan malzeme ve mukavemet özellikleri bölüm üçte açıklanmış deneylerden elde edilen parametrelerdir. Sayısal model çalışmalarında, doğru malzeme özelliklerinin kullanılması önem teşkil etmektedir. Fiziksel modellerde, zemin doğal koşullarında incelendiği için malzeme özellikleri kendiliğinden sağlanır, fakat sayısal modellemelerde, böyle bir şansımız yoktur. Bu yüzden, kullanıcı analizlerinin sonuçlarını yayınlamadan önce deney sonuçlarının doğruluğuna güvenmelidir.

GeoStudio SIGMA/W programının bünyesinde altı farklı malzeme modeli ve kendi zemin modelini oluşturma seçeneği mevcuttur. Malzeme modelinin yapılacak analizi tamamen etkilemektedir. Bu yüzden zemin mekaniği problemlerine hâkim olmayan kişilerin sadece programda çözüm elde etmek için yapacağı analizler yanlış sonuçları doğurmaktadır. Malzeme modelinin seçimi yapılırken: incelenene malzeme rijitliğine, müsaade edilebilir oturmalara ve zeminin stabilitesine dikkat edilmelidir.

Programda Lineer Elastik, Anizotrop Elastik, Hiperbolik Elastik, Elastik Plastik, Yumuşak Kil ve Şev Yüzeyi olmak üzere altı farklı zemin modeli mevcuttur. Bünyesindeki modellere ek olarak, istenilen zemin modelinizi atama seçeneği de farklı zemin türleri üzerinde çalışan kullanıcılara yardımcı olmaktadır. Tezde analizler için lineer elastik ve elastik plastik zemin modelleri kullanılmıştır. Zemin ortamında lineer elastik model çok güvenilir sonuçlar vermese de zemin profilinin başlangıç gerilmelerini hesaplamak için tercih edilmiştir. Ayrıca deformasyonların küçük miktarda olduğu yükleme koşullarında, eğer oturmalar problem yaratmıyor ise, lineer elastik analizler yeterli sonuçlar vermektedir [51].

Malzeme özellikleri tanımlanırken <Draw> menüsünden <Materials> komutu kullanılır. Buradan <KeyIn> seçeneği ile istenilen malzeme modeli ve malzemede yapılacak analiz türü seçilir. Şekil 4.6’ da malzeme atanması işleminin yapıldığı komut kutusu gösterilmiştir.



Şekil 4. 6 : Malzeme modeli ve malzeme özelliklerinin atanması

4.5.2.1 Lineer Elastik model (LE)

Zemin davranışının modellenenebilmesi için son derece yetersiz olan Lineer Elastik (LE) malzeme modeli, genelde zemin içerisinde yer alan yapı elemanlarının modellenmesinde kullanılmaktadır. Model Hooke yasası olarak da bilinen lineer,

izotrop, elastik gerilme-deformasyon davranışına dayanmaktadır. LE zemin modelinde iki adet rijitlik parametresine: elastisite modülü(E) ve poisson oranı(ν) ihtiyaç duyulur. Ayrıca, zeminin birim hacim ağırlığı değeri de programa girilebilecek bir parametredir.

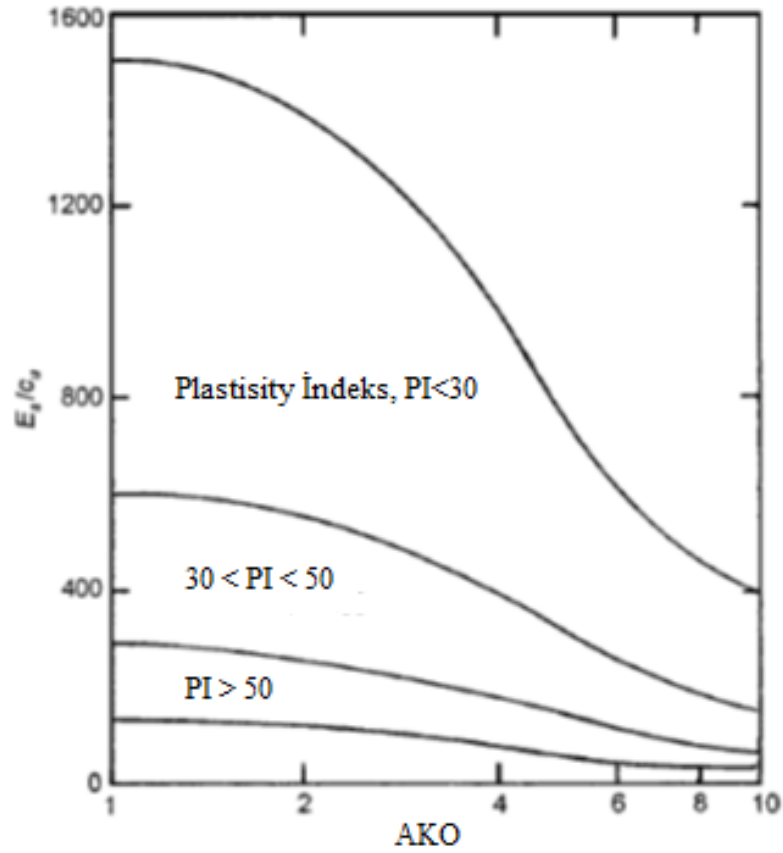
Lineer elastik modellerde, modelinin analiz sonuçlarını etkileyen ana parametreler elastisite modülü ve poisson oranıdır. Yapılan analizlerde zemin ortamında saptanması pek de kolay olmayan bu parametreler Çizelge 4.1, 4.2 ve Şekil 4.7 kullanılarak elde edilebilmektedir. Zemine ait elastisite modülü ve poisson oranı genelde arazi deneyleri kullanılarak saptanmaktadır. Ayrıca, farklı kesme kutusu deney türlerinden ve üç eksenli deney sonuçlarından da bu parametreler hesaplanabilir.

Çizelge 4. 1 : Kumlar için elastisite modülü aralıkları [31]

<i>Zemin Türü</i>	<i>Elastisite Modülü, E_s (kN/m²)</i>
<i>Çakıllı Kum – Kumlu Çakıl</i>	
Gevşek	50,000 – 150,000
Sıkı	100,000 – 200,000
<i>Lös Kum</i>	
Sitli	5,000 – 20,000
Gevşek	10,000 – 25,000
Sıkı	50,000 – 81,000
<i>Kil</i>	
Çok Yumuşak	2,000 – 15,000
Yumuşak	5,000 – 25,000
Orta	15,000 – 50,000
Katı	50,000 – 100,000
Kumlu	25,000 – 250,000

Çizelge 4. 2 : Farklı Zeminlere ait Poisson Değerleri Aralıkları [31]

<i>Zemin Türü</i>	<i>Poisson Oranı</i>
Doygun Kil	0.4 – 0.5
Doymamış Kil	0.1 – 0.3
Kumlu Kil	0.2 – 0.3
Silt	0.30 – 0.35
Kum	0.3 -0.4
Kaya	0.1 – 0.4
Lös	0.1 – 0.3



Şekil 4. 7 : Killi zeminlerde drenajsız kayma mukavemetine ve plastisite indisine göre elastisite modülü değerleri [52]

4.5.2.2 Elastik plastik model (MC)

Zeminin elasto-plastik davranış gösterdiğini kabul eden modeldir. Mohr-Coulomb zemin modeli olarak da bilinir.

Malzeme modellerini tanımlamada kullanılan parametre sayısının artması, davranışın modellenmesinde ki çok yönlülüğü göstermektedir [49]. Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin davranışı, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) diye isimlendirilen iki farklı parametre kullanılarak analiz edilmektedir. Bu iki parametrenin göçme kriterini tanımlaması ve laboratuvar deneyleri ile kolaylıkla elde edilmesi Mohr-Coulomb gibi izotropik modellerin kullanılmasının yeterli doğrulukta sonuçlar verdiğini göstermektedir [51].

Elastik-Plastik zemin modelinde programın işlem yapabilmesi için elastisite modülü(E), poisson oranı(n), kohezyon(c), içsel sürtünme açısı(ϕ), dilatasyon açısı(γ) ve zeminin birim hacim ağırlığı(γ) girilmelidir. Ayrıca modelde, K_0 değeri atanarak veya otomatik olarak poisson oranından hesaplanarak zemin ortamında meydana gelecek yatay gerilme durumları da analiz edilebilmektedir.

Doymun olmayan koşullarda yapılacak analizler için elastik plastik zemin modeli kullanılmıştır. SWCC kullanarak efektif gerilme değişiminin göz önünde bulundurulduğu analizlerde, negatif boşluk suyu basıncının etkileri elastik plastik model kullanılarak analiz edilmektedir. Program, doymamış koşuldaki analizler için Vanapalli'nin 1996 yılında yaptığı çalışmadan yararlanmaktadır. Doymamış durumdaki analizler için zemine ait SWCC gereklidir. Bu eğri kullanıcı tarafında deney verilerinden girilebileceği gibi programda mevcut olan VanGeneuchten veya Fredlung Xing SWCC yaklaşımlarından birisi kullanılarak da girilebilir. Program Vanapalli'nin yaklaşımını kullanarak zemine ait kohezyon değerine SWCC üzerindeki verileri yardım ile eklemeler yapmaktadır.

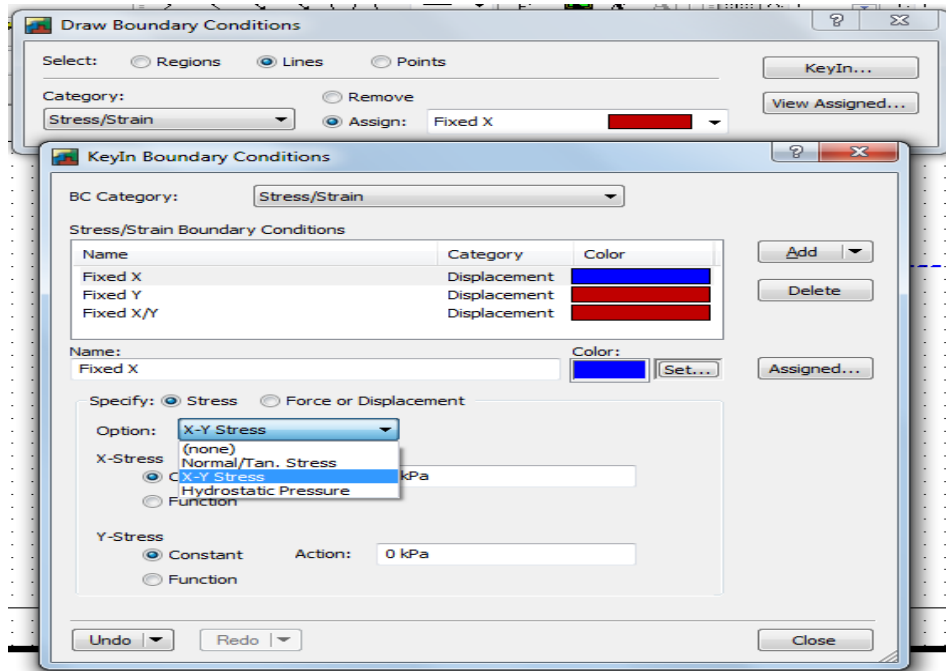
Bu araştırmada doymamış zeminler için yapılan taşıma gücü analizlerinde, Numune I, III ve IV' e ait SWCC VanGenuchten yöntemine göre düzeltilip kullanılmıştır. Analizlerde laboratuvar deneylerinden elde edilen SWCC Numune II, V ve IV' e ait modellerde doğrudan kullanılmıştır. Bunun sebebi; özellikle killi zeminlerde matrik emme değeri rezidüel su muhtevasına değerine ulaşmadan deneyin sona ermesidir. Killi zeminlerde rezidüel su muhtevası değeri 10^5 kPa değerine kadar

ulaşabilmektedir. Laboratuarda SWCC elde edebilmek için kullanılan basınç plakası deneyinde ise maksimum 500 kPa değerinde matrik emme basıncı uygulanmıştır.

4.5.3 Sınır koşulları

GeoStudio programında farklı sınır koşulları oluşturma seçenekleri mevcuttur. Örneğin, zemin suyu akışı için yapılan bir analizde suyun akışına izin vermeme veya moment içeren bir analizde dönme oluşmaması gibi tercihler programın menüsünde yer almaktadır. Ayrıca kullanıcı kendi modeli için farklı sınır koşulları da oluşturabilmektedir. Taşıma gücü analizleri için oluşturulan modellerde standart sınır koşulları uygulanmıştır. Standart sınır koşullarında, geometrik modelin tabanında hem düşey hem yatay deplasmanlar engellenmekte ($u_x=0$, $u_y=0$), geometrik modelin kenarlarında ise, sadece düşey harekete izin verilmektedir ($u_x=0$, $u_y=\text{serbest}$). Zemin yüzeyinde ise her türlü serbestliğe izin verilmiştir.

Programda sınır koşulları oluşturulurken malzeme atama işleminde olduğu gibi <Draw> menüsüne girilir. Bu sefer <Draw Boundry Conditions> komutu seçilir ve sınır şartları oluşturulur. Şekil 4.8' de programda sınır koşullarının oluşturulmasını sağlayan komut menüsü gösterilmiştir. Menünün üst kısmı sınır koşullarının profilde atanması işlemini gerçekleştirirken, alt kısmı ise sınır koşullarına ait ayarları yapmaktadır. İstendiği takdirde analiz için farklı sınır koşulları da oluşturulabilir.



Şekil 4.8 : Sınır koşullarının oluşturulması

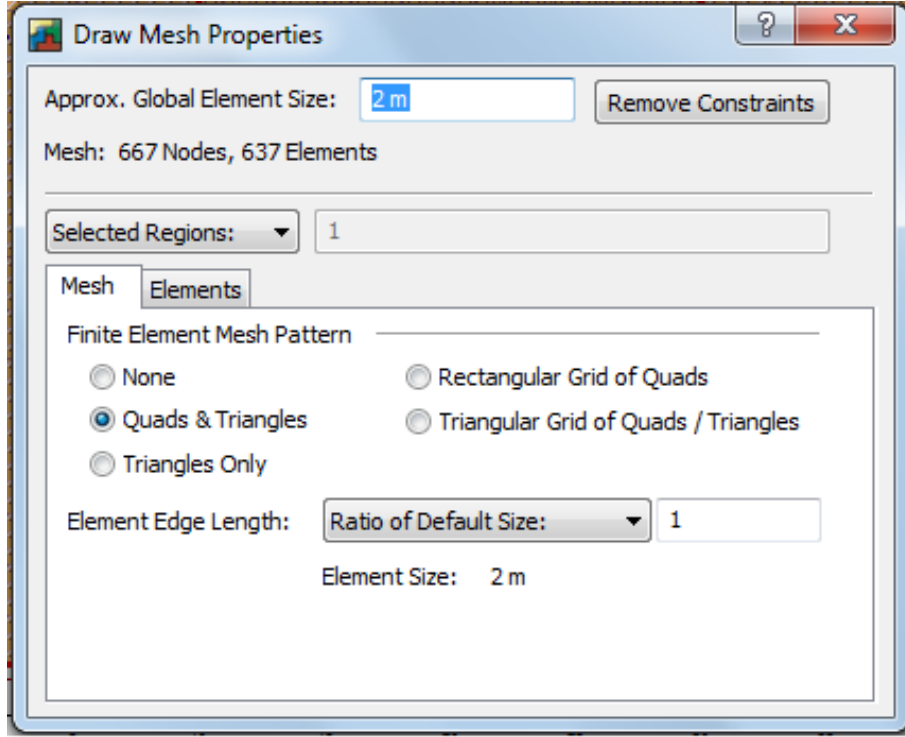
4.5.4 Yükün uygulanması

Programda - uygulanabilecek yükleme tipleri; yatay düzleme etkiyen yayılı veya noktasal yük, düşey düzleme etkiyen yayılı veya noktasal yük şeklindedir. Tekil yük, sadece, mevcut geometrik doğrulara ve yapısal nesnelere uygulanabilmektedir. Ayrıca yk yerine programa deplasman verilerek de analizler yapılabilir. Herhangi bir noktaya yükleme yapmak için noktanın eleman olarak tanımlanmış olması gerekir. Yükleme işlemi sınır koşulu menüsünden yüklemenin yn, şiddeti ve eksenini belirlenerek yapılır. İstenen yükleme tek bir kademede yükleneceği gibi belirli miktarda artırılarak kademeli olarak da uygulanabilir. Bu araştırmada yükün uygulanması kademeli olarak yapılmıştır. Her bir analizde kullanılan yük veya deplasman değerleri ileriki bölümlerde verilecektir.

4.5.5 Sonlu eleman ağının oluşturulması

Program menüsünde, sonlu elemanlar ağına ayırma işlemi otomatik olarak yapılabileceği gibi, kullanıcı istediği aę seğeneğini manüel olarak oluşturabilir. Bu zellik sayesinde istenilen bölgelerde aę sıkılaştırılması yapılarak daha hassas sonuçlara ulaşılabilmektedir. Bu tarz paket programlar da, sonlu eleman ağı belirlenirken, sonuçların etkilenmediği en uygun aę yapısı (mesh) araştırılmalıdır. Bu amaçla, analiz modelleri üzerinde farklı mesh durumları göz önüne alınarak bir seri analiz gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman ağı oluşturulurken elemanların boyutları ve geometrik şekilleri ayarlanabilmektedir. Programda sadece üçgen, sadece dikdörtgen ve sadece yamuk elemanlara ayrılmış mesh seçenekleri mevcut olduğu gibi bu eleman şekillerin ortaklaşa kullanıldığı aę seçenekleri de mevcuttur. Analiz yapılırken sonuçların daha iyi elde edilmesi amaçıyla en iyi sonlu elemanlar ağının karma yapıda olacağı gözlemlenmiş ve bu mesh yapısı kullanılmıştır. Ayrıca, temel altında daha kesin sonuçlar elde edebilmek için eleman boyutları daha kk seçilmiştir.

Sonlu eleman ağı oluşturmak için yine <Draw> menüsünden yararlanılır. <Draw> menüsünde yer alan komutlardan <Draw Mesh Properties> seçeneği seçilerek, aę özellikleri oluşrulur. Şekil 4.9’ da sonlu elemanlar ağının oluşturulmasını sağlayan komut kutusu gösterilmektedir.



Şekil 4. 9 : Sonlu eleman ağının(mesh) oluşturulması

4.5.6 Modelin çözümü

Analizlerin yapılabilmesi için gerekli adımlar (profilin oluşturulması, malzeme atanması, sınır koşullarının tanımlanması, sonlu elemanlar ağının belirlenmesi ve yükün uygulanması) tamamlandıktan sonra modelin çözüm işlemine geçilir. Analizlerin sonuçları bu aşamada elde edilir. Yapılmış olan modelin eksiklikleri veya yanlışlıkları, sonuçlar kullanılarak belirlenebilir. Gerekli düzenlemeler yapılmaz ise programdan alınan yanlış sonuçların tasarım aşamasında kullanılacağı gerçeği unutulmayıp, her zaman sayısal modellerde çözümlerin sonuçlarının gözden geçirilmesi şarttır.

GeoStudio paket programında modelin çözümü yapılırken, öncelikle oluşturulan modeldeki noksanlıklar veya hatalar belirlenir. Bu işlem, <Tools> menüsü altında yer alan <Verify/Optimize Data> komutu kullanılarak tamamlanır. Eğer oluşturduğunuz modelde hatalar mevcut ise, bir sonraki aşama olan çözüm işlemine hatalar düzeltilmeden geçilemez. Hataların ayıklanmasından sonra çözüm işlemi yine <Tools> menüsünde yer alan <Solve Analyses> komutu kullanılarak yapılır. Program, sonuçları farklı parametreleri ve görsel öğeleri kullanarak sunar. Kullanıcı istediği tasarım değerlerini bu öğelerden elde edebilir.

5. TAŞIMA GÜCÜ ANALİZİ SONUÇLARI

GeoStudio SIGMA/W paket programı ile deneysel çalışmadan elde edilen zemin özellikleri kullanılarak taşıma gücü analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlar zeminde meydana gelen ek gerilmeler ve oturmalar olarak ifade edilmiş ve bölüm ikide değinilen zemin kırılma mekanizmaları göz önünde bulundurularak, her bir modele ait nihai taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır.

Yapılan analizlerde, üç farklı zemin modeli oluşturulmuştur. Bunlar: zemin davranışının elastik-plastik (Mohr-Coulomb) düşünüldüğü tamamen kuru model, zeminin elastik-plastik (Mohr-Coulomb) düşünüldüğü tamamen doymuş model ve zeminin elastik-plastik (Mohr-Coulomb) davranış gösterdiği fakat doymuş olmayan parametrelerin kullanıldığı yeraltı su seviyesi değişken kısmi doymuş zemin modelleridir.

Üç farklı zemin modeli iki farklı temel tipi düşünülerek analiz edilmiştir. İki boyutta analiz yapabilen paket programda, eksenel simetrik olarak modellenen dairesel temel ve düzlem şekil değiştirme olarak tasarlanmış şerit temel incelenmiştir.

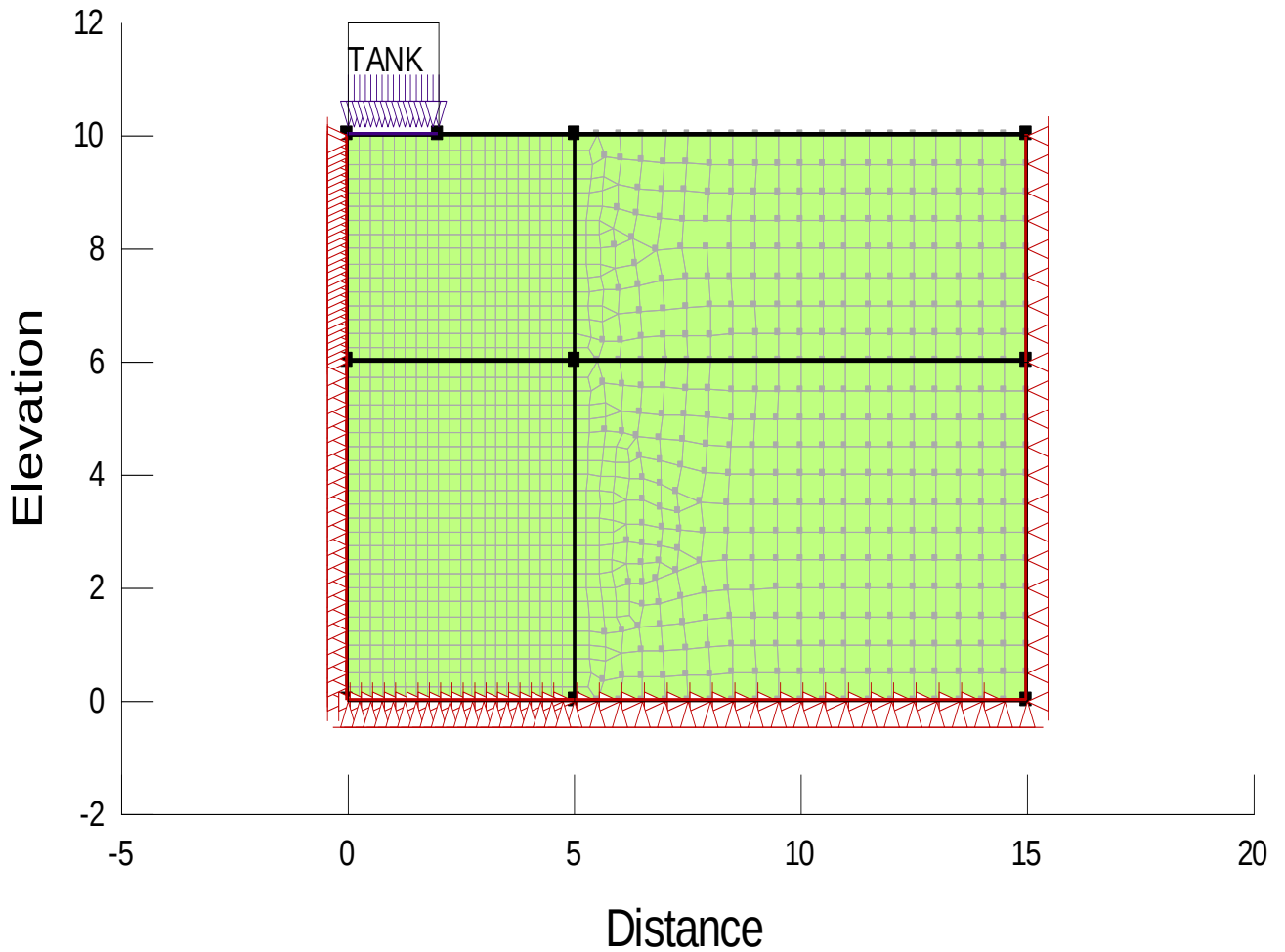
Modellerde taşıma gücü hesaplanırken temel tabanı altında yükleme sonucunda oluşan gerilme oturma grafikleri kullanılmıştır. Bu grafiklerde taşıma gücü değerleri eğer modelde göçme olmamış ise 5cm oturmanın meydana geldiği taban basıncı değeri, 5 cm değerinden önce göçme meydana geliyor ise gerilme oturma grafiğinin maksimum noktası alınarak belirlenmiştir.

5.1 Tamamen Kuru Zeminde Modellerin Taşıma Gücü

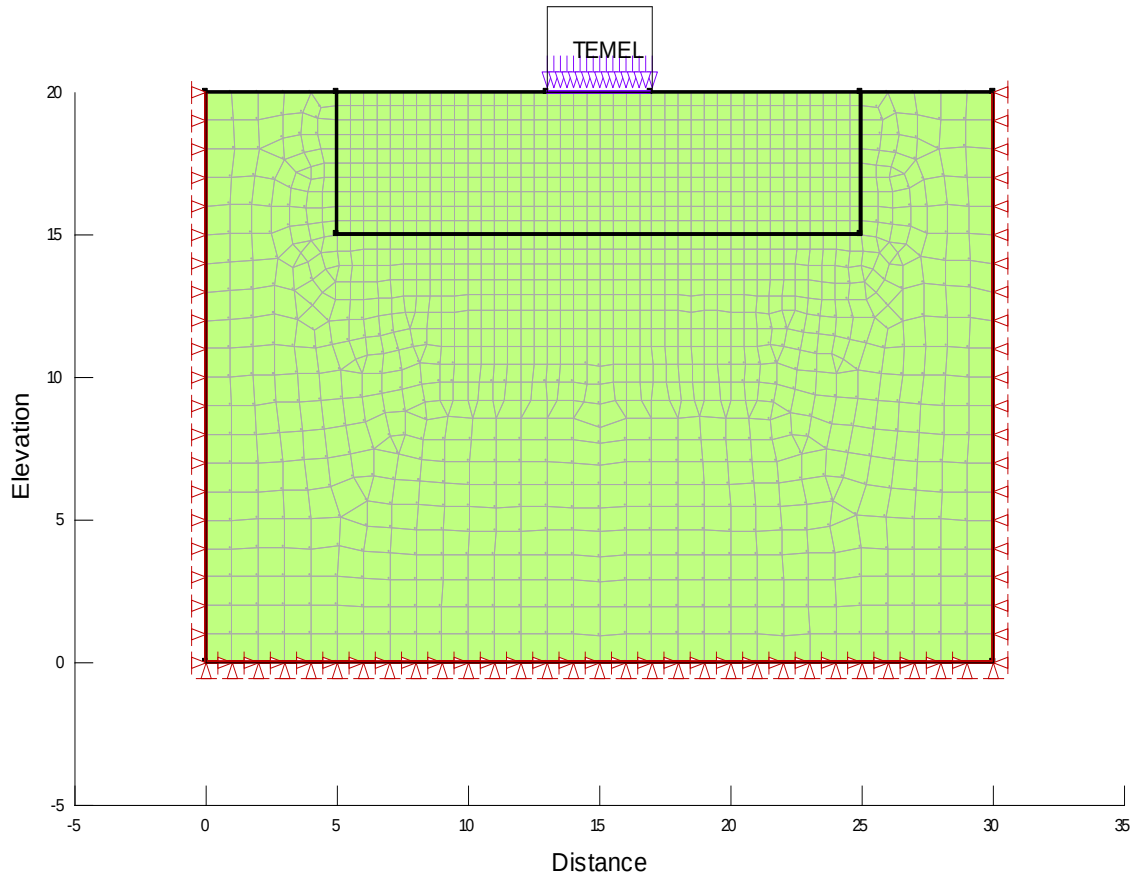
Altı farklı numune özellikleri kullanılarak tamamen kuru durumdaki taşıma gücü analizleri incelenmiştir. Analizlerde, yükleme yapılmadan önceki koşullar tanımlanırken (doğal gerilme durumu, insitu stresses) lineer elastik zemin modeli kullanılmıştır. Bu yüzden, sadece üç parametreye (Elastisite modülü, Poisson oranı ve birim hacim ağırlığı) bağlı olarak çözümler elde edilir. Analiz kademeli olarak yürütülmüştür. Öncelikle lineer elastik model kullanılarak zeminin doğal gerilmeleri

(başlangıç toplam gerilme ve efektif gerilme) hesaplanmış, sonrasında ise elastik plastik model kullanılarak temelin yüklenmesi sağlanmıştır. Temel yükleme işlemi, temelin oturduğu bölgede zemine düşey yer vererek tanımlanmıştır. Temel altında bu yer değiştirmeden kaynaklı taban basıncı oluşur. Düşey yer değiştirme miktarı tek bir aşamada değil kademeli olarak verilmiştir. Analizlerde, yer değiştirme 15 kademe halinde tanımlanarak gerilme değerleri elde edilir. Modellerde kullanılan zemin profilleri ve temel geometrileri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 ‘de gösterilmektedir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’ de gösterilen model geometrileri tüm analizlerde sabittir. Sadece malzeme türü, analiz türü ve sınır koşulları değiştirilmiştir. Analizlerde kullanılan elastisite modülü ve poisson oranı değerleri laboratuvar deneyleri sonuçlarına göre Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Şekil 4.7 kullanılarak belirlenir. Elastik plastik analizlerde zeminin mukavemet parametreleri de kullanılır. Bu değerler kesme kutusu deneyi sonuçlarından elde edilir. Modellerde kullanılan zeminlere ait tasarım değerler Çizelge 5.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 5. 1 : Dairesel temele ait modelin geometrisi



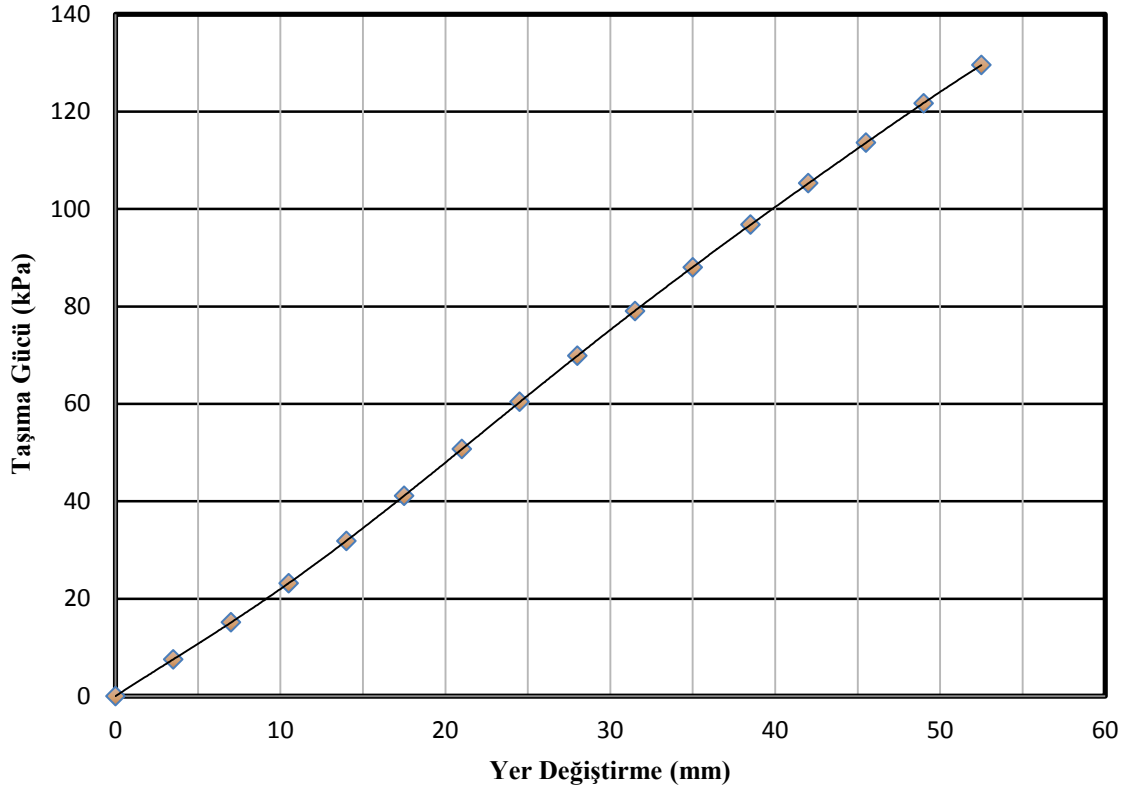
Şekil 5. 2 : Şerit temele ait modelin geometrisi

Çizelge 5. 1 : Zemin numunelerine ait Elastik-Plastik modeller için kullanılan program girdileri

<i>Numune No</i>	<i>ϕ' (°)</i>	<i>c' (kPa)</i>	<i>γ_n (kN/m³)</i>	<i>E_s (kPa)</i>	<i>ν</i>
I	24	7	19	8,000	0.4
II	42	0	19	25,000	0,275
III	29	0	19	15,000	0,33
IV	39	0	19	10,000	0,35
V	16	0	19	12,000	0,45
VI	28	10	19	16,000	0,375

Bu araştırmada Çizelge 5.1’ de görüldüğü gibi incelenen zeminlerin birim hacim ağırlıkları eşit ve 19 kN/m³ olarak seçilmiştir. Dairesel temel altında I no’ lu

numuneye ait yük deformasyon grafiği Şekil 5.3’ de verilmektedir. Bu modelde yük 15 kademede ve her kademede 0.0035 m göçme verilerek uygulanmıştır. Yükleme sonucunda zeminde plaka yükleme deneyini andıran bir gerilme yerdeğiştirme grafiği elde edilmiştir. Bu grafikten 5 cm oturmaya müsaade edilen sınır (nihai) taşıma gücü değeri kuru durumda 123 kPa olarak hesaplanmıştır. Grafikten de anlaşılacağı üzere zeminde henüz göçme oluşmamıştır.

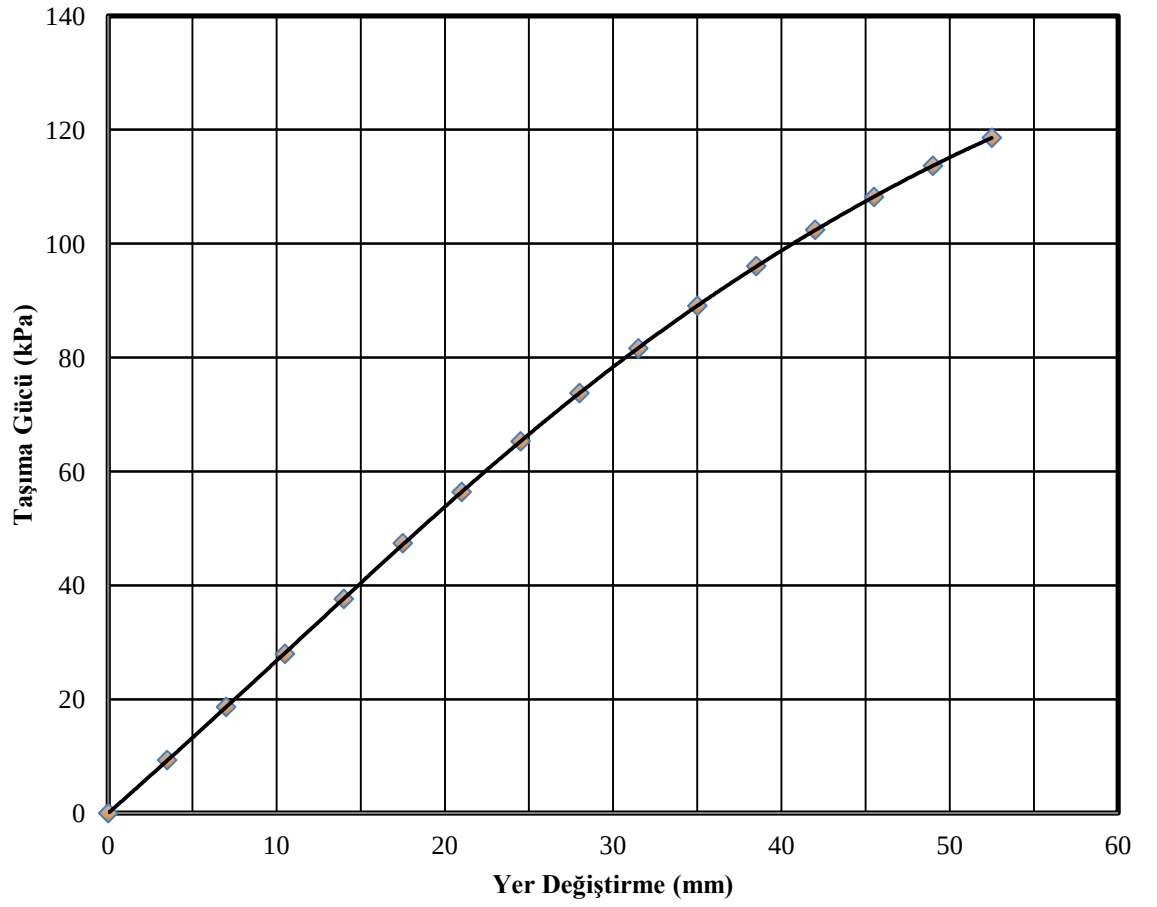


Şekil 5. 3 : Tamamen kuru dairesel modelde Numune I'e ait gerilme & yer değiştirme grafiği

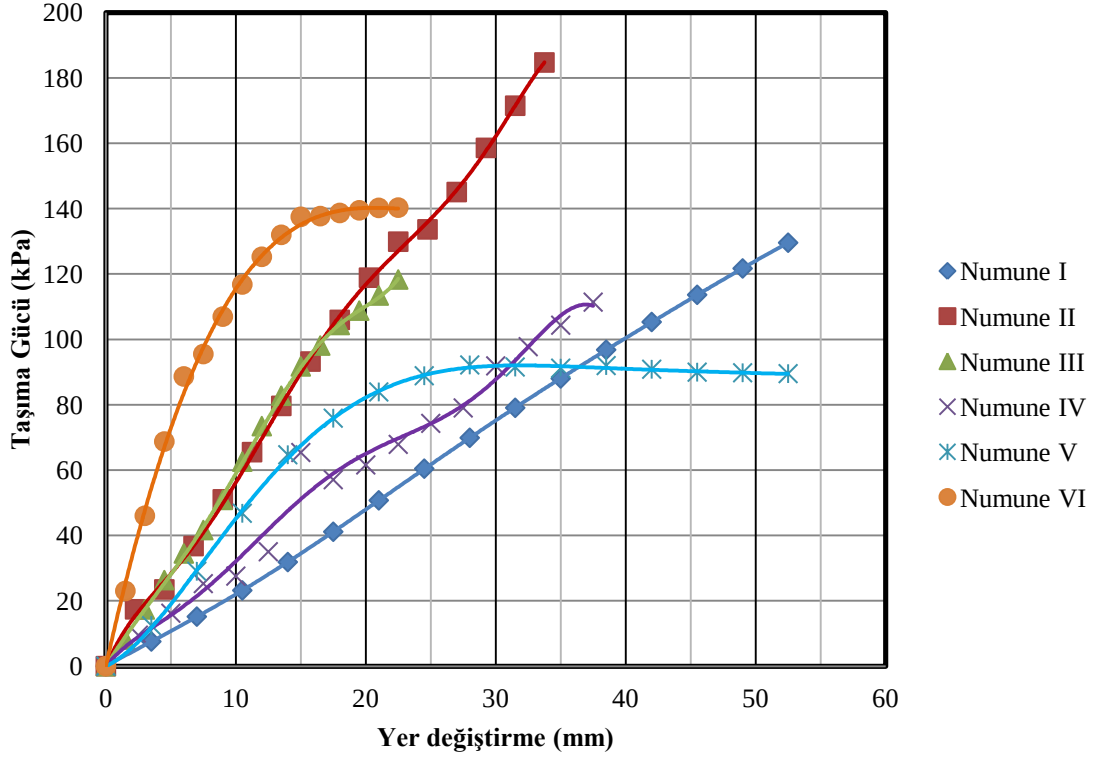
Şerit kesite ait gerilme yer değiştirme grafiği ise Şekil 5.4’ de gösterilmektedir. Yine yükleme 15 farklı kademede oluşturulup her kademe için 0.0035 m göçme uygulanmıştır. Şerit model sonuçlarına göre 5 cm yer değiştirmenin olduğu durumda sınır taşıma gücü değeri 115 kPa olarak hesaplanmıştır. Farklı zeminler üzerinde aynı model kullanılarak hem dairesel hem de şerit kesite ait gerilme yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Tamamen kuru modelde dairesel kesit kullanılarak hesaplanmış gerilme yer değiştirme grafikleri Şekil 5.5’ de, şerit kesit kullanılarak hesaplanmış gerilme yer değiştirme grafikleri de Şekil 5.6’ da gösterilmektedir. Dairesel ve şerit modellere ait analiz sonuçları Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

Çizelge 5. 2: Tamamen kuru modellerde hesaplanan taşıma gücü değerleri

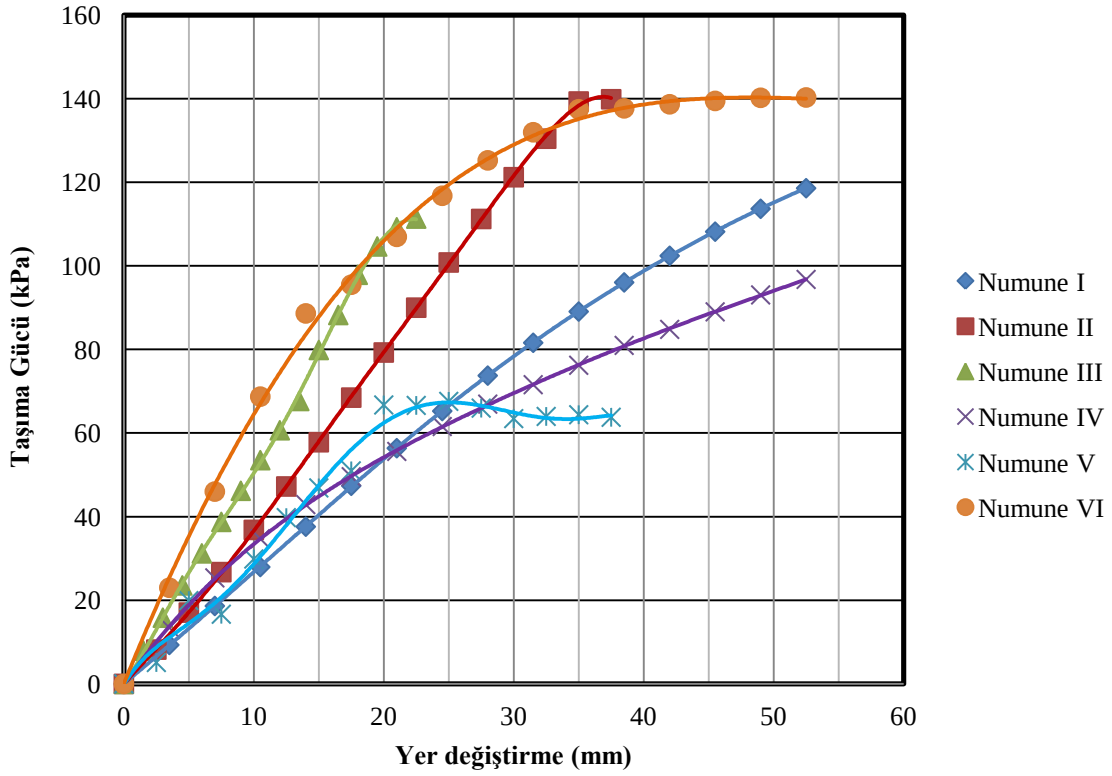
<i>Numune No</i>	<i>Dairesel Modele Göre Sınır Taşıma Gücü (kPa)</i>	<i>Şerit Modele Göre Sınır Taşıma Gücü (kPa)</i>
Numune I	123	115
Numune II	184	140
Numune III	118	111
Numune IV	111	97
Numune V	90	68
Numune VI	153	140



Şekil 5. 4 : Tamamen kuru şerit modelde Numune I'e ait gerilme & yer değişirme grafiği



Şekil 5. 5 : Tamamen kuru dairesel modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri



Şekil 5. 6 : Tamamen kuru şerit modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri

5.2 Doygun Zeminde Modellerin Taşıma Gücü

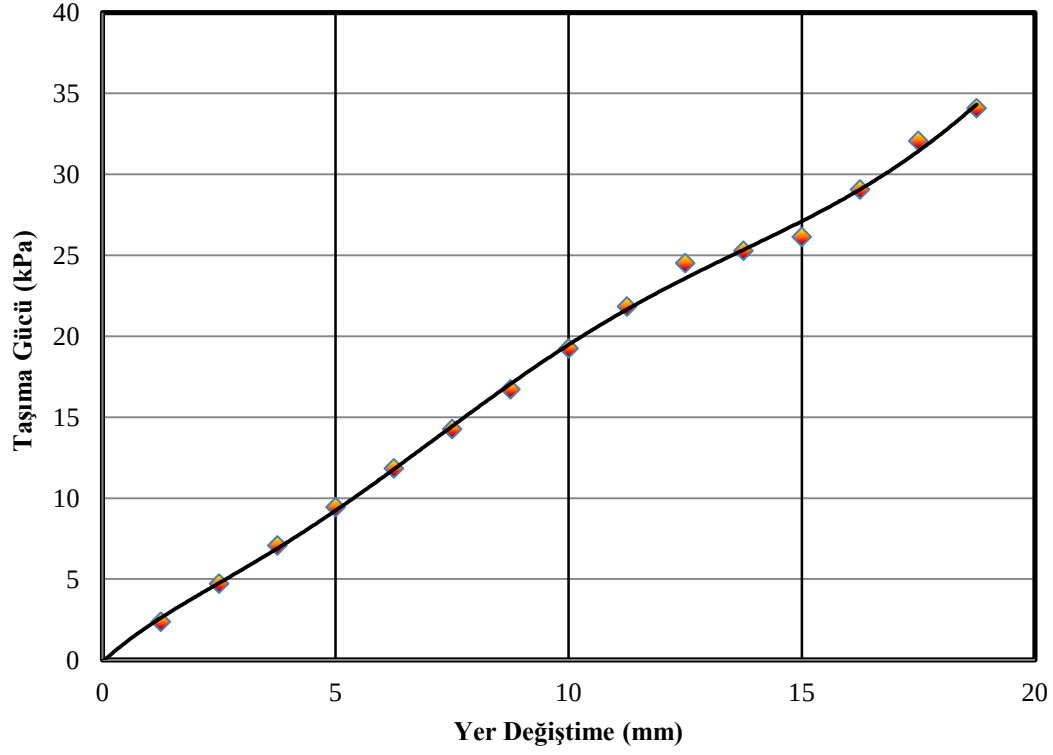
Dairesel ve şerit kesitli iki farklı model oluşturularak doymuş durumdaki taşıma gücü analizleri yapılmıştır. Bu modeller Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’ de gösterilmiştir. Çalışmada kademeli yükleme durumuna oluşturulup, elastik plastik (Mohr-Coulomb) zemin modeli kullanılmıştır. Kademeli yükleme koşulu ilk olarak zemine ait birim hacim ağırlığı kullanılarak, başlangıç gerilme durumlarının hesaplanması; sonrasında ise bu başlangıç durumları üzerine yüklemeler yapılması ile sağlanmıştır. Analizde kullanılan altı farklı zemin numunesine ait parametreler Çizelge 5.1’ de verilmiştir. Bütün modellerde bu parametreler değişmemektedir.

Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinde alınarak doymuş koşul her iki modelde de oluşturulmuştur. Efektif gerilme dağılımları kullanılarak hazırlanan modellerde ki ana fark; ilk modelde 2 m genişlikte eksen simetrik olarak çözüm yapılırken, ikinci modelde ise 4m genişlikte düzlem şekil değiştirme çözümü yapılmasıdır.

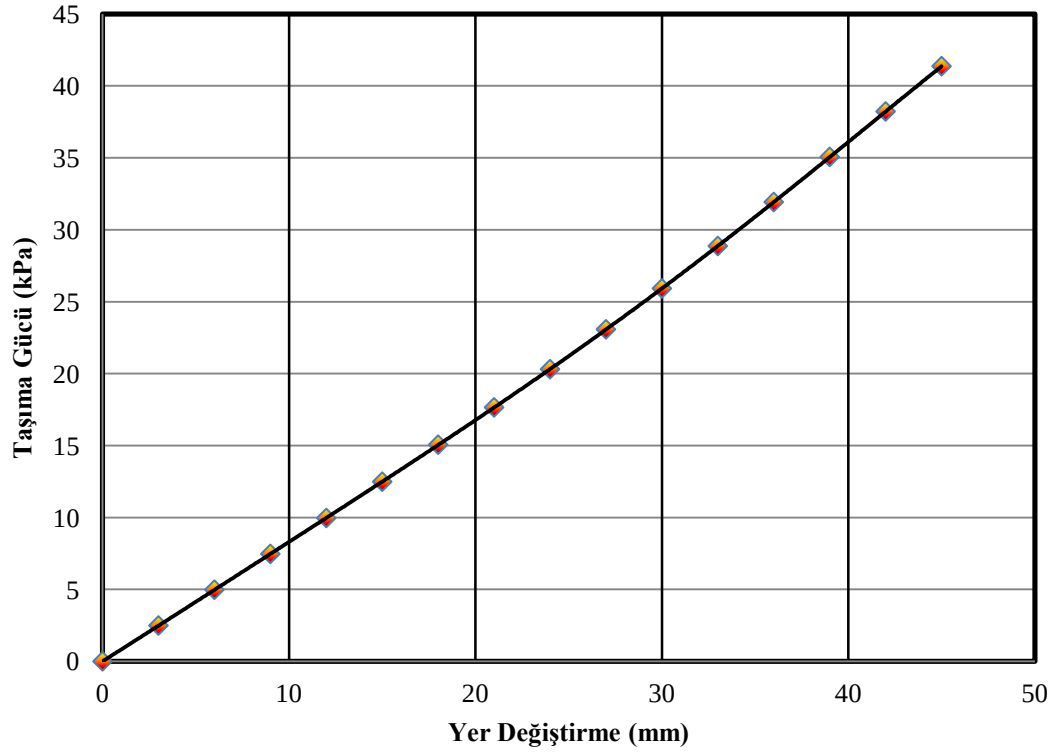
Numune I’e ait doymuş zemin parametreleri kullanılarak elde edilen gerilme ve yer değiştirme grafikleri dairesel kesit için Şekil 5.7’ de, şerit kesit için ise Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Tüm numunelere ait doymuş taşıma gücü değerleri ise Çizelge 5.3’ te verilmektedir.

Çizelge 5. 3 : Doygun modellerde hesaplanan taşıma gücü değerleri

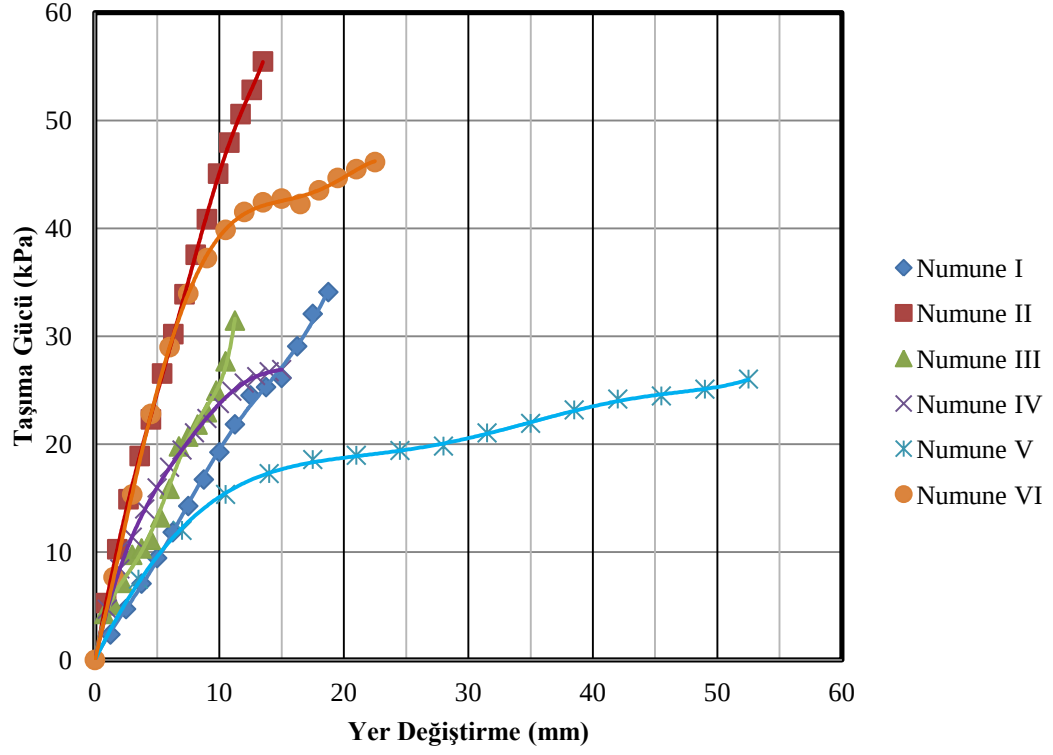
<i>Numune No</i>	<i>Dairesel Modele Göre Sınır Taşıma Gücü (kPa)</i>	<i>Şerit Modele Göre Sınır Taşıma Gücü (kPa)</i>
Numune I	34	42
Numune II	55	66
Numune III	47	32
Numune IV	27	50
Numune V	25	30
Numune VI	54	46



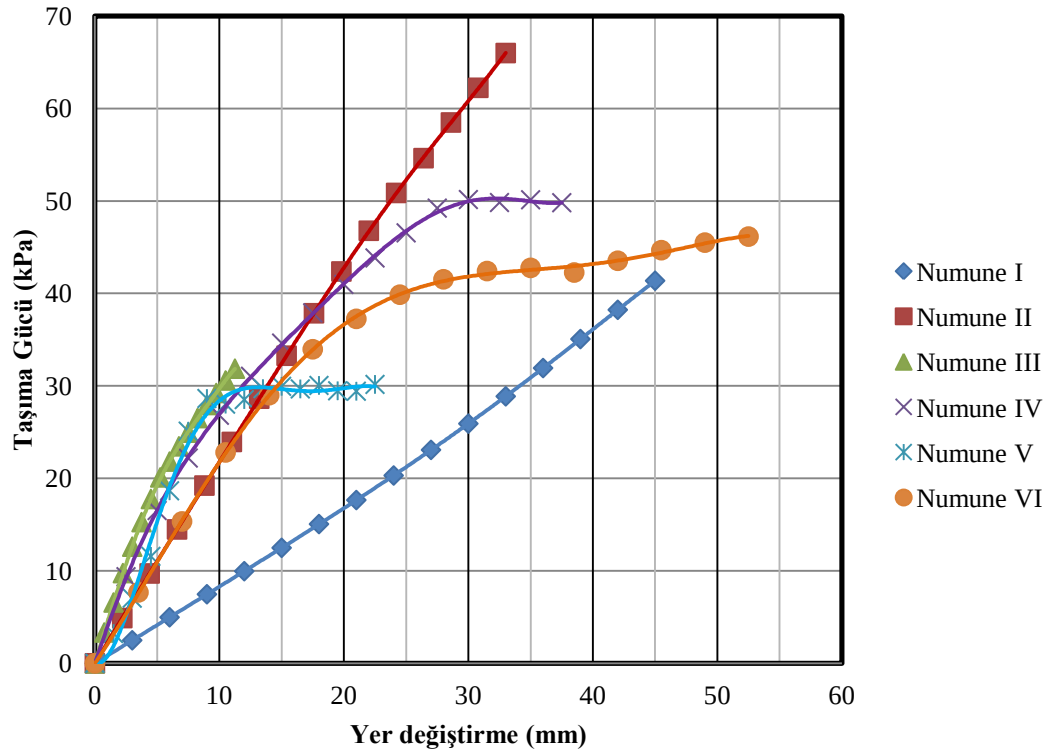
Şekil 5. 7 : Doygun dairesel modelde Numune I'e ait gerilme & yer değiştirme grafiği



Şekil 5. 8 : Doygun şerit modelde Numune I'e ait gerilme & yer değiştirme grafiği



Şekil 5. 9 : Döğun dairesel modelde tüm numunelere ait gerilme ve yer değıştirme grafikleri



Şekil 5. 10 : Döğun şerit modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değıştirme grafikleri

5.3 Doygun Olmayan Zeminde Modellerin Taşıma Gücü

Programda DOZ (Doygun Olmayan Zemin) koşulları, malzeme modellerinde laboratuvar deneyleri sonucu elde edilen SWCC (Zemin Su Karakteristik Eğrisi) kullanılarak oluşturulur. Doygun olmayan zeminlerin analizinde tamamen kuru ve doymuş modellerde kullanılan model geometriler ile malzeme özellikleri kullanılır (Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Çizelge 5.1), ek olarak programa SWCC verileri girilir.

Laboratuvar deneyleri neticesinde rezidüel doymuşluk derecesinin elde edilemediği zeminler için SWCC program bünyesinde mevcut olan yöntemlere göre atanır. Eğer SWCC eğrisinin bir kısmı biliniyor ise bu eğrilerde düzeltme yapılarak programa atanabilir. Laboratuvar deneylerinden elde edilen ve rezidüel doymuşluk derecesi hesaplanamayan numune I, III ve IV' e ait SWCC, programın bünyesinde bulunan VanGenuchten yöntemine göre düzeltilerek doymuş olmayan koşullarda çözüm yapılmıştır.

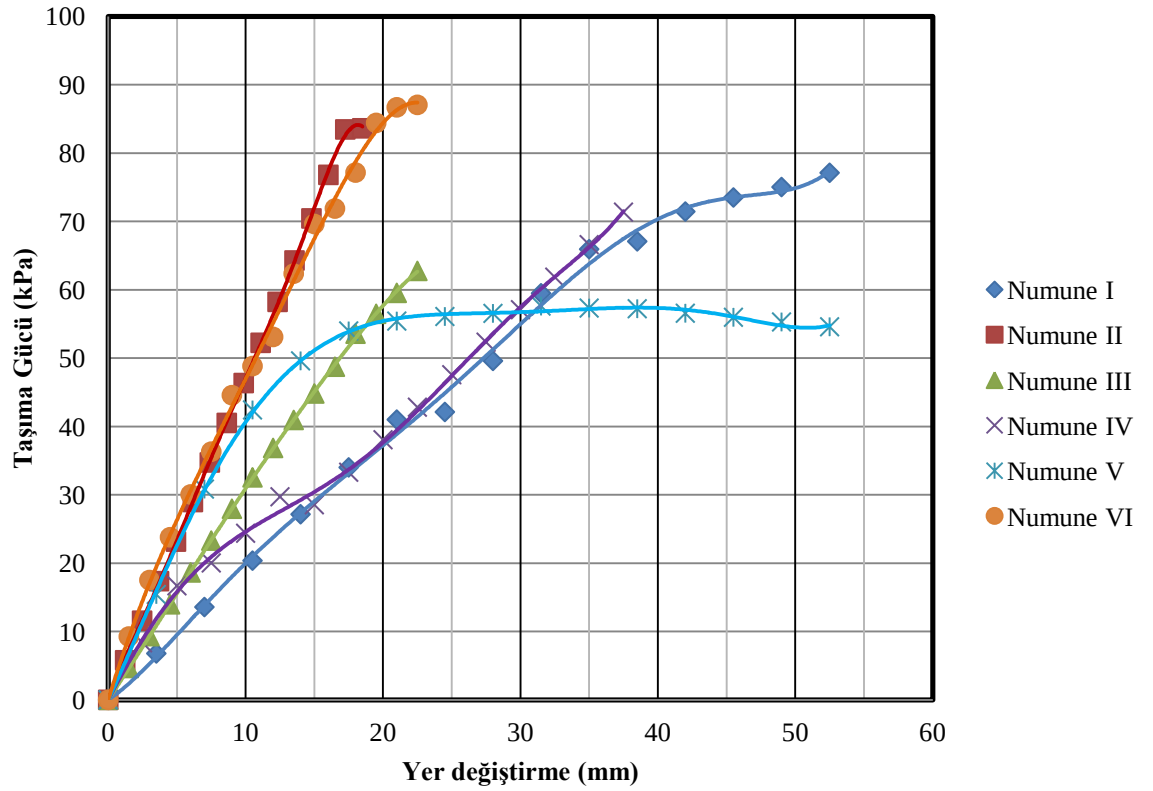
Doygun olmayan koşullarda program modifiye edilmiş bir kohezyon değerine göre taşıma gücünü hesaplamaktadır. Modifiye edilmiş kohezyon değeri ilk olarak programa girilen efektif kohezyon değerinin SWCC 'ün eksen takımlarındaki emme basıncı ve su muhtevası değerleri kullanarak, kohezyon değerinin tekrar hesaplanması işlemidir.

DOZ modelinde yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinin B ve 2B kadar altında olmak üzere iki farklı incelemeler yapılmıştır. İki incelemede de maksimum negatif boşluk suyu basıncı $5 \times \delta_w$ (maksimum negatif serbest su yüksekliği -5m) olarak tanımlanmıştır. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden B kadar aşağıda DOZ koşullarında daire kesitli temellerin gerilme ve yer değiştirme eğrisi Şekil 5.11' de, şerit kesitli temellerin ise Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Ayrıca maksimum 5cm yer değiştirmeye müsaade edilen hesaplanmış taşıma gücü Çizelge 5.4' de gösterilmektedir.

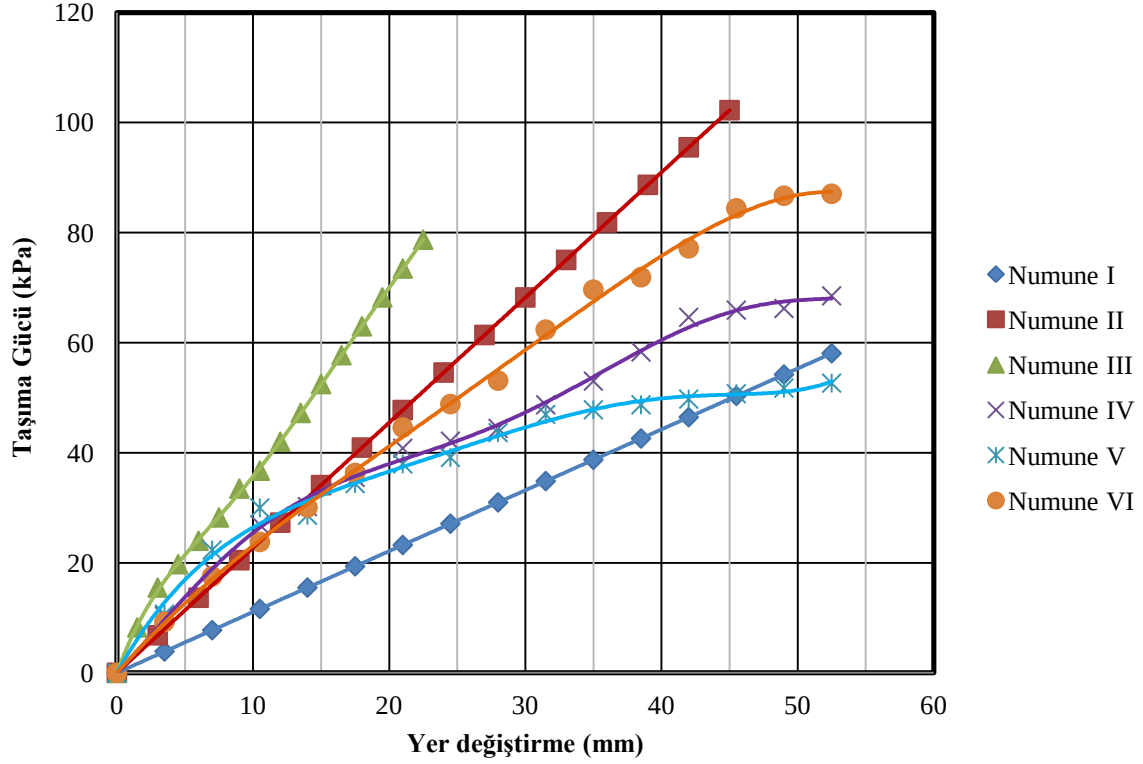
Farklı zemin türleri doymuş olmayan modellerde yapılan gerilme şekil değiştirme analizlerinde, doymuş olmayan koşuldaki taşıma gücü değerleri doymuş modeldeki değerlere göre daha büyük, kuru modeldeki değerlere göre daha küçük sonuçlar vermiştir.

Çizelge 5. 4 : YASS B kadar aşağıda yer alan doymun olmayan modellerde hesaplanan taşıma gücü değerleri

<i>Numune No</i>	<i>Dairesel Modele Göre Sınır Taşıma Gücü (kPa)</i>	<i>Şerit Modele Göre Sınır Taşıma Gücü (kPa)</i>
Numune I	75	55
Numune II	83	102
Numune III	63	78
Numune IV	71	68
Numune V	57	52
Numune VI	97	87



Şekil 5. 11 : Doymun olmayan dairesel modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri (YASS B)

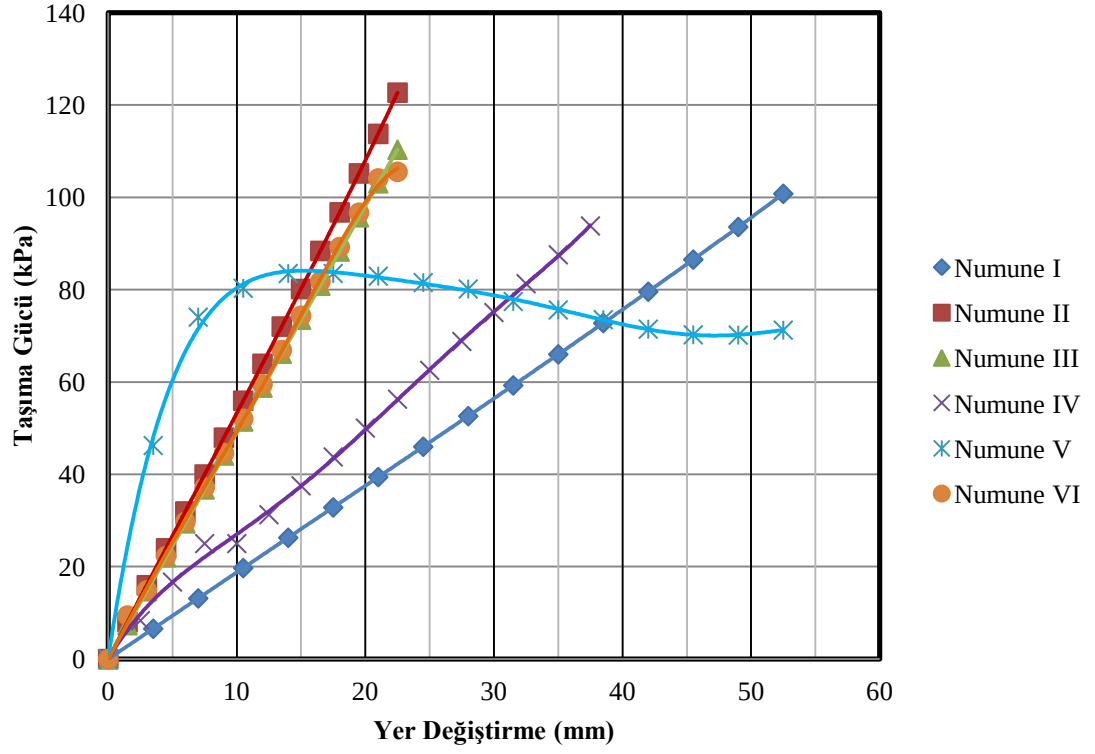


Şekil 5.12 : Doygun olmayan şerit modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri (YASS B)

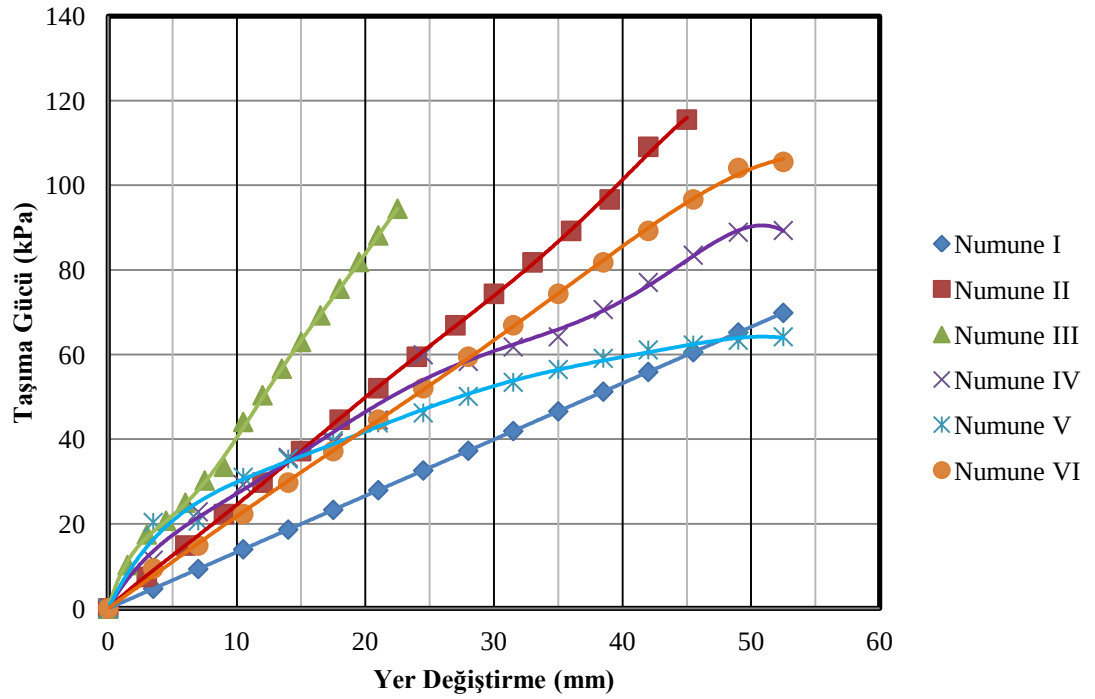
Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden 2B kadar aşağıda olduğu durumdaki gerilme & yer değiştirme eğrileri dairesel temel için Şekil 5.13, şerit temel için ise Şekil 5.14’de verilmiştir. Doygun olmayan analizlerde yeraltı su seviyesi 2B kadar aşağıdaki analınarak hesaplanmış taşıma gücü değerleri Çizelge 5.5’ te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : YASS 2B kadar aşağıda yer alan doymun olmayan modellerde hesaplanan taşıma gücü değerleri

<i>Numune No</i>	<i>Dairesel Modele Göre Sınır Taşıma Gücü (kPa)</i>	<i>Şerit Modele Göre Sınır Taşıma Gücü (kPa)</i>
Numune I	95	65
Numune II	123	115
Numune III	110	94
Numune IV	93	89
Numune V	83	64
Numune VI	105	109



Şekil 5. 13 : Doygun olmayan dairesel modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri (YASS 2B)



Şekil 5. 14 : Doygun olmayan şerit modelde tüm numunelere ait gerilme & yer değiştirme grafikleri (YASS 2B)

5.4 Modellerin Değerlendirilmesi

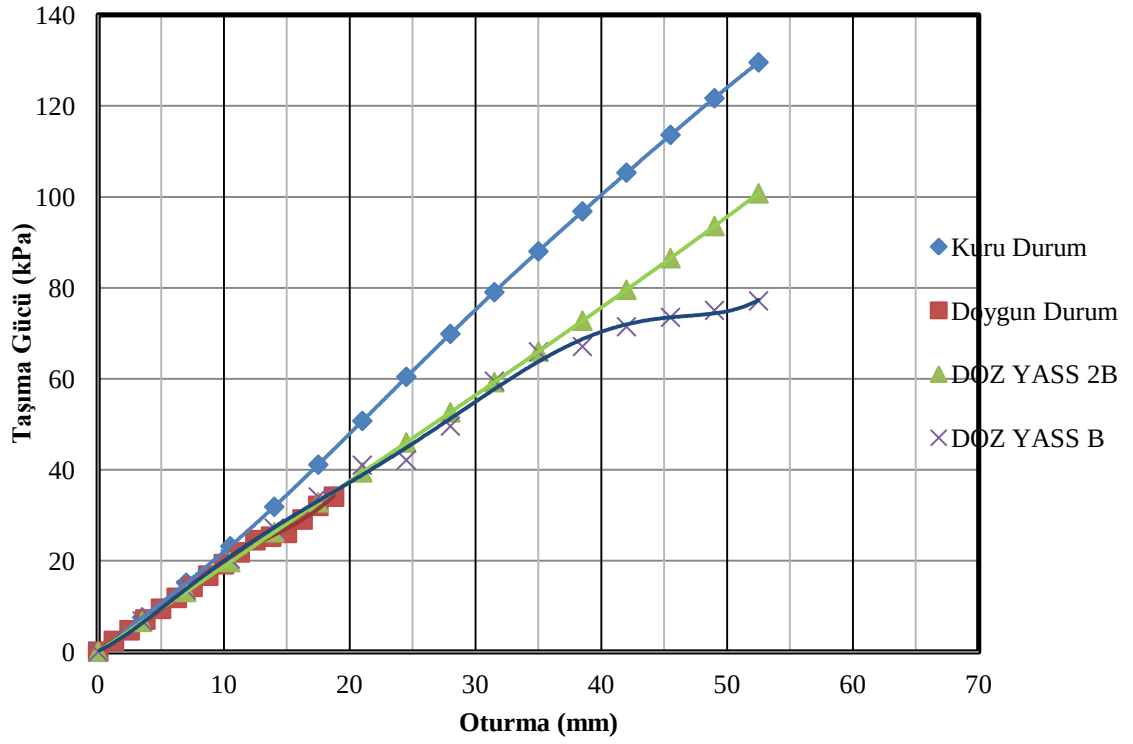
Üç farklı model kullanılarak tamamlanan bu çalışmada, iki farklı geometriye ait sonuçlar elde edilmiştir. Kuru durumdaki analiz sonuçları Çizelge 5.2’ de verilmiştir. Bu çizelgeden ve taşıma gücü grafiklerinden de anlaşılabileceği üzere efektif içsel sürtünme açısı değeri en yüksek olan Numune II, taşıma gücü değeri açısından da en yüksek değeri veren modeldir. Buna ek olarak içsel sürtünme açısı en düşük olan numune V ise en düşük taşıma gücüne sahip modelleri oluşturmuştur. Şerit ve dairesel analizlerde genelde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Doygun durumda elde edilen taşıma gücü değerleri, analizler içerisinde en düşük sonuçları veren modeller olmuştur. Bu hususta programda doymuş, kuru ve doymamış durumlar için aynı birim hacim ağırlıklarının kullanılması bir sebep olabilir, fakat klasik zemin mekaniği formülleri ile yapılan taşıma gücü hesaplamalarında da en düşük sonuçların doymuş durumda elde edildiği unutulmalıdır. Bu yüzden yapılan analizlerde elde edilen çözümler tutarlıdır.

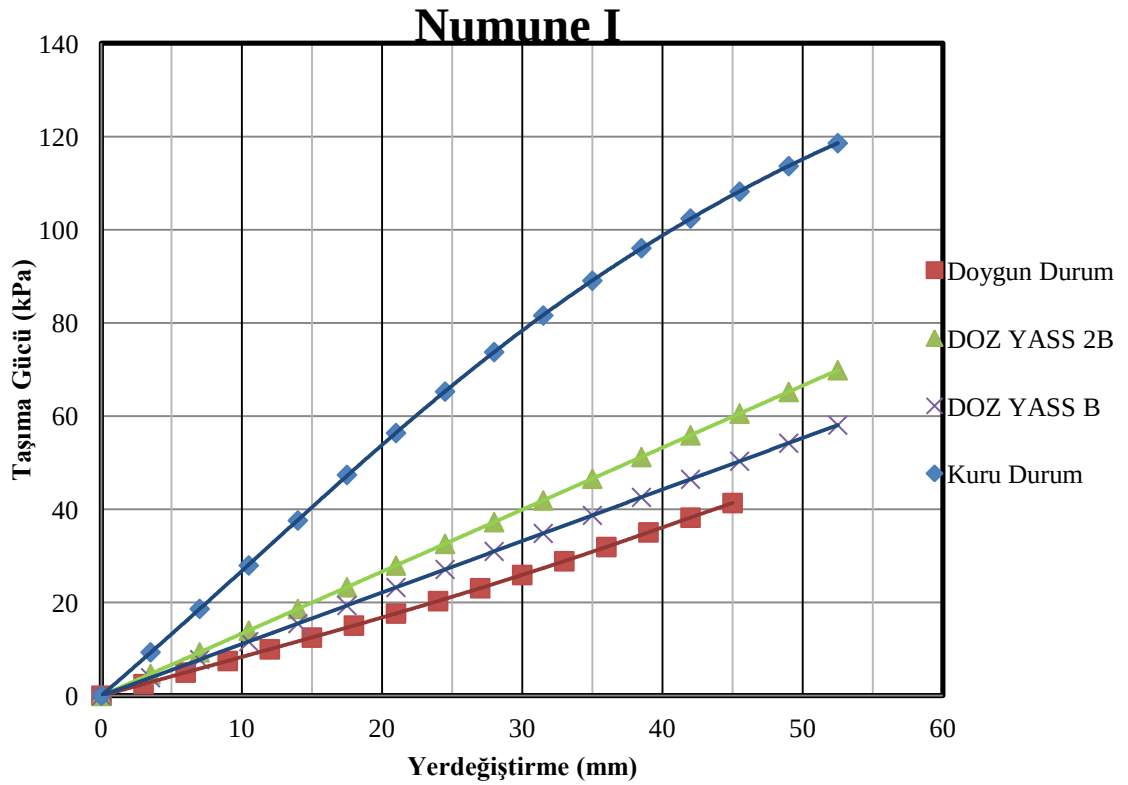
Doygun olmayan analizler iki farklı senaryo oluşturularak incelenmiştir. Bunlardan birincisi, yeraltı su seviyesinin yüzden B kadar aşağıda olduğu durum; ikincisi ise yeraltı su seviyesinin yüzden 2B kadar aşağıda olduğu durumdur. Laboratuvar deneyleri ile tam olarak rezidüel doymunluk derecesini elde edilememesi sonuçları etkilemektedir. Özellikle, Numune V ve IV’ da rezidüel doymunluk değeri ve hava giriş değeri saptanamamıştır. Ayrıca bu numuneler gerekli veriler olmadığı için VanGenuchten yöntemine göre de düzeltilememiştir. Bu olumsuzluklara ek olarak yapılan analizlerde özellikle SWCC elde edildiği numune II ve düzeltilerek hesaplamaların yapıldığı numune I, III ve IV’ te güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Doymamış durumlarda yapılan analiz sonuçlarına göre taşıma gücü değeri en büyük olan model yine Numune II’ e aittir.

Taşıma gücünü etkileyen ana etkenlerden birinin de yeraltı su seviyesi yüksekliği olduğu çalışmada ortaya konmuştur. Ve yüksek yeraltı su seviyesine sahip zeminlerin taşıma gücünün azaldığı gösterilmiştir.

Sonuçların daha iyi gözlenmesi için aynı numuneye ait modeller bir grafikte toplanmıştır. Numune I’ e ait kuru, doymuş ve doymamış model sonuçları dairesel temel için Şekil 5.15’ de, şerit temel için ise Şekil 5.16’ da gösterilmiştir.



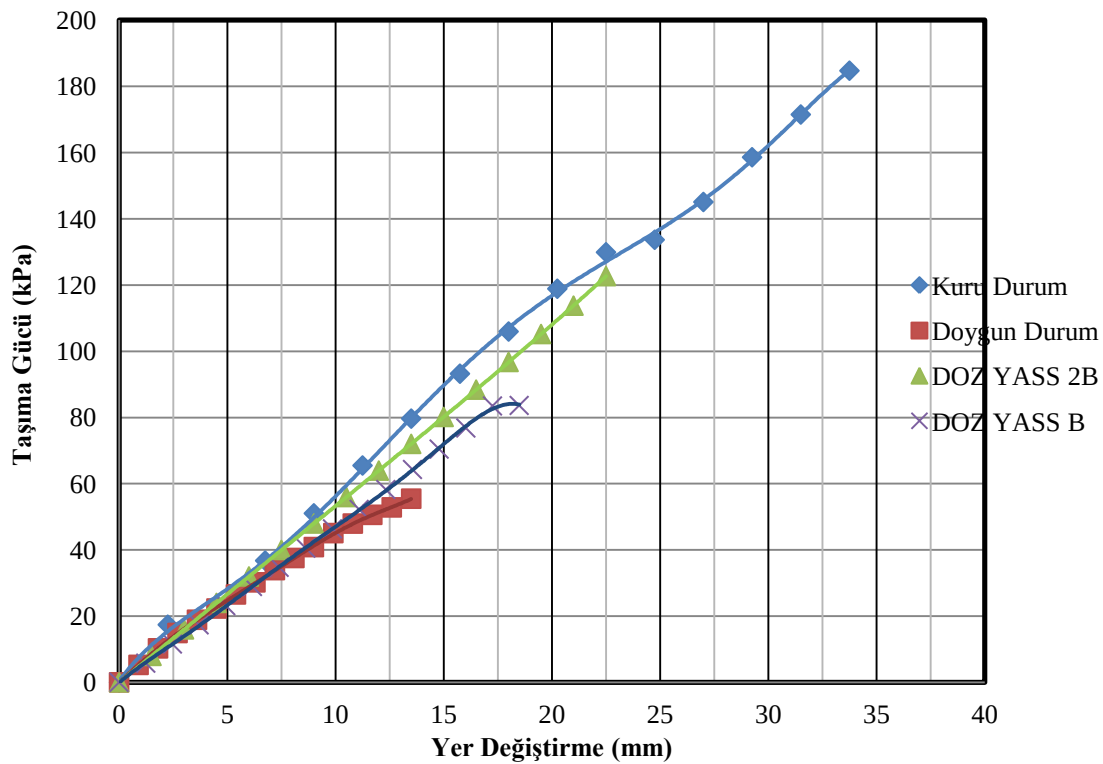
Şekil 5. 15 : Dairesel modelde Numune I' e ait gerilme & yer değıştirme sonuçları



Şekil 5. 16 : Şerit modelde Numune I' e ait gerilme & yer değıştirme sonuçları

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’ da görüldüğü üzere doymun durum ile kuru durum arasında taşıma gücü farkı yaklaşık olarak 3-4 kat fark iken, bu oran doymun durum ile doymamış koşullarda 2 katın altındadır. Yeraltı su seviyesi temel profilinden uzaklaştıkça taşıma gücü değerinin artışı açıktır.

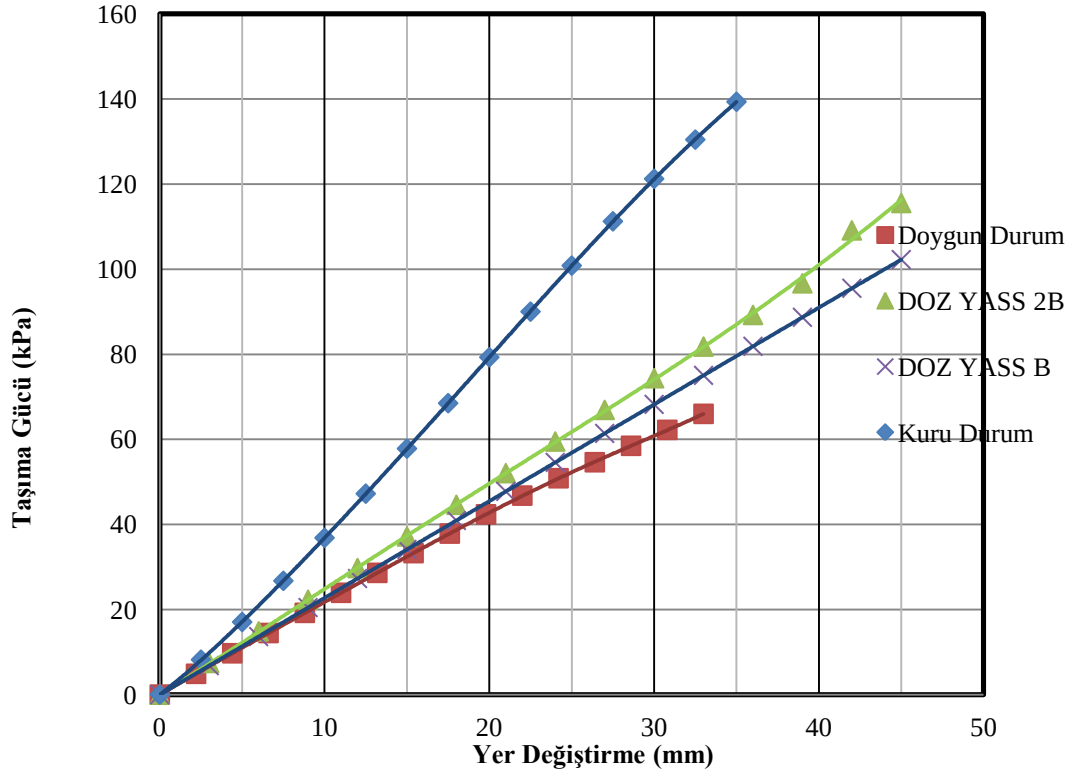
Numune II’ e ait model sonuçları Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’ de gösterilmiştir. Özellikle dairesel model de ulaşılan sonuçlar SWCC kullanılarak yapılan doymamış analizlerde yeraltı su seviyesinin 2B kadar aşağıda olduğu koşullarda taşıma gücünün doymun koşula göre yaklaşık 2 kat fazla sonuç verdiği hesaplanmıştır.



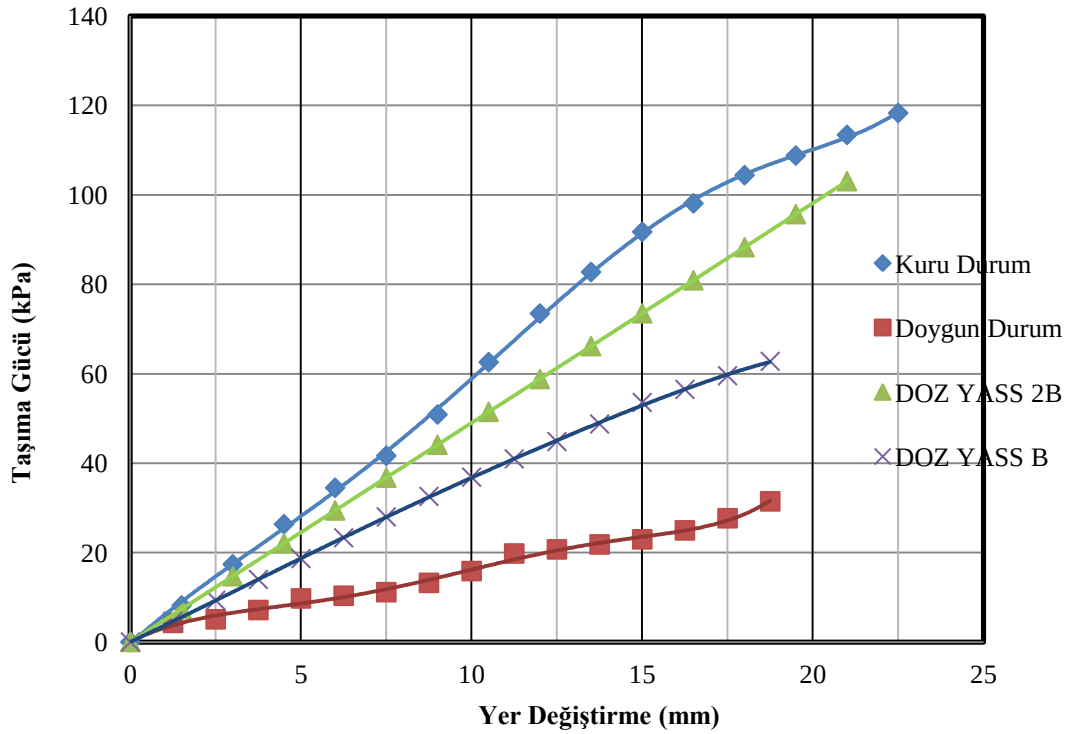
Şekil 5. 17 : Dairesel modelde Numune II’ e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları

Numune III, IV, V ve VI’ ya ait modellerde de aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu modellerin grafikleri sırası ile numune III için dairesel Şekil 5.18, şerit Şekil 5.19, numune IV’ e ait dairesel Şekil 5.20 ile şerit Şekil 5.21, numune V için Şekil 5.22 ile Şekil 5.23 ve son olarak numune VI için Şekil 5.24 ile Şekil 5.25’ de verilmiştir. Genel olarak modeller de doymun olmayan koşuldaki taşıma gücü değerleri kuru duruma göre düşük fakat doymun duruma göre yüksek sonuçlar vermektedir. Ayrıca yeraltı su seviyesi yüksekliği bu sonuçları etkilemektedir. Analiz sonuçları değerlendirilirken maksimum negatif serbest su yüksekliği değerinin 5m olarak

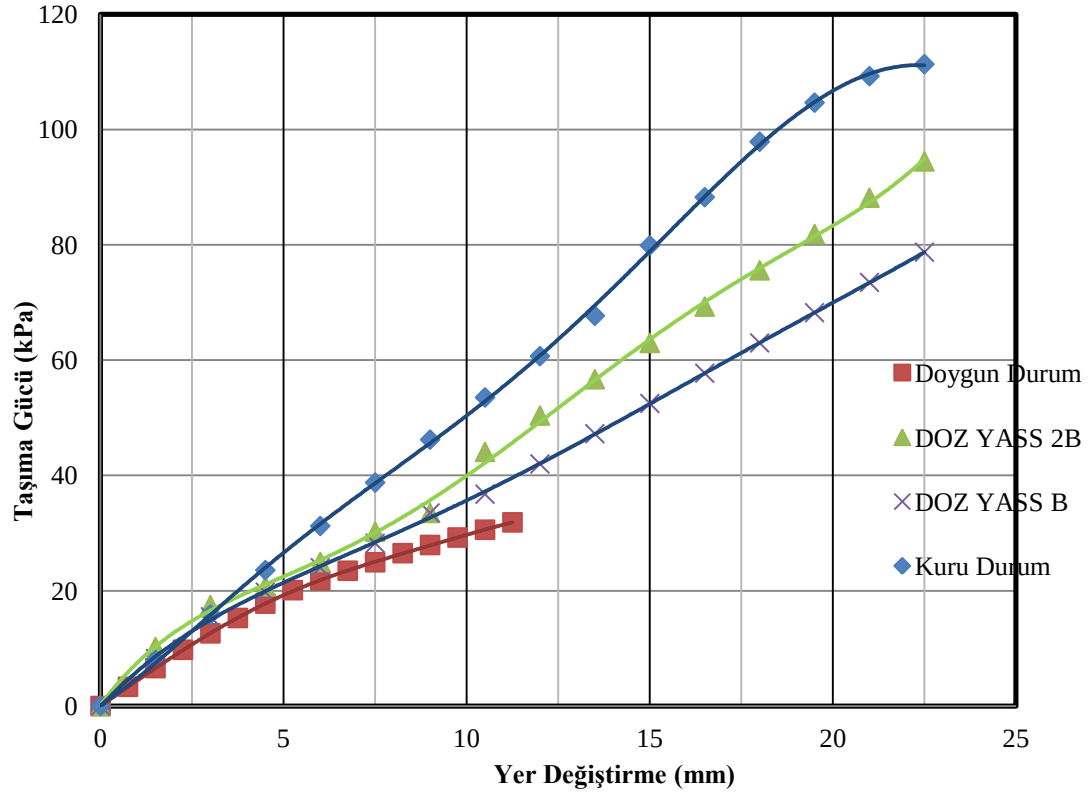
seçilerek bu sonuçlara ulaşıldığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu değerin zemin türüne göre değiştiği unutulmamalıdır.



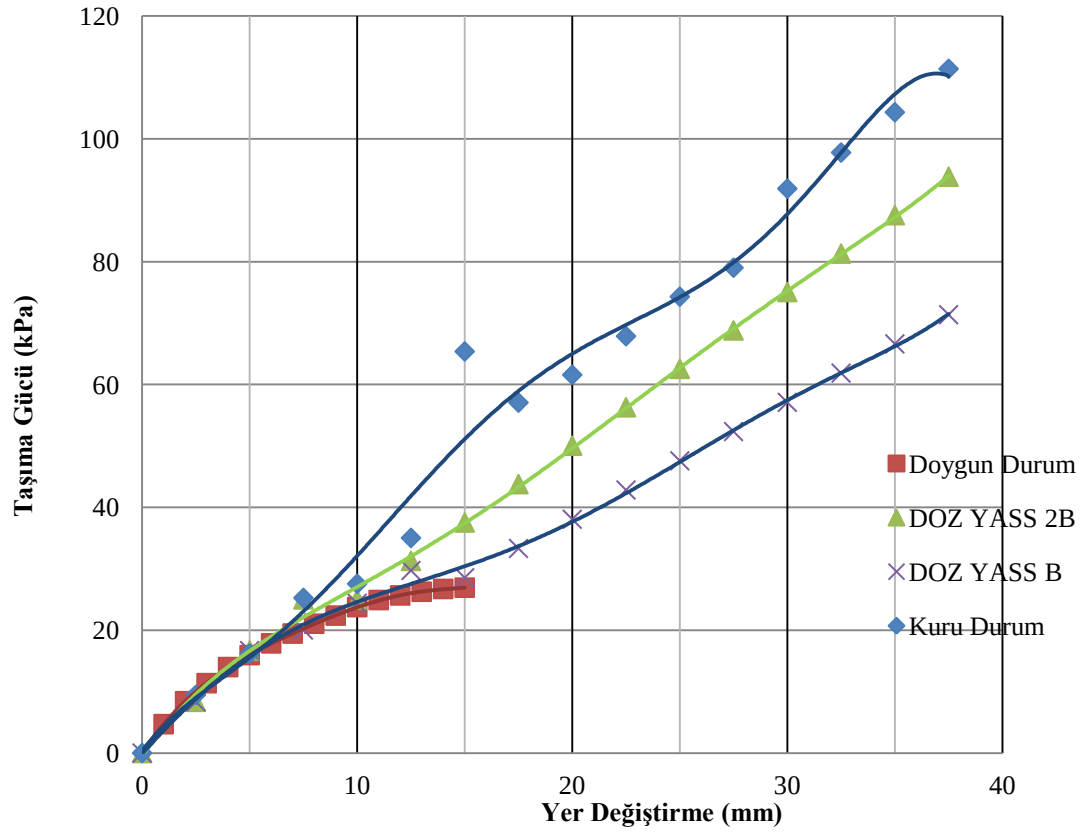
Şekil 5. 18 : Şerit modelde Numune II' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları



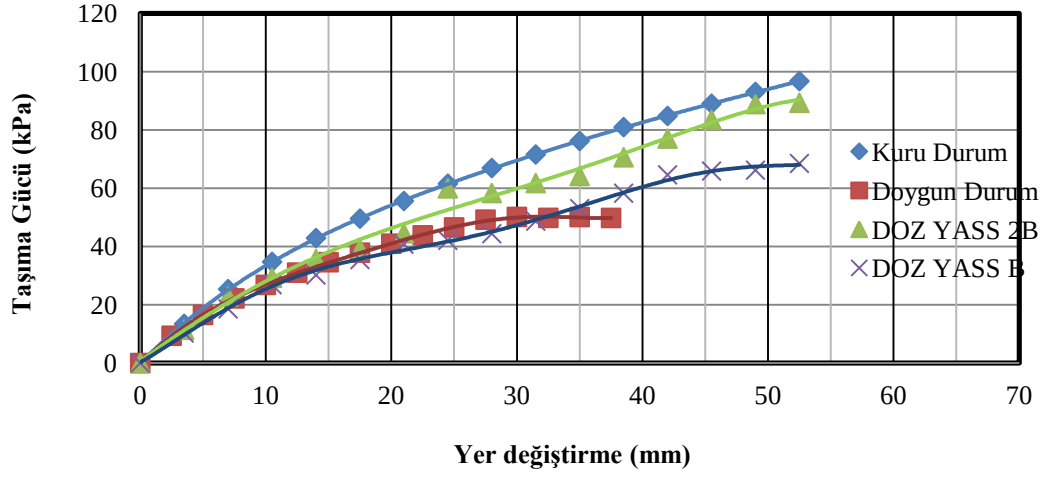
Şekil 5. 19 : Dairesel modelde Numune III' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları



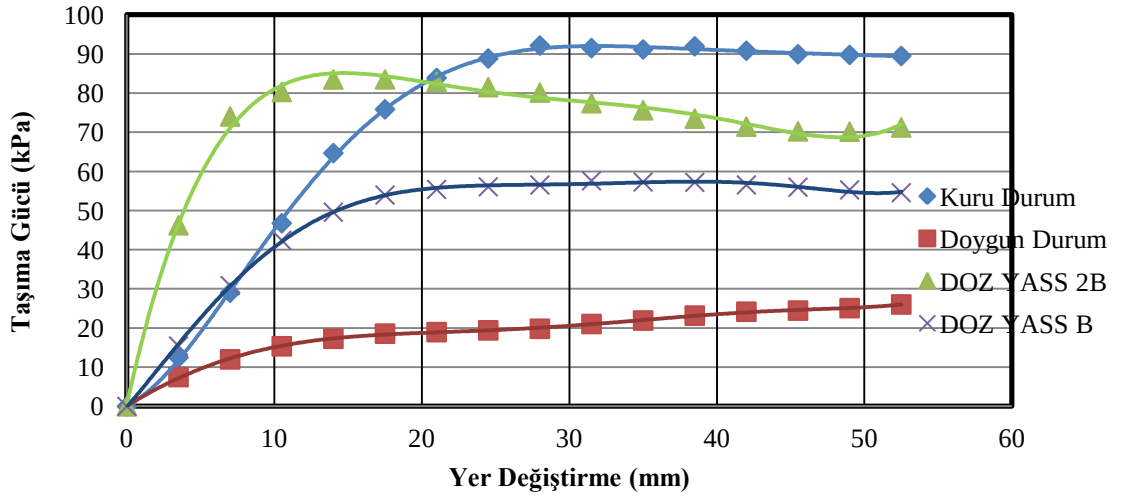
Şekil 5. 20 : Şerit modelde Numune III' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları



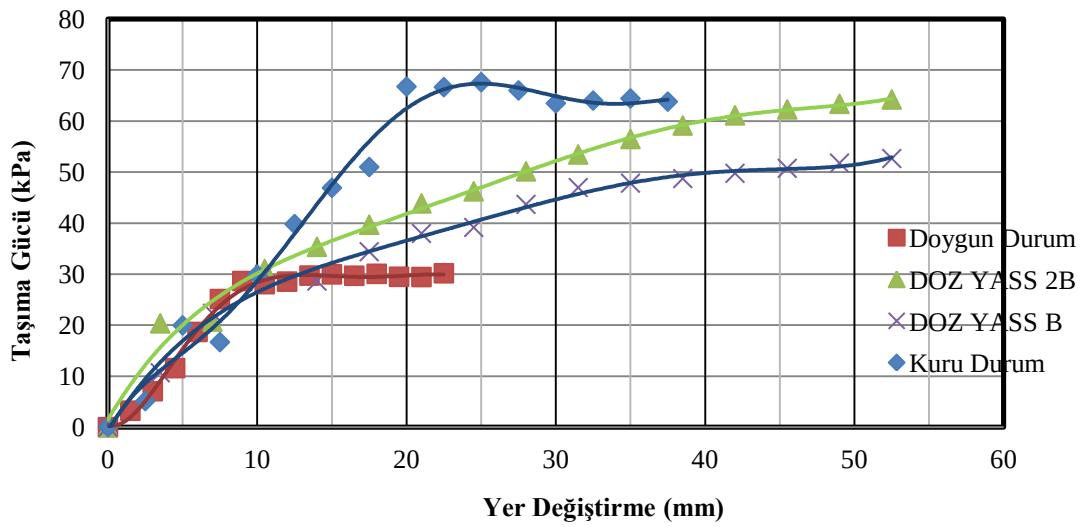
Şekil 5. 21 : Dairesel modelde Numune IV' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları



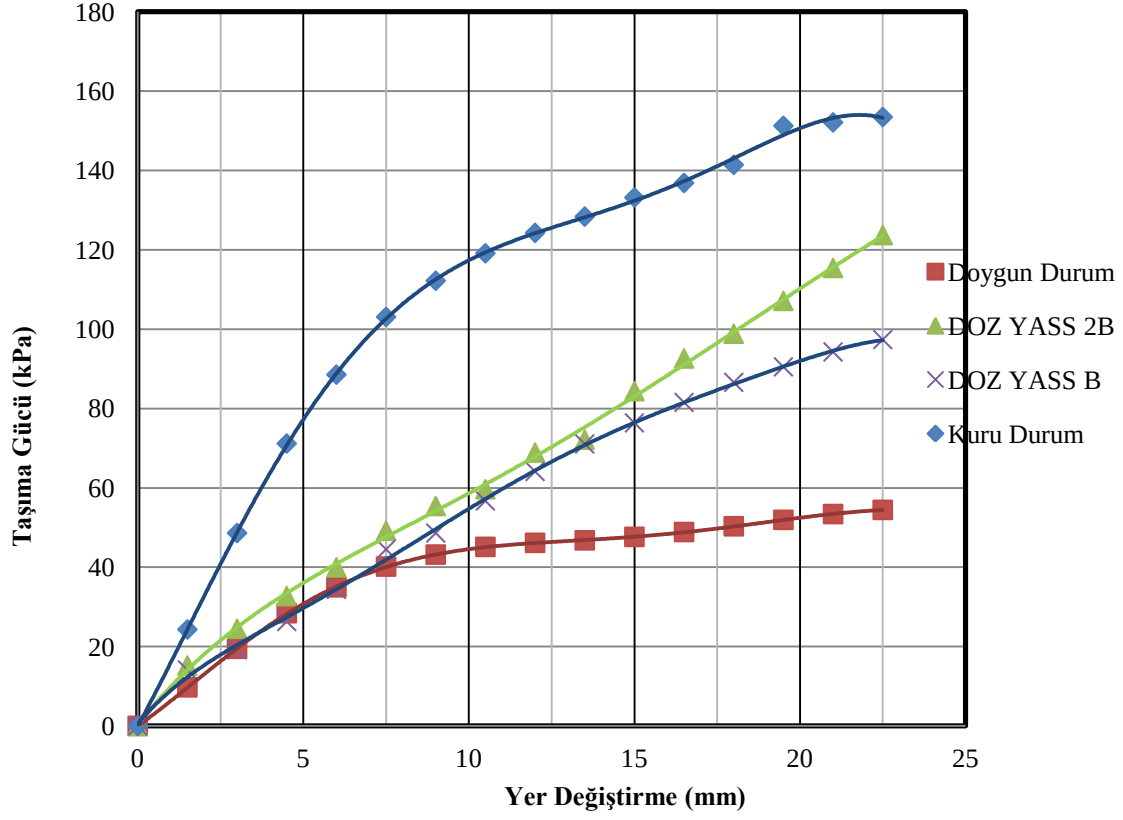
Şekil 5. 22 : Şerit modelde Numune IV' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları



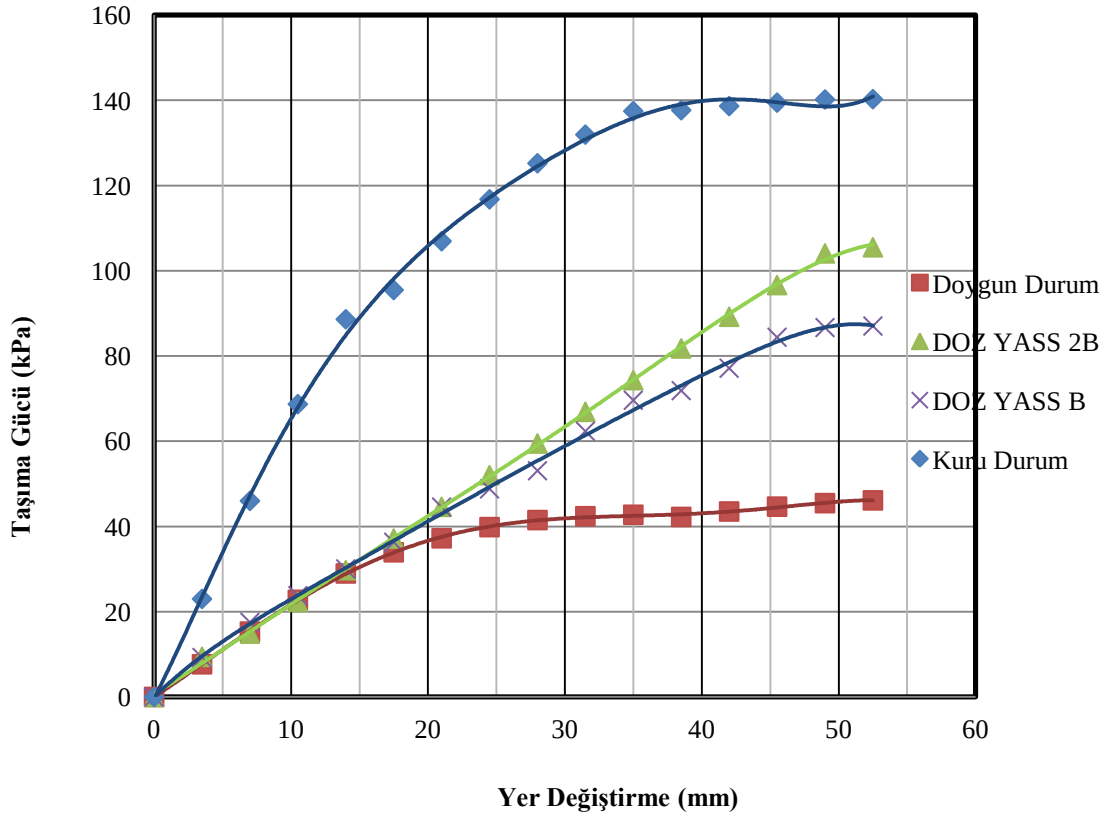
Şekil 5. 23 : Dairesel modelde Numune V' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları



Şekil 5. 24 : Şerit modelde Numune V' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları



Şekil 5. 25 : Dairesel modelde Numune VI' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları



Şekil 5. 26 : Şerit modelde Numune VI' e ait gerilme & yer değiştirme sonuçları

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Zeminin emme gerilmesindeki değişim, gerilme durumunun değişmesine neden olmaktadır. Zemin mekaniğinde gerilme değişimi içeren kayma mukavemeti, taşıma gücü, oturma, yanıl toprak basıncı ve şev stabilizesini gibi problemlerde emme gerilmesi incelenmelidir. Doygun olmayan zeminlerde, emme davranışının araştırılması ve doğru olarak belirlenmesi, daha güvenli ve ekonomik tasarım yapmamızı sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, emme gerilmesinin etkilediği problemlerden biri olarak tarif edilen taşıma gücü üzerinde durulmuştur. Farklı zemin profilleri üzerinde oturan sığ temellerin kuru, doygun ve doygun olmayan koşullarda taşıma gücü hesaplanmıştır. Araştırmada hem deneysel hem de sayısal analizler bulunmaktadır. Deneysel çalışmada, zemin özellikleri belirlenmiş profillerin taşıma gücü analizleri GeoStudio bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Bu programda sayısal analizler, sonlu elemanlar yöntemine göre iki boyutta modellenmiş ve çözülmüştür.

Araştırmanın deneysel kısmında, program girdilerini temin etmek için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deneyler kapsamında, numunelerin sınıflandırma özellikleri temini için elek analizi, hidrometre ve kıvam limitleri; mukavemet özellikleri için kesme kutusu ve doygun olmayan zemin mekaniği özellikleri için basınç plakası ve tempe basınç hücresi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca deney numunelerinin hazırlanma aşamasında, standart numune hazırlamak için standart proktor deneyi de yapılmıştır.

Sığ temellerin modellenmesinde, altı farklı zemin profili kullanılmıştır. Profillerin dördünde mühendislik özellikleri laboratuvar çalışmalarından elde edilirken, kalan iki profil, literatürde çalışılmış ve mühendislik özellikleri belirlenmiş araştırmalardan seçilmiştir. Analizler lineer elastik modelin oluşturulduğu kuru durumda, elastik-plastik (Mohr - Coluomb) modelin oluşturulduğu doygun durumda ve doygun olmayan zemin mekaniği özelliklerinin kullanıldığı (SWCC) elastik-plastik durumda yapılmıştır.

6.1 Sonuçlar

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmuştur.

- Dört farklı numuneye ait SWCC (zemin su karakteristik eğrisi) belirlenmiştir. Birleşik zemin sınıflandırılmasına göre CL olarak sınıflandırılan Numune I incelenen diğer numunelere göre daha yüksek hava giriş ve rezidüel doygunluk derecelerine sahiptir. İnce dane yüzdesinin fazla ve geçirimliliği az olan bu numunede zeminin su tutma özelliğini daha yüksek basınçlarda kaybetmektedir.
- İnce daneli zeminlerde, tam bir SWCC elde edilmesinin zorluğu grlmştur. Bu yüzden analizlerde dzeltiymiş eğriler kullanılmıştır. Kaba daneli zeminlerde, tempe basınç hcreti deneyi ile SWCC eğrileri tam olarak elde edilmiştir.
- Numune II birleşik zemin sınıflandırılmasına göre SP olarak sınıflandırılmıştır. Bu numune incelenen diğer numunelere nazaran daha küçük basınçlarda su tutma özelliğini kaybetmektedir. Bu, numunenin boşluklu yapısına ve yüksek geirimliliğine bağlıdır.
- Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan taşıma gücü analizlerinde temel tipinin ve zemin özelliklerinin taşıma gücünü etkilediği grlmştur. İçsel sürtünme açısı değeri en büyük olan Numune II en yüksek taşıma gücü değerlerini vermiştir.
- Doygun olmayan koşullarda hesaplanan taşıma gücü değerleri doygun koşullara göre yüksek sonuçlar vermektedir. Analiz sonuçlarına göre tam bir SWCC elde edilen numunelerde bu değer 2 ile 3 kat arasındadır.
- Taşıma gücü analizlerinde beklenildiği gibi tamamen kuru durumda en yüksek değerler elde edilmiştir.

6.2 neriler

Gelecekteki çalışmalara yönelik yapılan neriler.

- Sayısal analizlerde elde edilen sonuçlar, model deney sistemleri kurularak değerlendirilebilir.

- Doygun olmayan zeminler üzerinde inşa edilmiş yapılara ait gerçek veriler kullanılarak sayısal analizler karşılaştırılabilir.
- Farklı zemin türleri üzerinde analizler tekrarlanabilir
- Programın bünyesinde bulun farklı malzeme modelleri kullanılarak sonuçlar tekrar değerlendirilebilir.
- Taşıma gücü analizleri efektif ve toplam parametrelere göre yapılarak uzun ve kısa dönem stabilite değerleri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Costa, Y. D., Cintra, J. C. ve Jorge, G. Z.** (2002). Influence of matric suction on the results of plate load tests performed on a lateritic soil deposit. *Geotechnical Testing Journal*, **26** (2), 1-9.
- [2] **Oh, W. T. ve Vanapalli, S. K.** (2011). Bearing capacity of low plastic unsaturated soils using effective and total stress approaches. *The Pann-Ann CGS Geotechnical Conference*, Toronto, Canada, 2-6 Ekim.
- [3] **Uchaipichat, A.** (2011). An elasto-plastic model for unsaturated soils under drying and wetting processes. *EJGE*, **15** (K), 1087-1102.
- [4] **Coduto, Donald P.** (1999). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*. Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- [5] **Murray, E. J. ve Sivakumar, V.** (2010). *Unsaturated Soils: A fundamental interpretation of soil behavior*. Willey-Blackwell, West Sussex, United Kingdom.
- [6] **Freundlund, D. G. ve Rahardjo, H.** (1993). An overview of unsaturated soil behaviour, *Geotechnical Engineering Division/ASCE*, Dallas, Texas, USA, 24-28 Ekim.
- [7] **Freundlund, D. G. ve Rahardjo, H.** (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley, New York, USA.
- [8] **Lu, Ning ve Likos William J.** (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- [9] **Richards L. A.** (1928). The usefulness of capillary potentials to soil moisture and plant investigators. *J. Agric. Res.*, **37**, 719-742.
- [10] **Edlefsen N. E. ve Andersen A.B.C.** (1943). Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, **15**, 3-298.
- [11] **Kayadelen, C.** (2005). *Doygun olmayan ince daneli zeminlerin K_0 koşullarındaki yanıl basınçlarının incelenmesi*, (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [12] **Richards B. G.** (1965). Measurement of free energy of soil moisture by the psychrometric technique using thermistors, in moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas, *A Symposium in Printed Australia: Butterworths* (Sf. 39-46).
- [13] **Önalp, Akın** (2002). *Geoteknik Bilgisi- I: Çözömlü Problemlerle Zemin mekaniği ve Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- [14] **Göksan, T. Ş.** (2007). *Zeminlerin Emme Özelliklerinin Belirlenmesinde Bir Yaklaşım*, (Doktora Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

- [15] **Rowe, Kerry. R.** (2001). *Geotechnical & Geoenviromental Engineering Handbook*. Springer, New York, USA.
- [16] **Lu, N. Godt, W. J, ve Wu, D. T** (2010). A closed-form equation for effective stres in unsaturated soil. *Water Resources Research*, 46, W05515.
- [17] **Fredlund, D. G.** (1995). Prediction of unsaturated soil functions using the soil-water characteristic curve. *Bengt B. Broms Symposium in Geotechnical Engineering*, Singapore, 13-16 Aralik.
- [18] **Göksan, T. Ş.** (2008). *Zemin Suyu Özelliklerinin Emme Basıncı Üzerindeki Etkileri*, (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [19] **Van Genuchten, M. T.** (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- [20] **Fredlund, D.G, Xing, A.** (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
- [21] **Uzuner, B. A.** (2006). *Temel Mühendisliğine*. Derya Kitabevi, Trabzon, Türkiye.
- [22] **Terzaghi, K.** (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- [23] **Önalp, A. ve Sert, S.** (2006). *Geoteknik Bilgisi III – Bina Temelleri*. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- [24] **Murthy, V. N. S.** (1994). *Geotechnical Engineering*. Marcel Dekker, New York, USA.
- [25] **Coduto, Donald P.** (2001). *Foundation Design: Principles and Practices*. Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- [26] **Vesic, A.S.** (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE* 99(SM1), 45-73.
- [27] **Van, D.** (1969). *Theoratical Soil Mechanics*. Nostrand Company, New Jersey, USA.
- [28] **Mohamed, F.** (2006). *A Semi-Empirical Approach fort he Interpretation of the Bearing Capacity of Unsaturated Soils*, (Yüksek Lisans Tezi), University of Ottawa, Ottawa.
- [29] **Cernica, John. N.** (1995). *Geotechnical Engineering Foundation Design*, John Wiley&Sons Inc, Canada.
- [30] **Meyerhof, G. G.** (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*, 2, 301-332.
- [31] **Bowles, J. E.** (1997). *Foundation Analysis and Design*. McGraw - Hill, Singapore.
- [32] **Broms, B. B.** (1964).The effectof degree of saturation on the bearing capacity of flexible pavements, *Highway Research Report*, 71:1-14, Canada.

- [33] Sun, R. (2010). *Bearing Capacity and Settlement Behavior of Unsaturated Soils from Model Footing Tests*, (Yüksek Lisans Tezi), University of Ottawa, Canada.
- [34] Oloo, S. Y, Fredlund, D.G ve Gan, J. M. (1997). Bearing capacity of unpaved roads. *Canadian Geotechnical Journal*, **34**, 398-407.
- [35] ASTM-D422 (1994b). Standard test method for particle size analysis of soils, *American Society of Testing Material*, Philadelphia, USA.
- [36] Uzuner, B. A. (2001). *Çözümlü Problemlerle Temel Mühendisliğine*. Teknik Yayınevi, Ankara, Türkiye.
- [37] TS 1900 (1987). İnşaat mühendisliği zemin laboratuvar deneyleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- [38] Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, Stamford, USA.
- [39] ASTM-D4318 (2000). Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils, *American Society of Testing Material*, Philadelphia, USA.
- [40] Ozaydın, K. A. (2001). *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- [41] ASTM-D698 (2000). Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, *American Society of Testing Material*, Philadelphia, USA.
- [42] ASTM-D854 (2000). Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, *American Society of Testing Material*, Philadelphia, USA.
- [43] ASTM-D3080 (1999). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, *American Society of Testing Material*, Philadelphia, USA.
- [44] Url-1 <<http://www.soilmoisture.com>>, alındığı tarih: 29.06.2012
- [45] Url-2 <<http://www.soilmoisture.com>>, alındığı tarih: 03.08.2012
- [46] Url-3 <<http://www.biyomed.com/femmuhanaliz/fem/seynedir.htm>>, alındığı tarih 22.11.2012
- [47] Civelek, S. (2011). *Tabakalı zeminlere oturan yüzeysel temellerin taşıma gücü*, (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [48] Plaxis (2002). *User Manuel 2D version 8, (Edited by Brinkgreve, R. J. B.), Delft University of Technology & Plaxis B. V., Netherland.*
- [49] Uncuoğlu, E. (2009). *Kohezyonsuz zeminlerdeki kazıklardaki yatay yük ve moment etkisi altındaki davranışlarının analizi*, (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [50] GeoStudio (2008). *Stability Modelling with Slope/W 2007 Version*, Geo-Slope International Ltd., Canada.
- [51] GeoStudio (2008). *Stress-Deformation Modelling with Sigma/W 2007 Version*, Geo-Slope International Ltd., Canada.
- [52] Craig, R. F. (1997). *Craig's Soil Mechanics*. E&FN Spon, London, England.

- [52] **Das, B. J.** (2007). *Principles of Foundation Engineering*. Thomson Canada Limited, Toronto, Canada.
- [53] **Karthigeyan, S., Ramakrishna, V. V. G., ve Rajagopal, K.** (2007). Bearing capacity of unpaved roads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133 (5)**, 512-521.

EKLER

EK A: Taşıma Gücü Katsayıları

EK B: Plastisite Kartı

EK C: Kesme Kutusu Deney Sonuçları

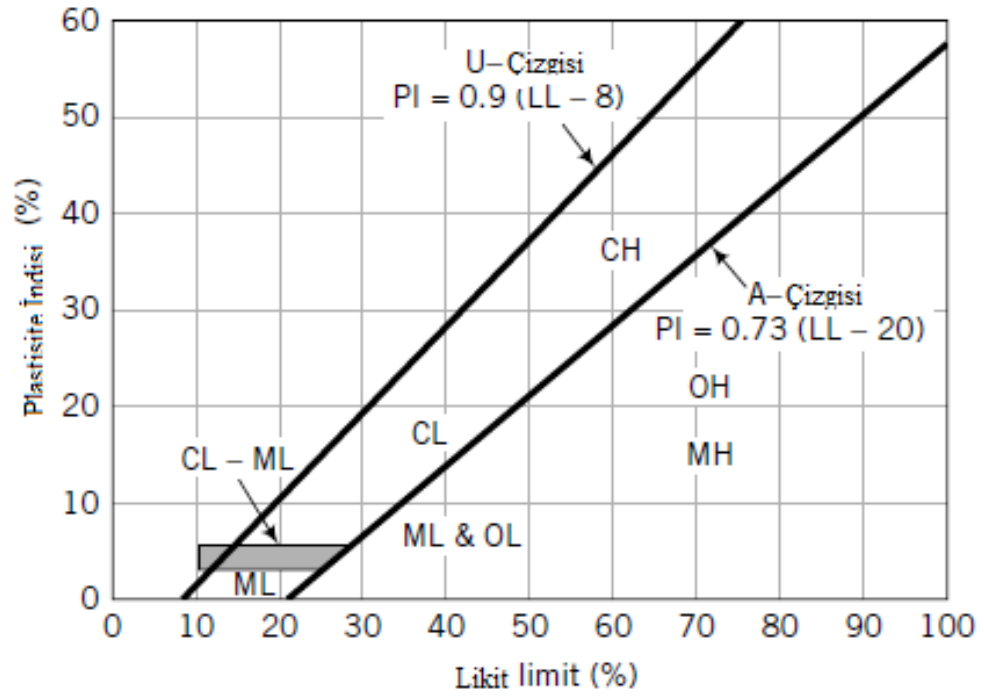
EK D: VanGenuchten'e göre Düzeltilmiş SWCC

EK E: Model Sonuçları

EK A : Taşıma Gücü Katsayıları**Çizelge A. 1 : Taşıma gücü katsayıları**

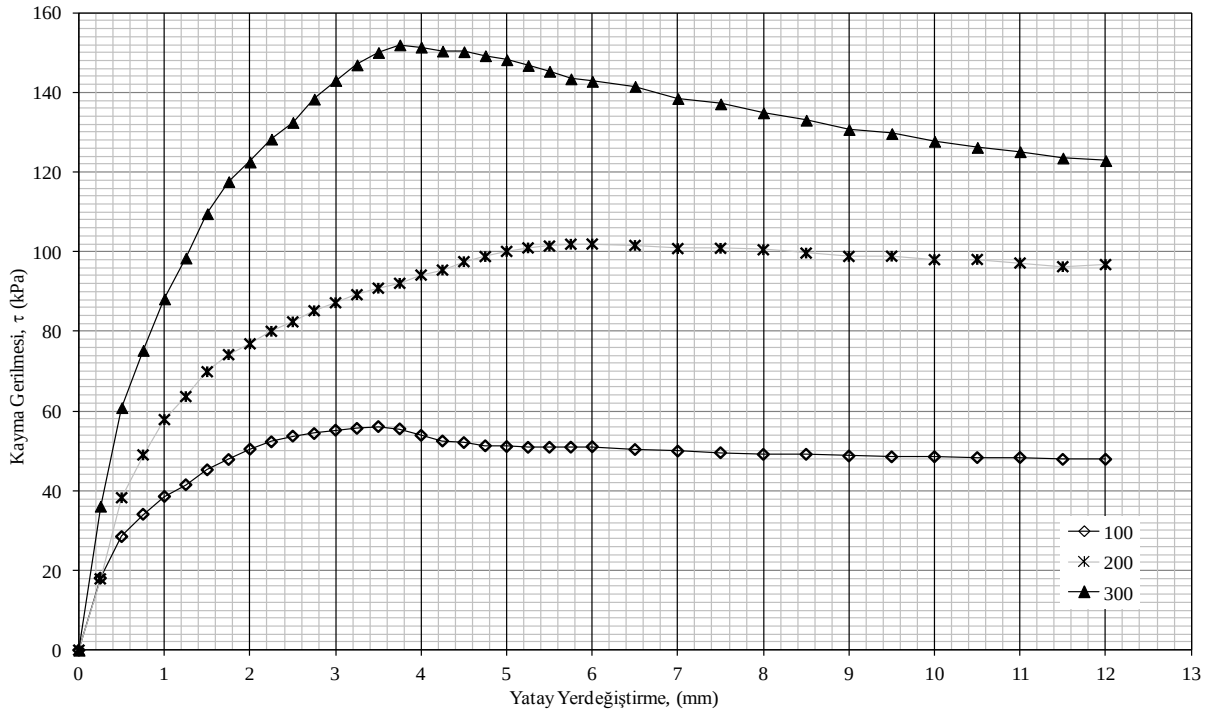
ϕ	Terzaghi (1943)			Hansen, Meyerhof ve Vesic		Hansen (1970)	Meyerhof (1963)	Vesic (1975)
	N_c	N_q	N_δ	N_c	N_q	N_δ	N_δ	N_δ
0	5.7	1.0	0.0	5.14	1.0	0.0	0.0	0.0
5	7.3	1.6	0.5	6.49	1.6	0.1	0.1	0.4
10	9.6	2.7	1.2	8.34	2.5	0.4	0.4	1.2
15	12.9	4.4	2.5	11	3.9	1.2	1.1	2.6
20	17.7	7.4	5	14.8	6.4	2.9	2.9	5.4
25	25.1	12.7	9.7	20.1	10.7	6.8	6.8	12.5
30	37.2	22.5	19.7	30.1	18.4	15.1	15.7	22.4
35	57.8	41.4	42.4	46.4	33.5	34.4	37.6	48.1
40	95.7	51.3	100	75.3	64.1	79.4	93.6	109.3
45	192	173	298	134	135	201	262.3	271.3

EK B : Plastisite Kartı

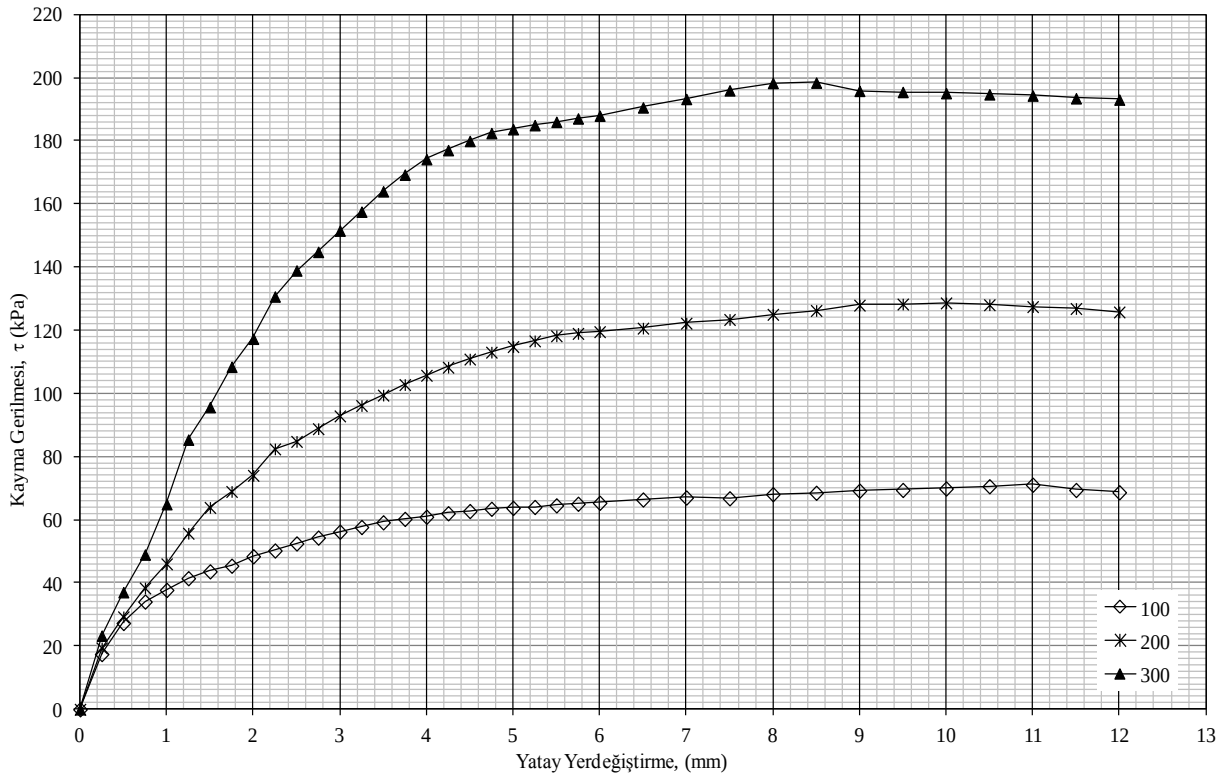


Şekil B. 1: Plastisite kartı

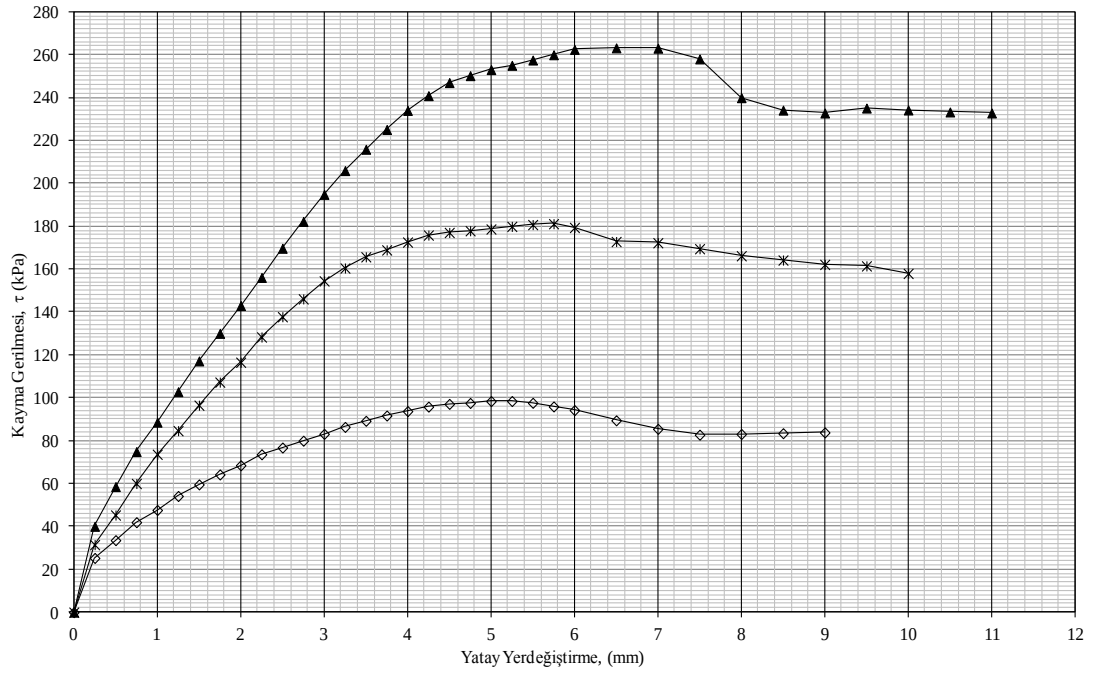
EK C: Kesme Kutusu Deney Sonuçları



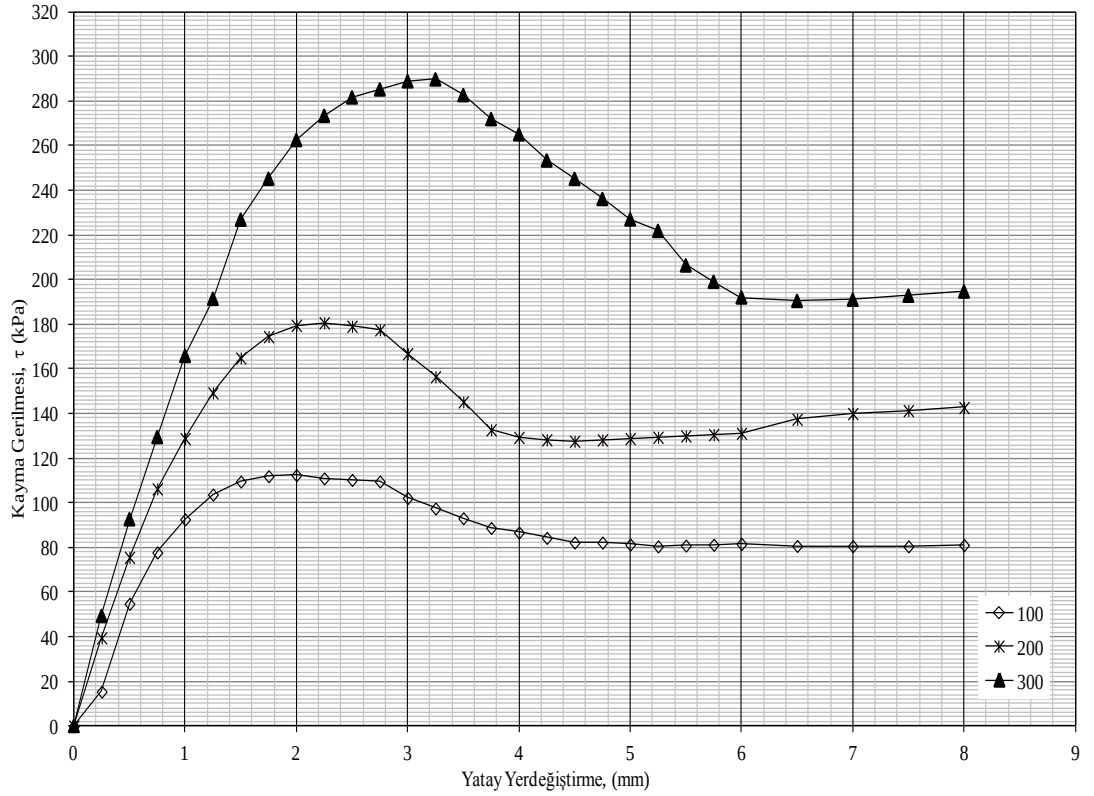
Şekil C. 1: Numune I'ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları



Şekil C. 2: Numune II'ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları

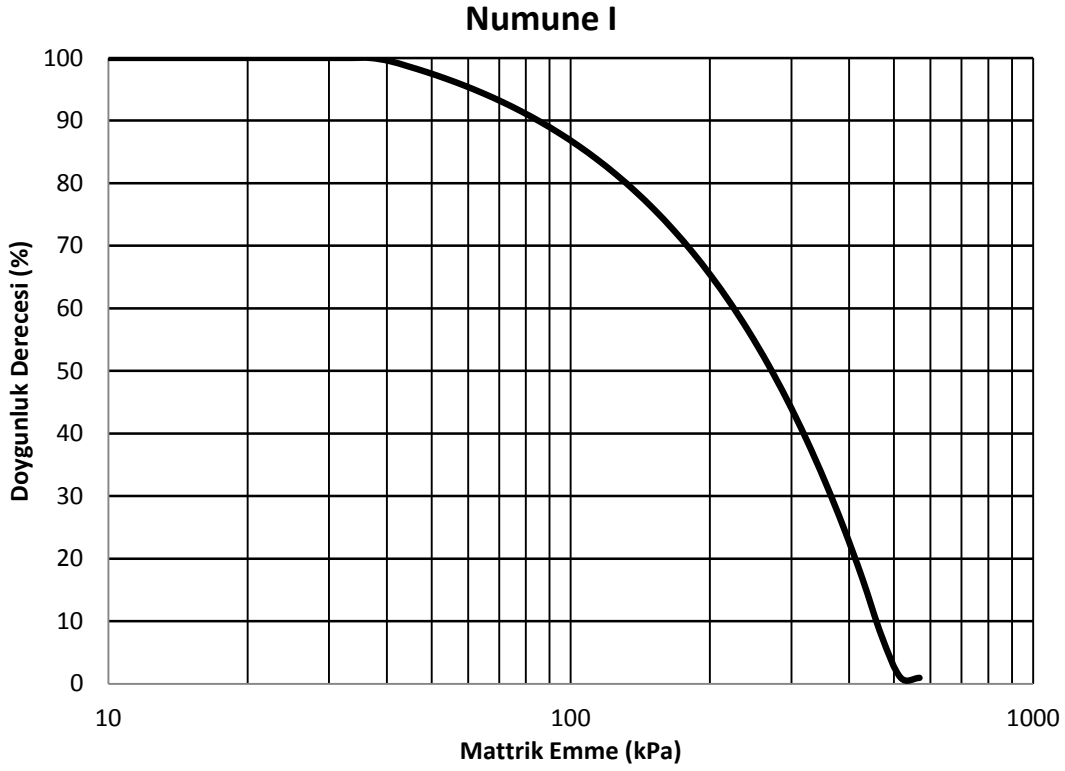


Şekil C. 3: Numune III'e ait kesme kutusu deneyleri sonuçları

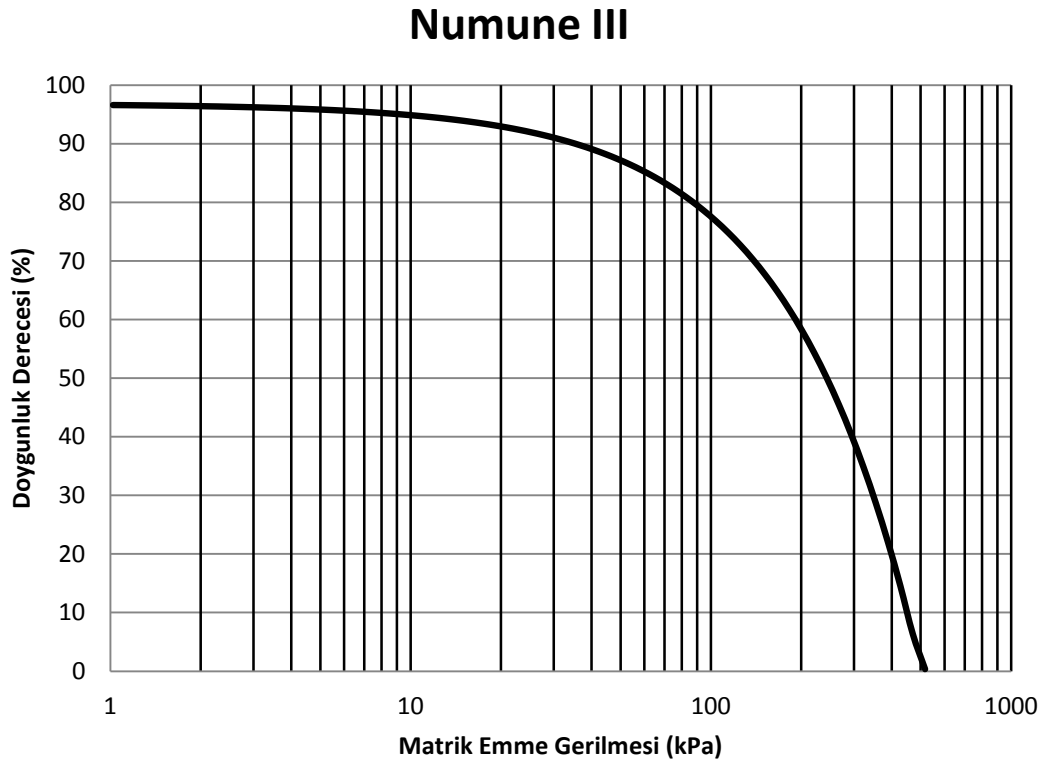


Şekil C. 4: Numune IV'ye ait kesme kutusu deneyleri sonuçları

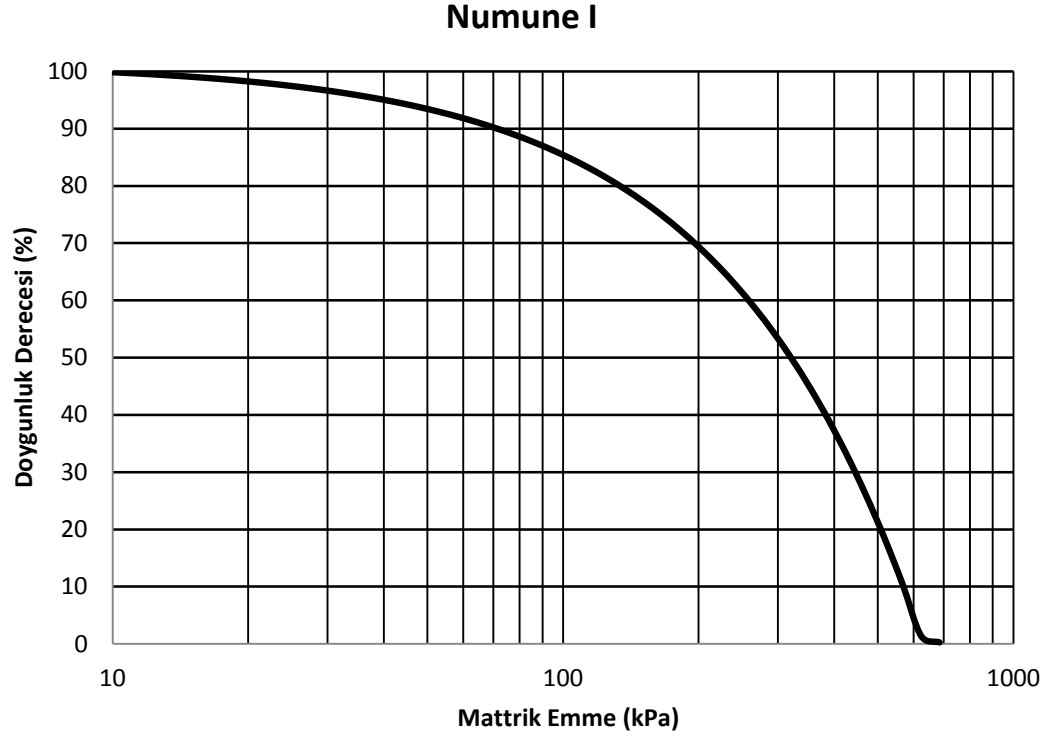
EK D: VanGenuchten'e göre düzeltilmiş SWCC



Şekil D. 1: Numune I'e ait düzeltilmiş SWCC

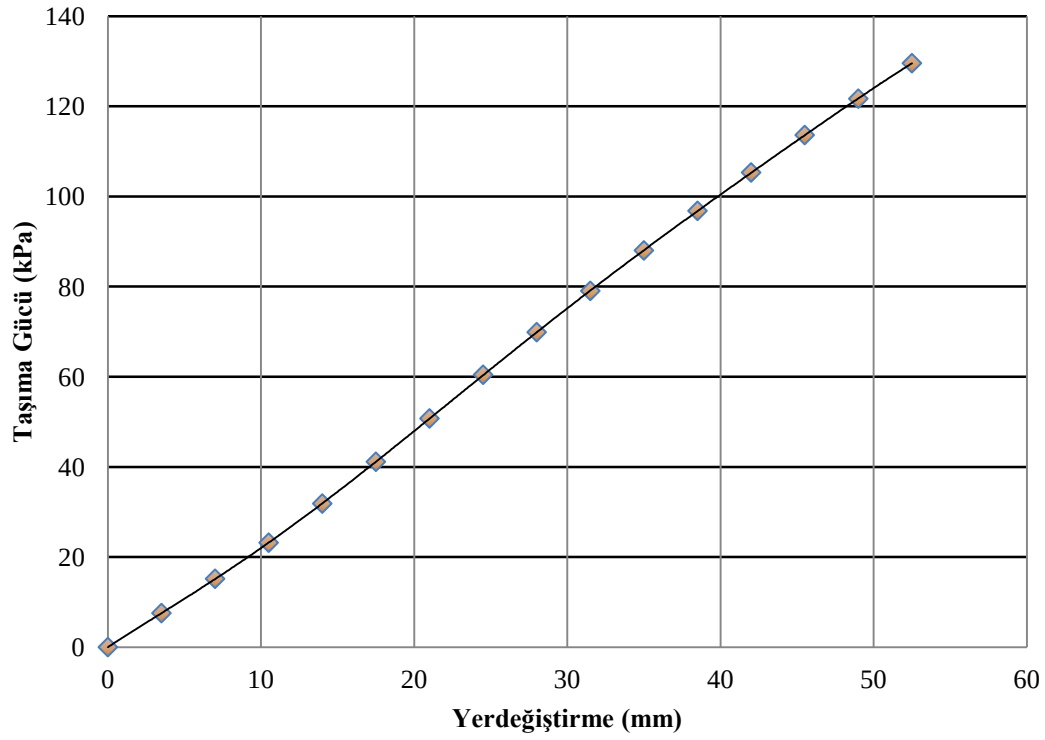


Şekil D. 2: Numune III'ye ait düzeltilmiş SWCC

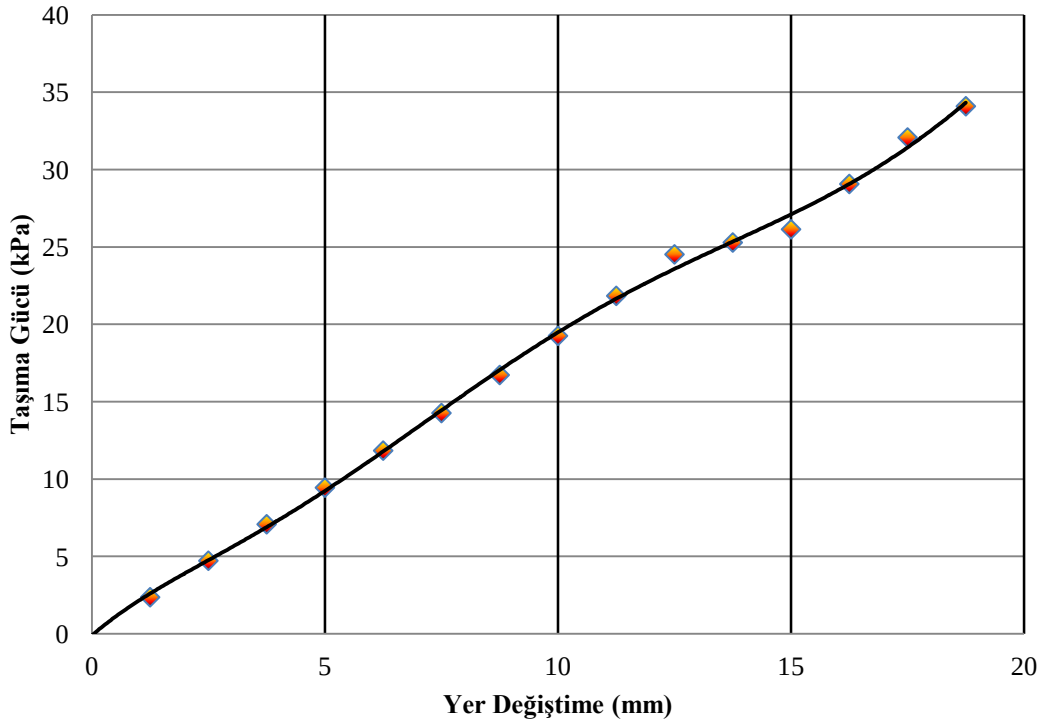


Şekil D. 3: Numune VI'e ait düzeltilmiş SWCC

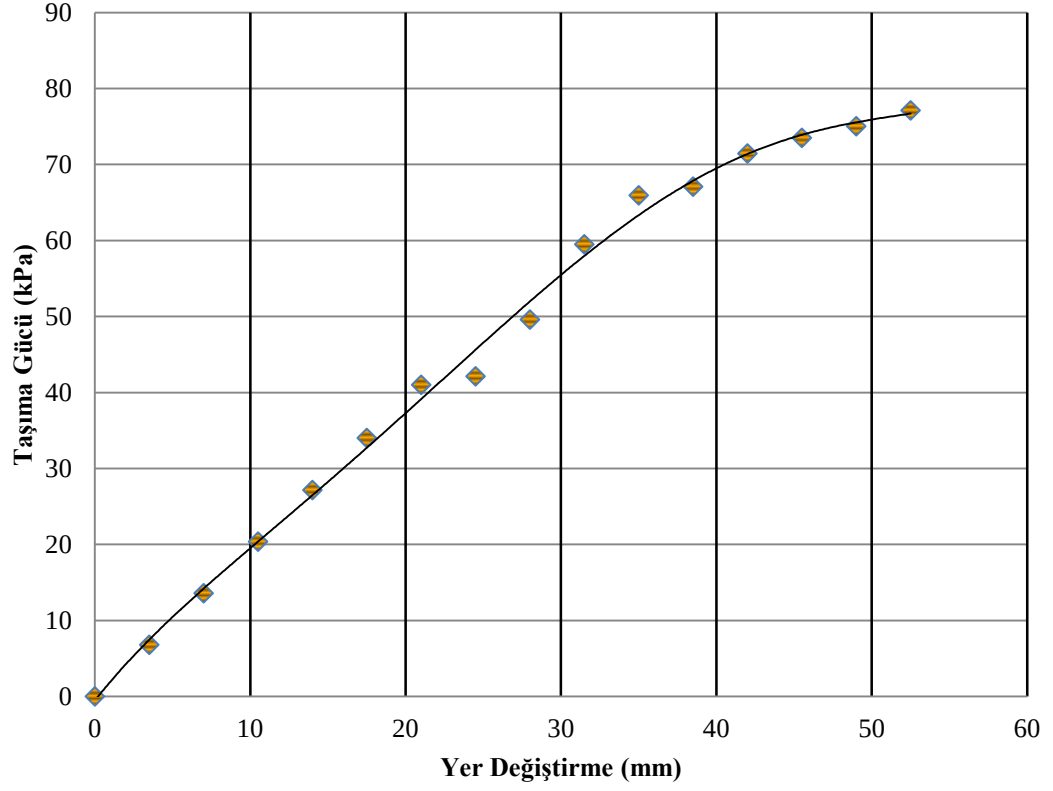
EK E: Model Sonuçları



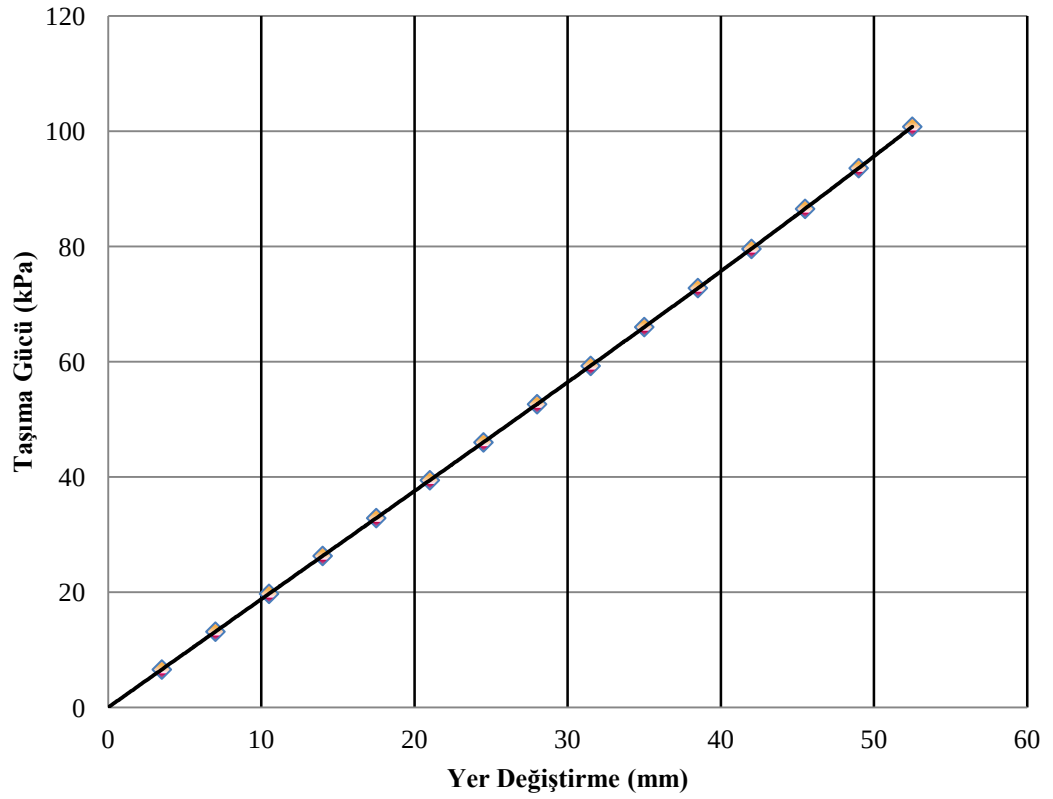
Şekil E. 1 : Numune I' e ait dairesel tamamen kuru modelin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği



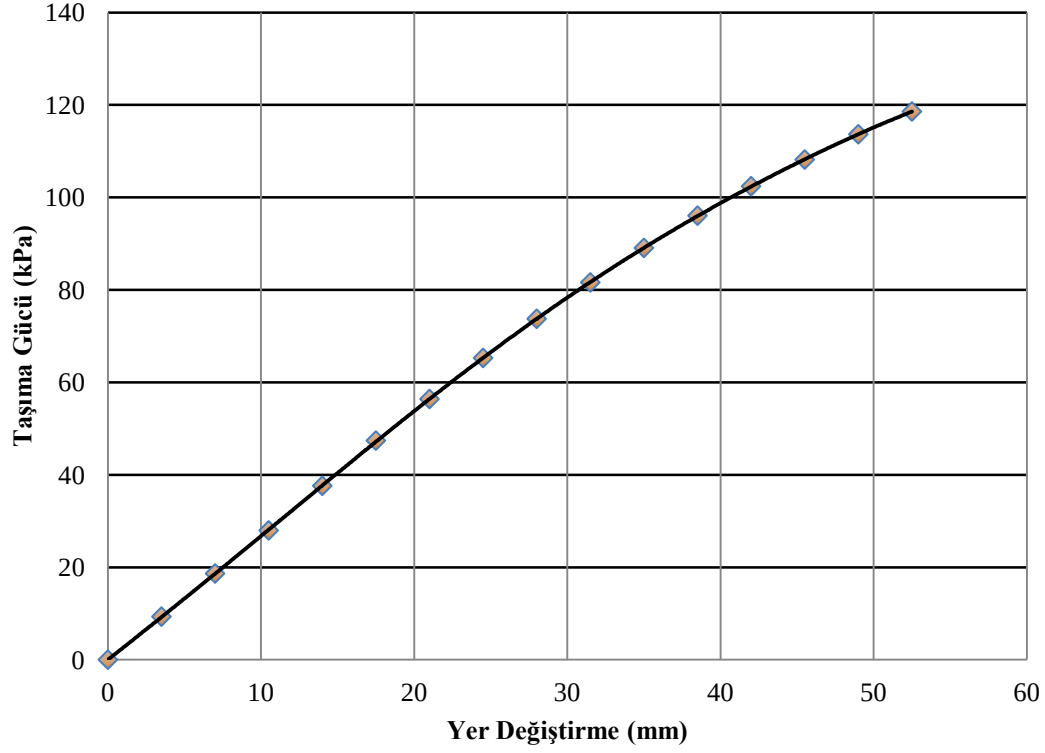
Şekil E. 2: Numune I' e ait dairesel doymuş modelin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği



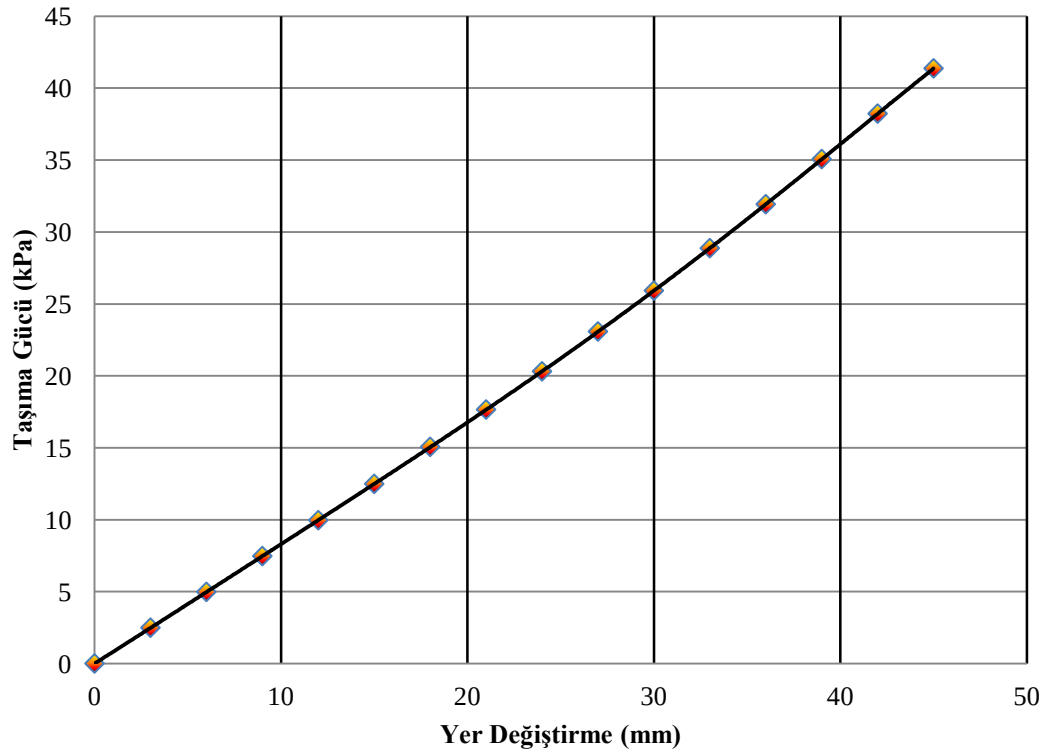
Şekil E. 3 : Numune I' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS B



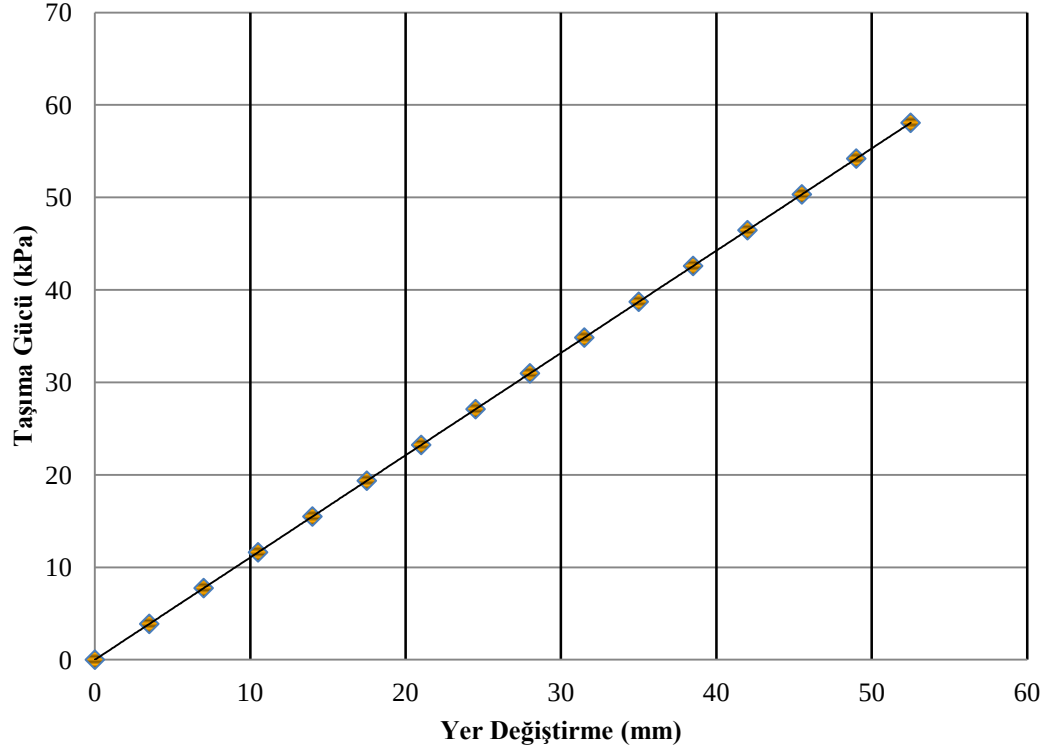
Şekil E. 4 : Numune I' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS 2B



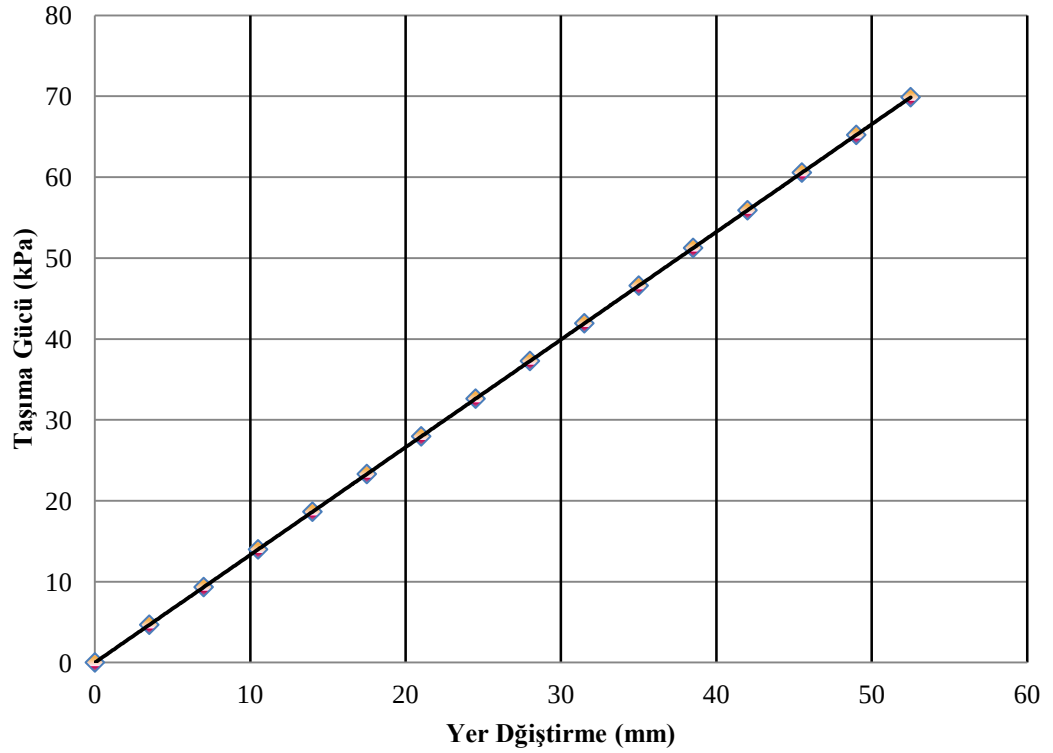
Şekil E. 5 : Numune I' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



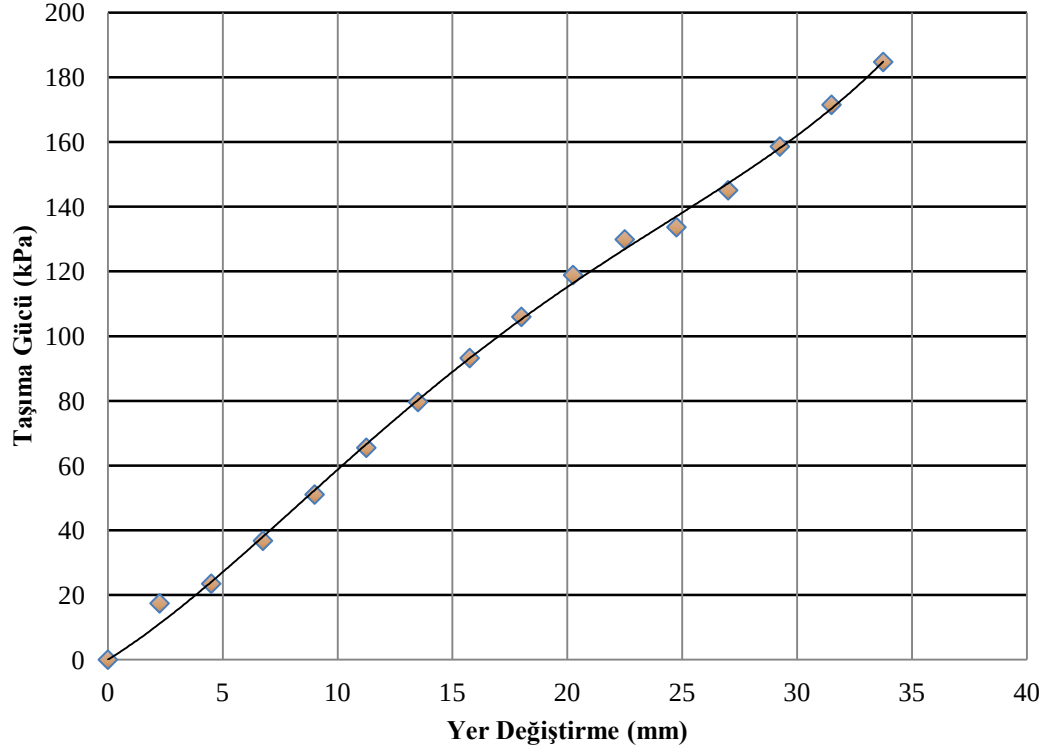
Şekil E. 6 : Numune I' e ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



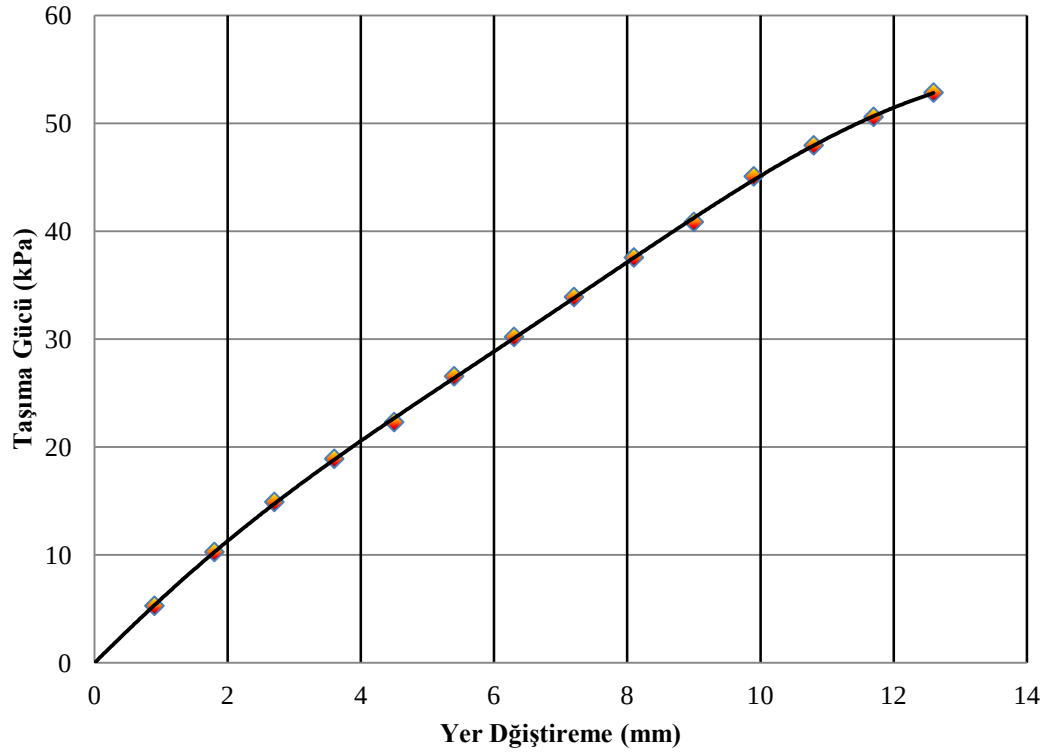
Şekil E. 7 : Numune I' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS 2B



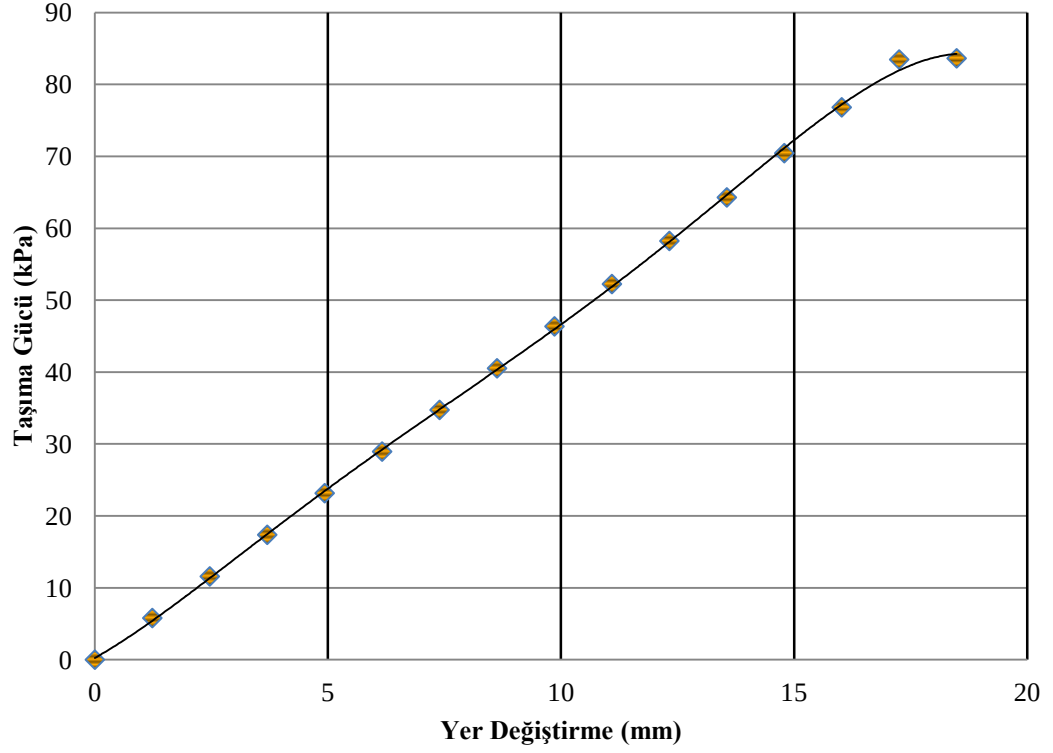
Şekil E. 8 : Numune I' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS B



Şekil E. 9 : Numune II' e ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



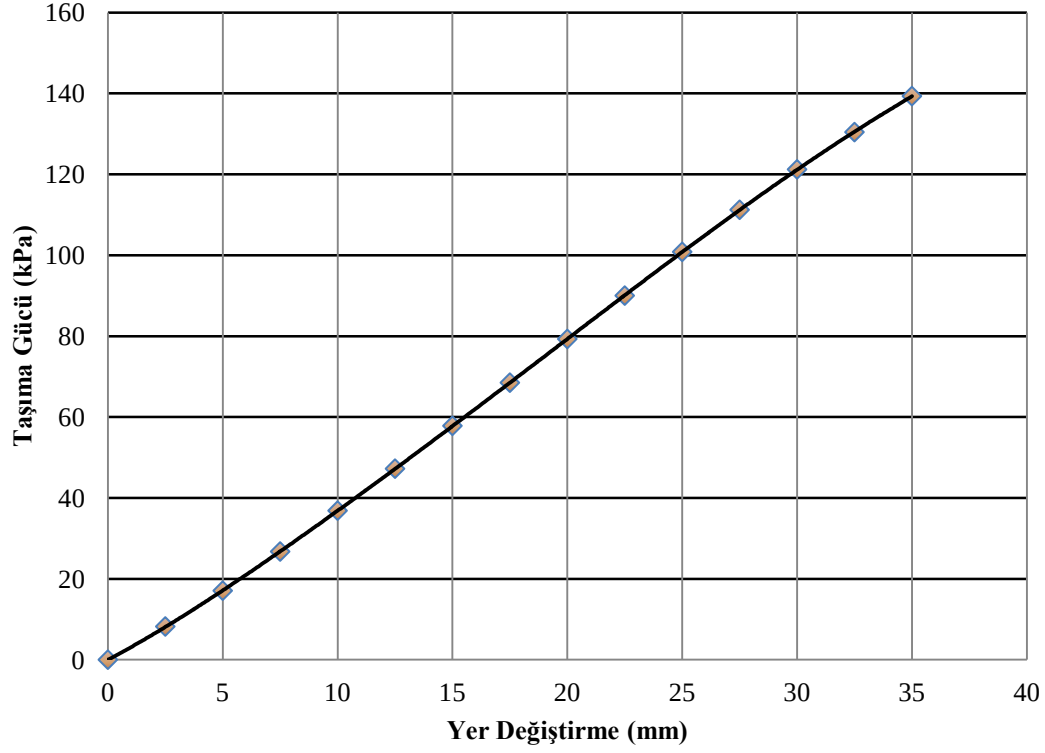
Şekil E. 10 : Numune II' e ait dairesel doygun modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



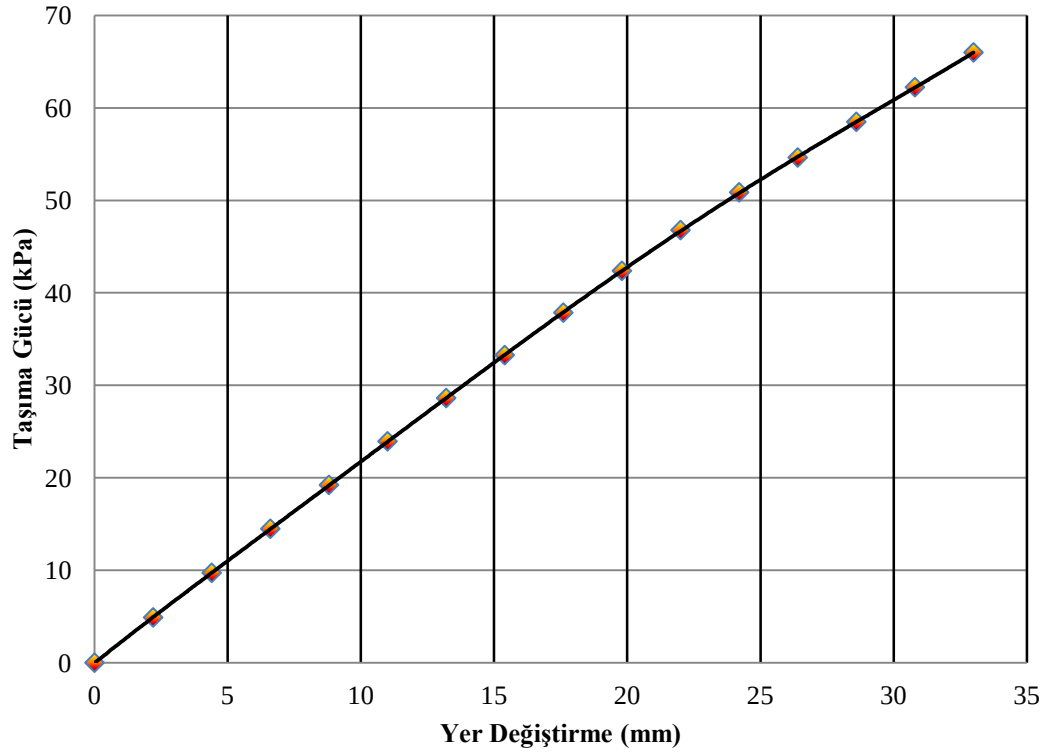
Şekil E. 11 : Numune II' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS B



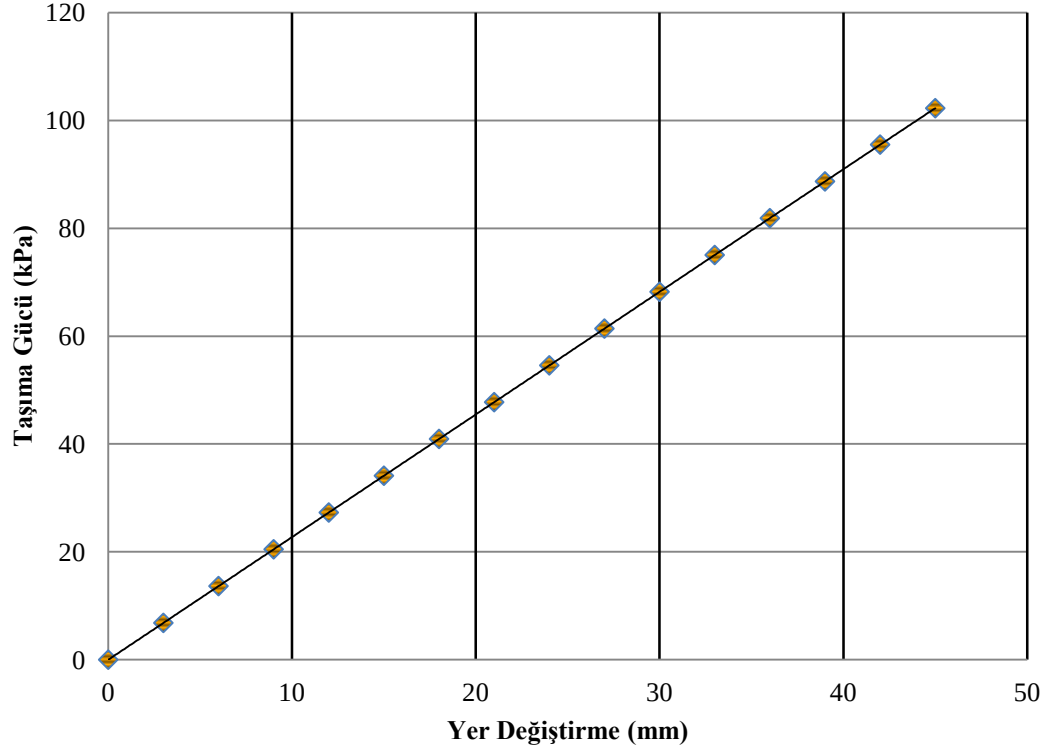
Şekil E. 12 : Numune II' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS 2B



Şekil E. 13 : Numune II' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



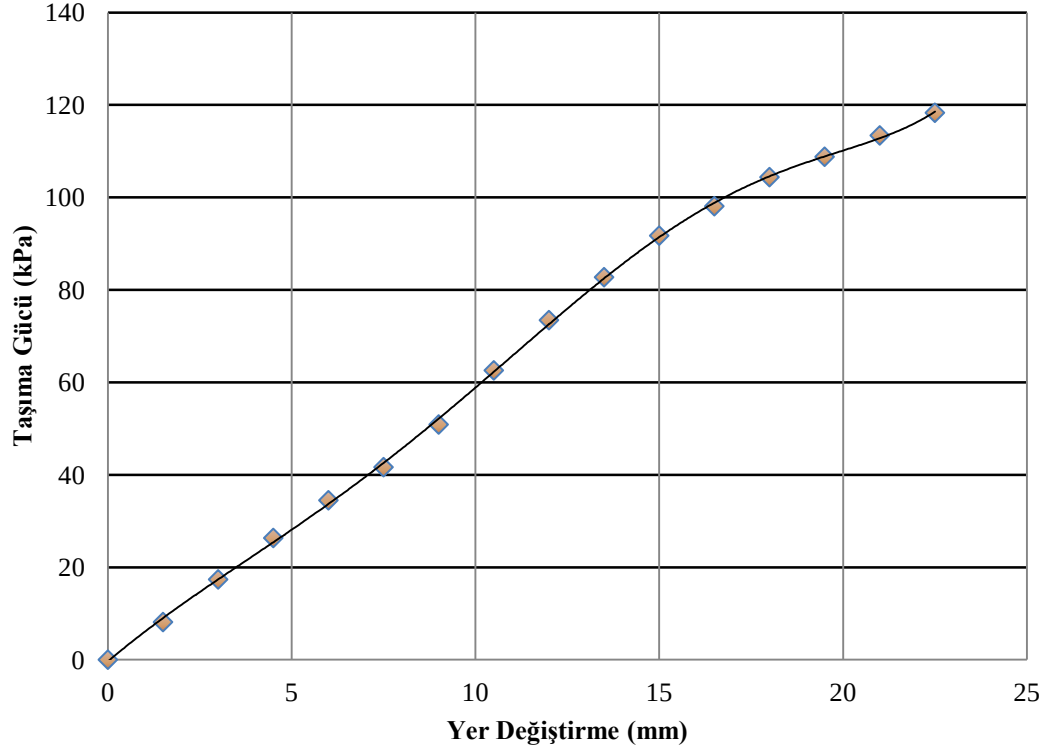
Şekil E. 14 : Numune II' e ait şerit doymun modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



Şekil E. 15 : Numune II' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B

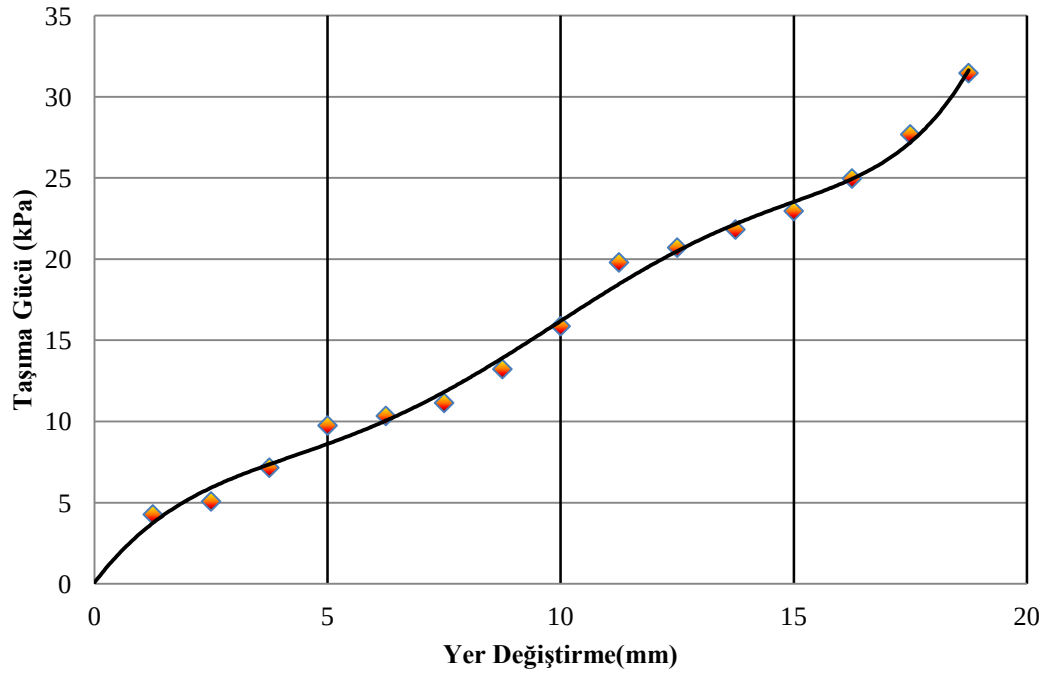


Şekil E. 16 : Numune II' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B

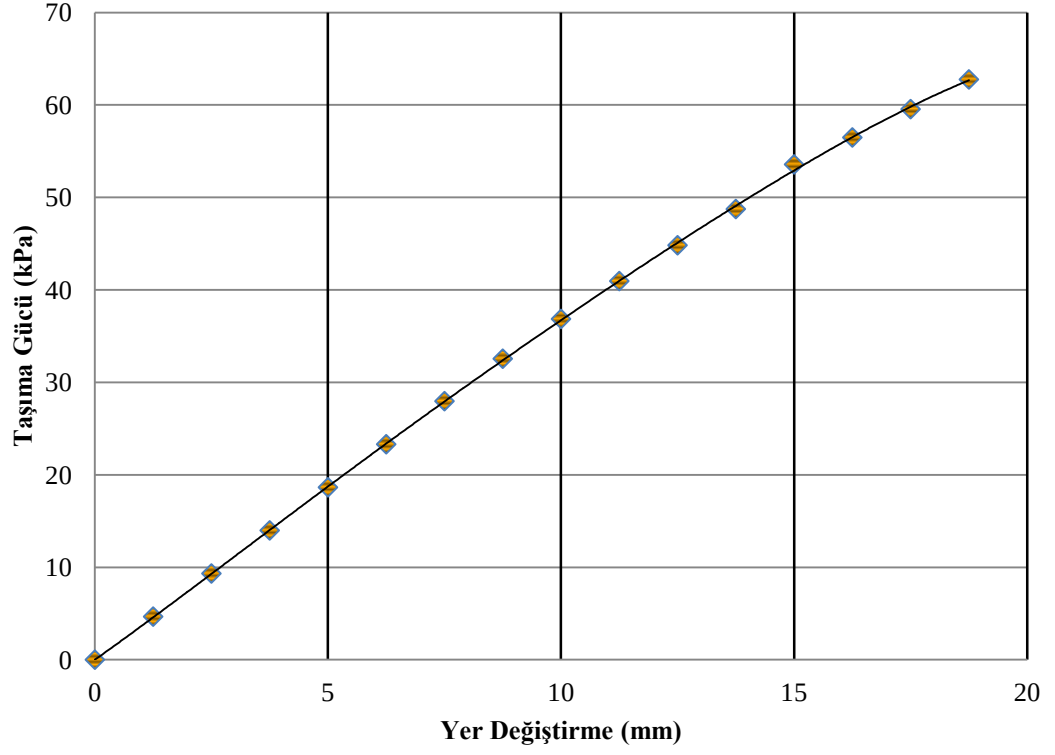


Şekil E. 17 : Numune III' e ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği

Numune III



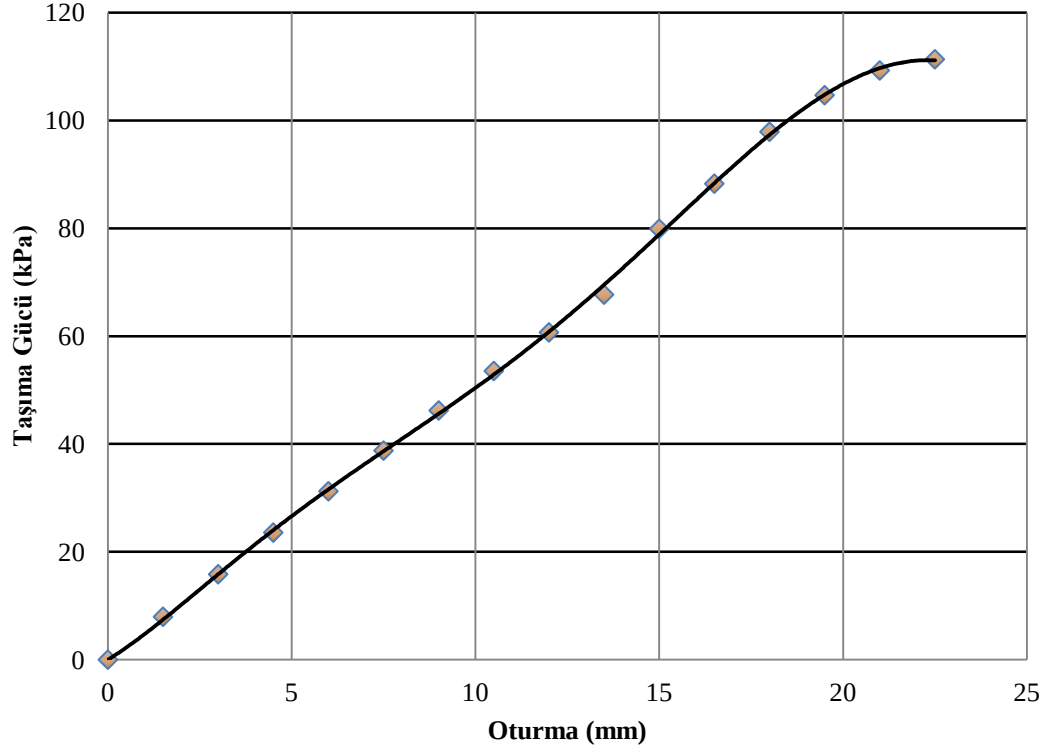
Şekil E. 18 : Numune III' e ait dairesel doymun modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği



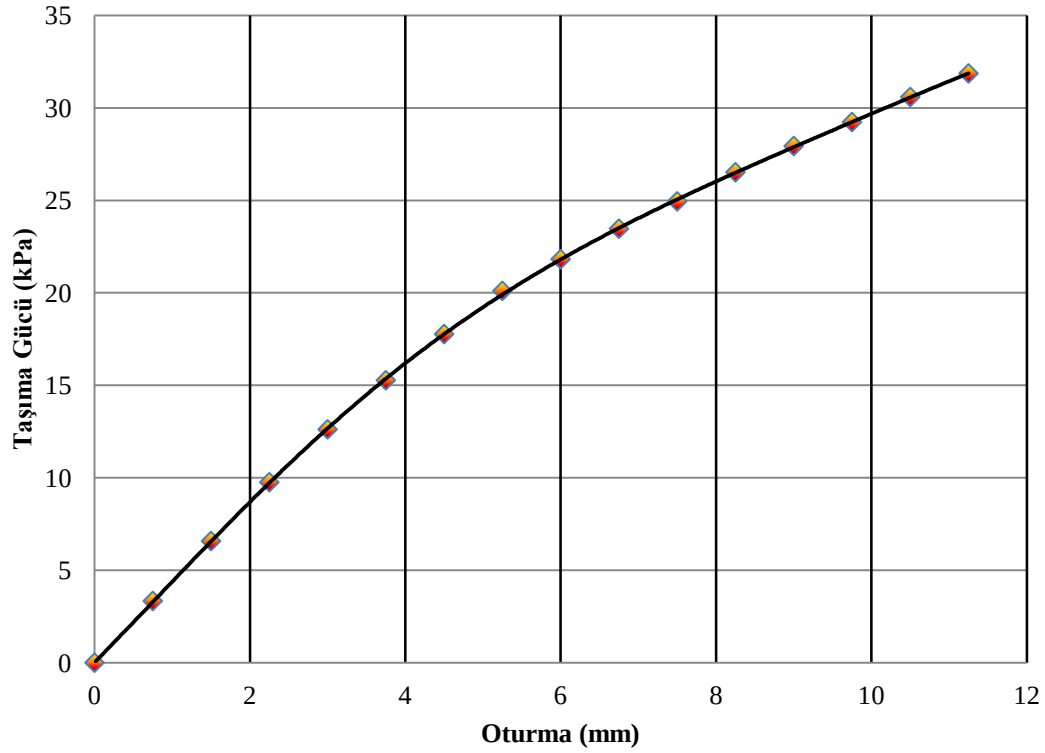
Şekil E. 19 : Numune III' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B



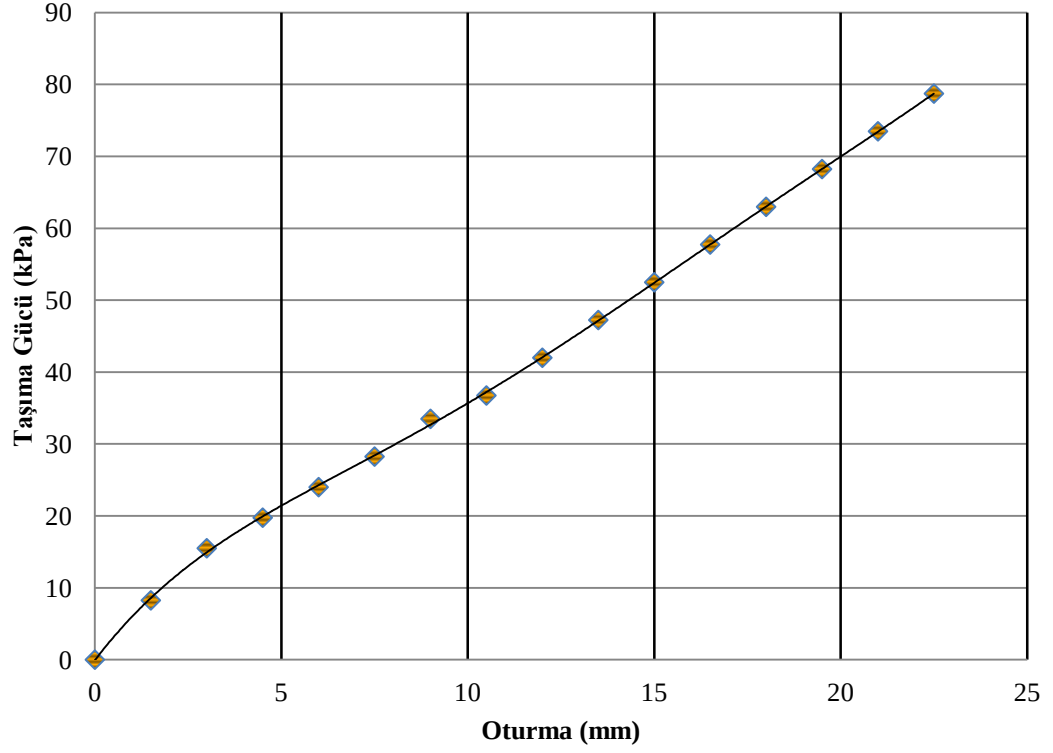
Şekil E. 20 : Numune III' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B



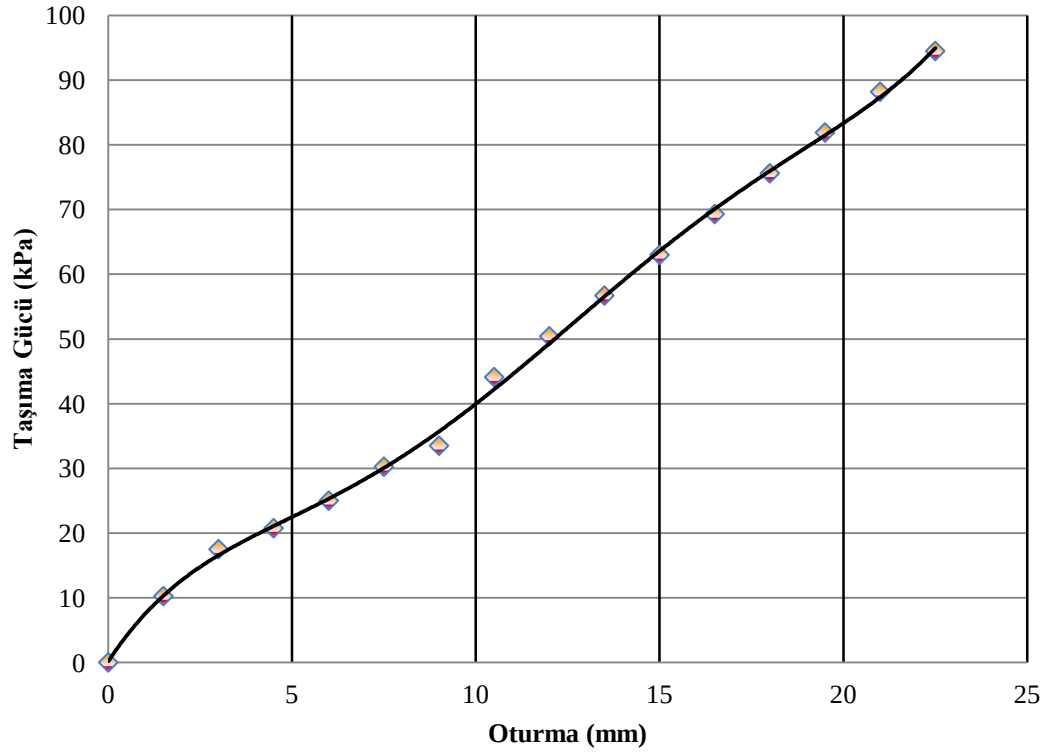
Şekil E. 21 : Numune III' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değıştirme grafiğı



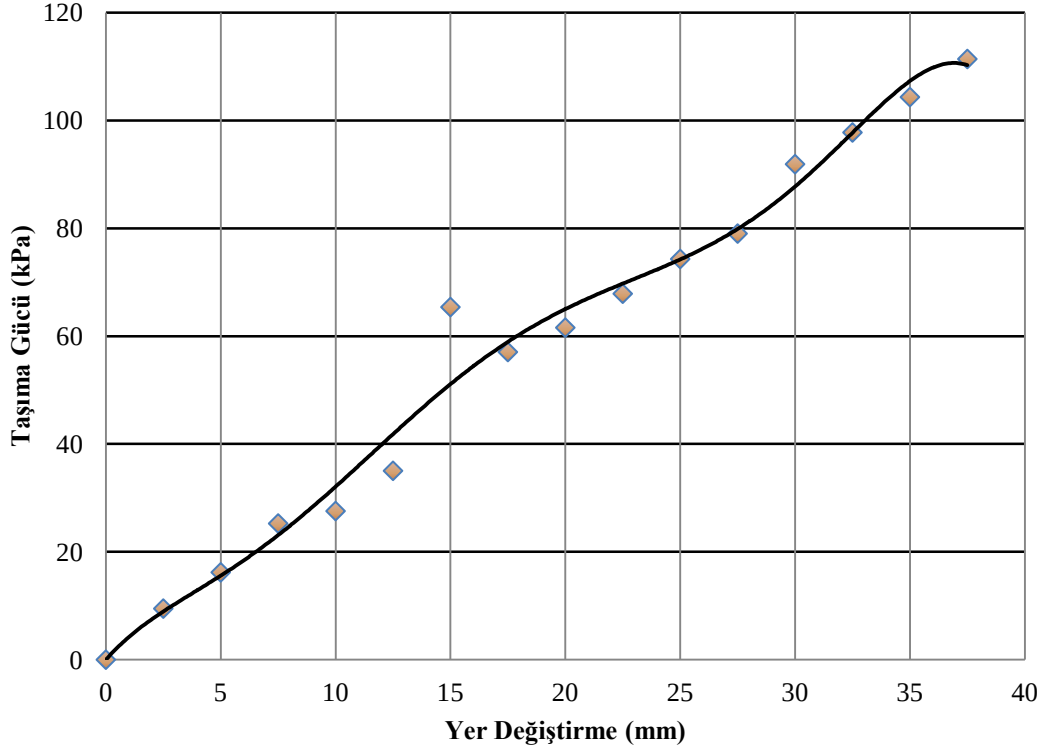
Şekil E. 22 : Numune III' e ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değıştirme grafiğı



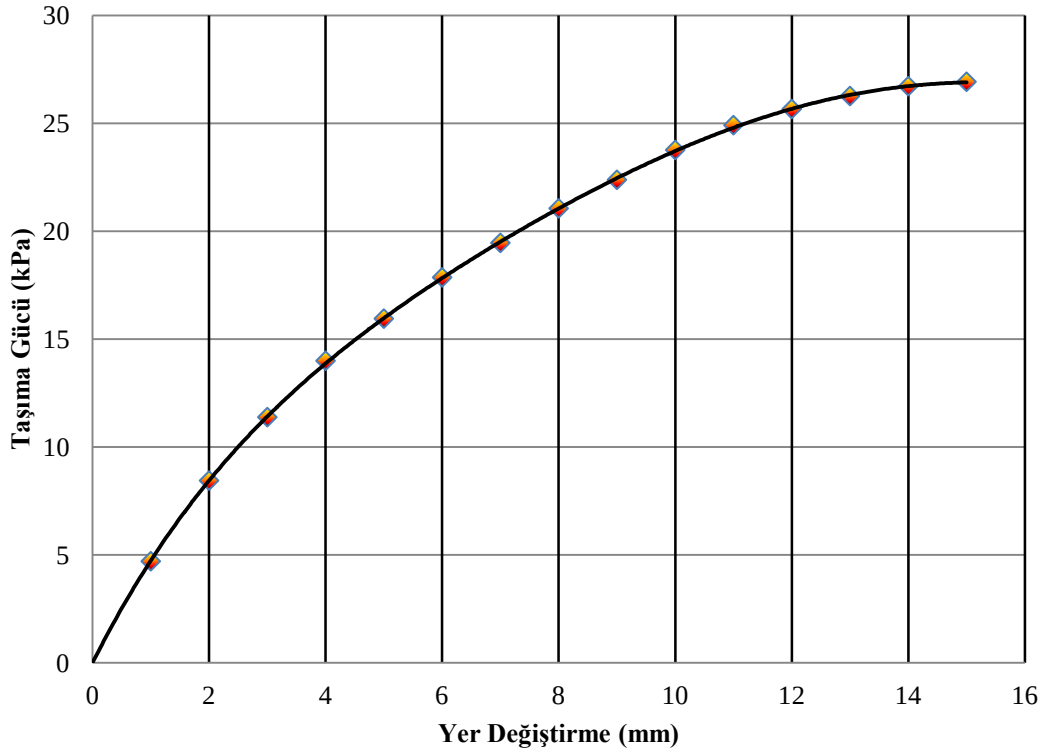
Şekil E. 23 : Numune III' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değıştirme grafiğı YASS B



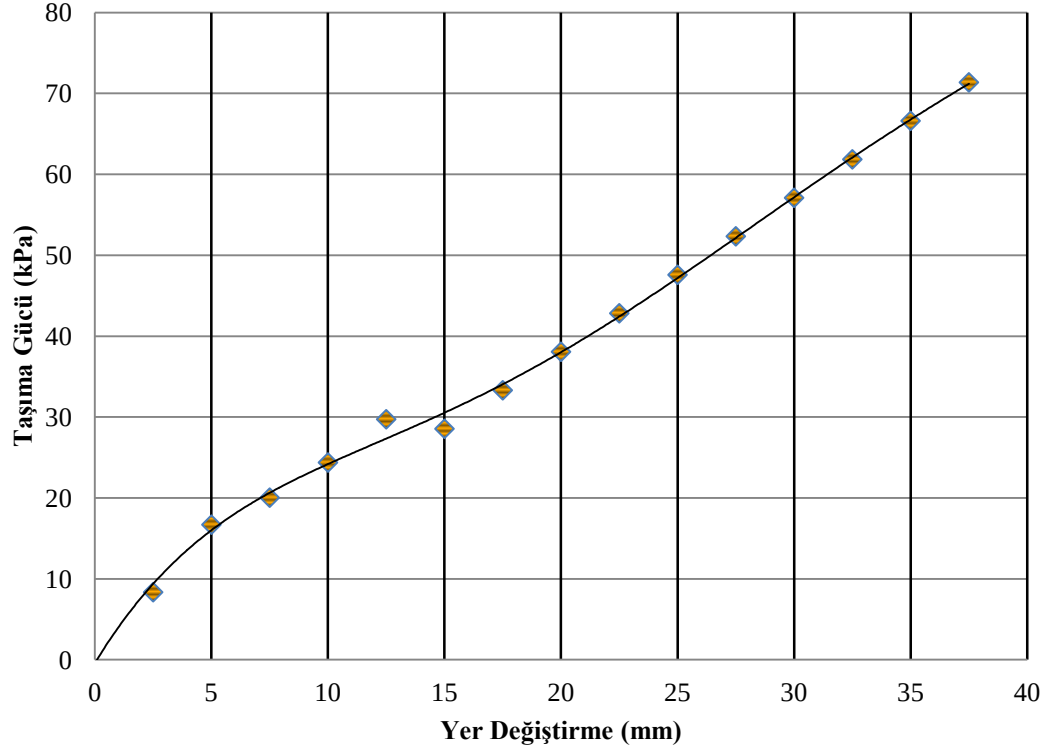
Şekil E. 24 : Numune III' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değıştirme grafiğı YASS 2B



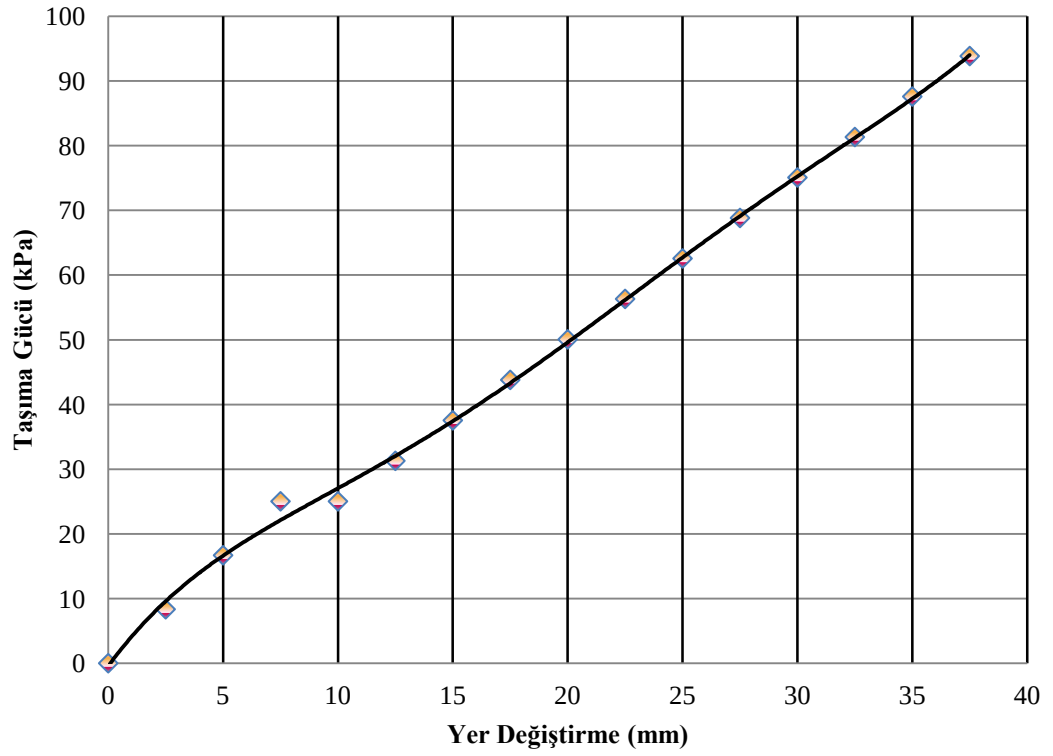
Şekil E. 25 : Numune IV' e ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



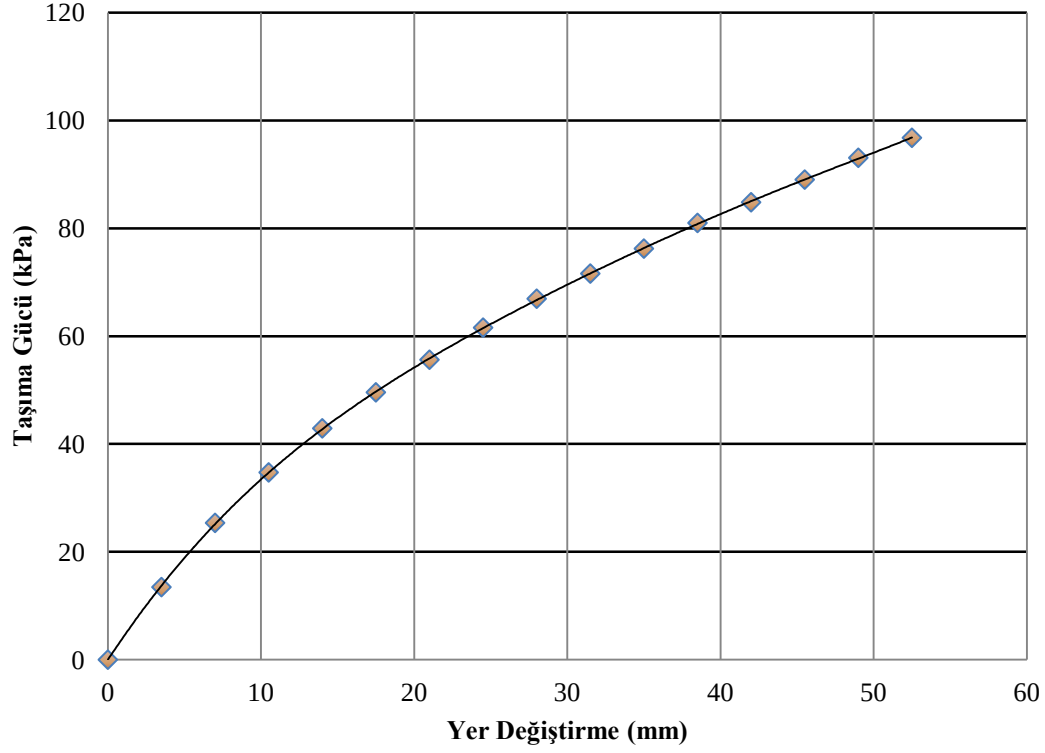
Şekil E. 26 : Numune IV' e ait dairesel doymun modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



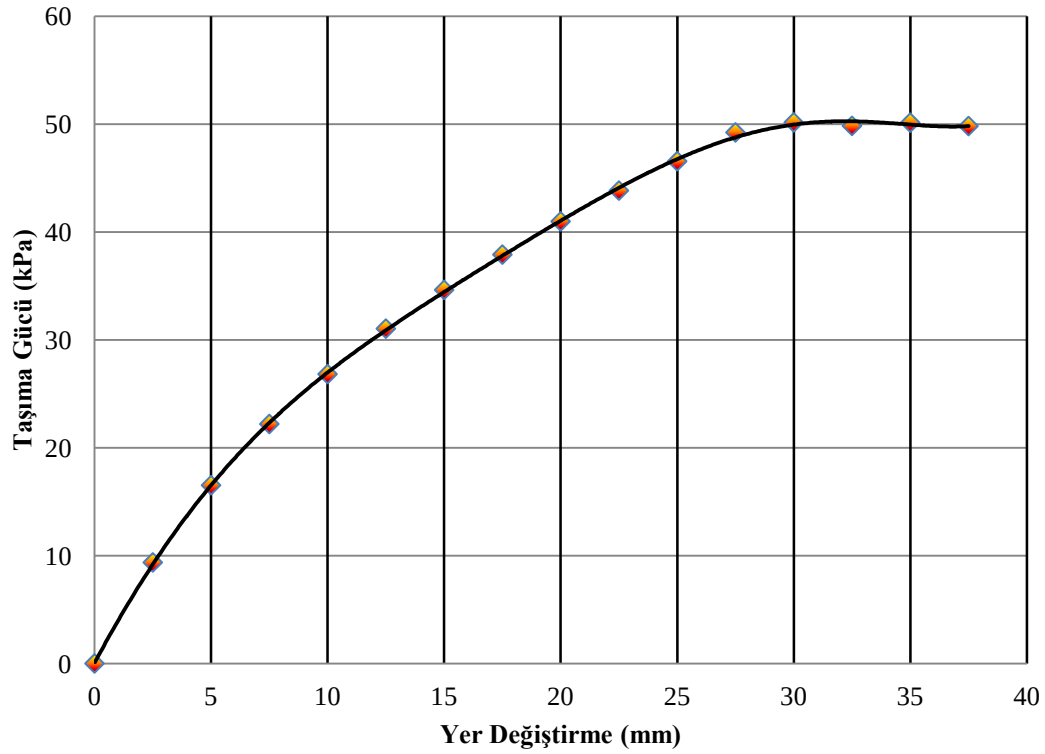
Şekil E. 27 : Numune IV' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS B



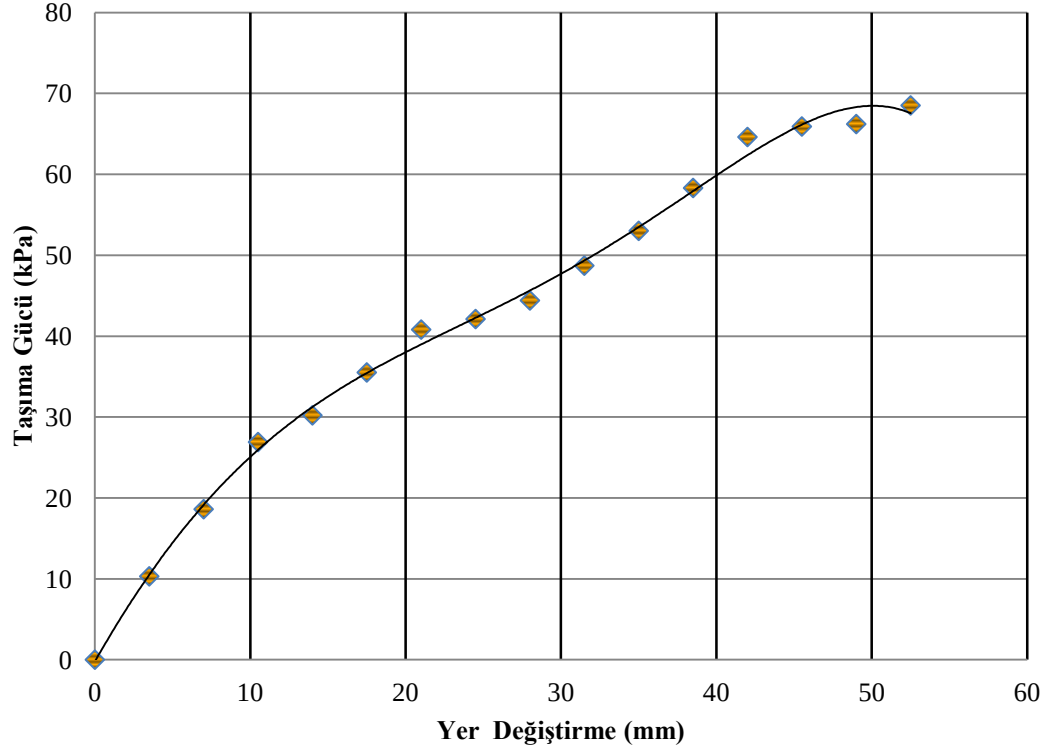
Şekil E. 28 : Numune IV' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS 2B



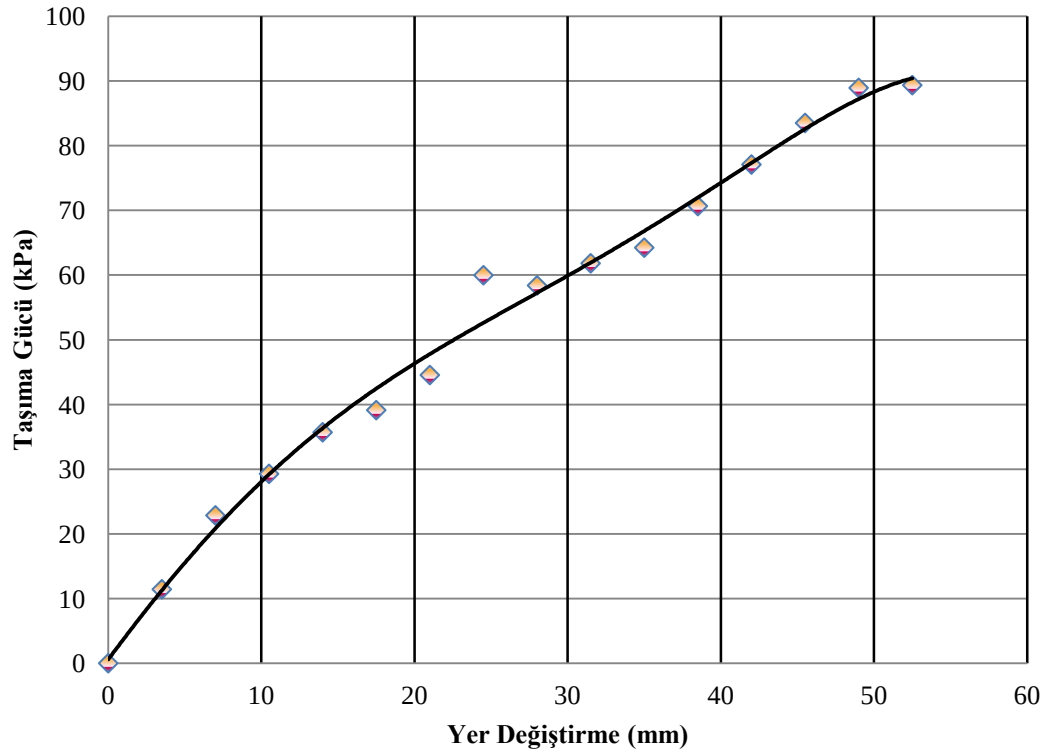
Şekil E. 29 : Numune IV' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



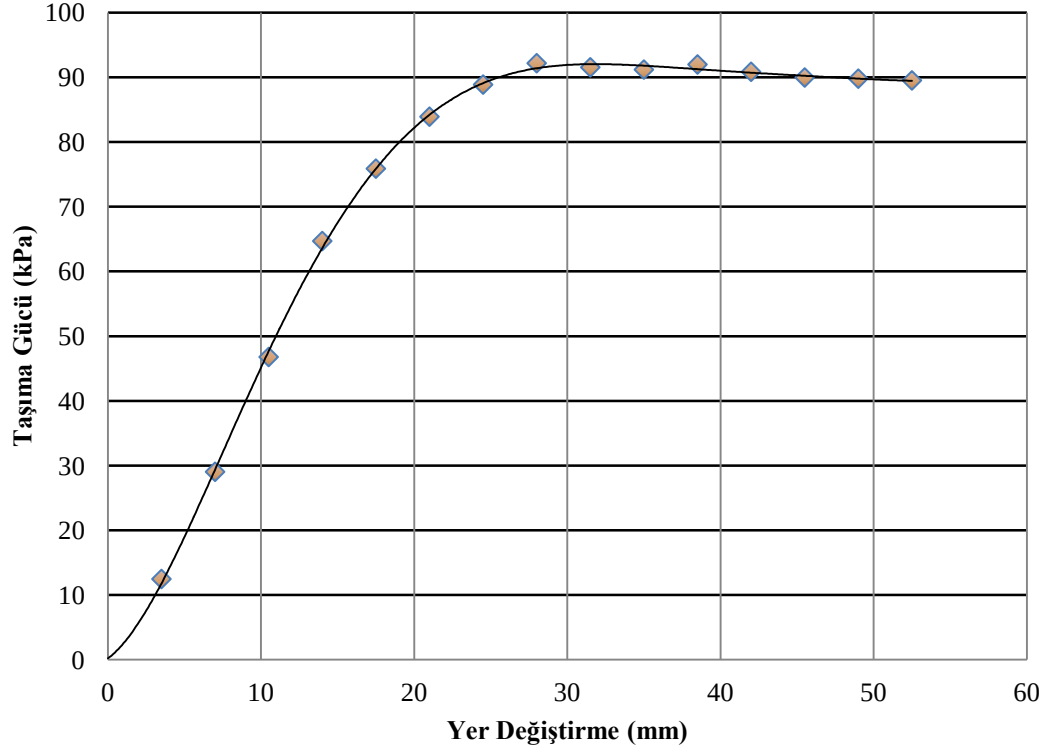
Şekil E. 30 : Numune IV' e ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



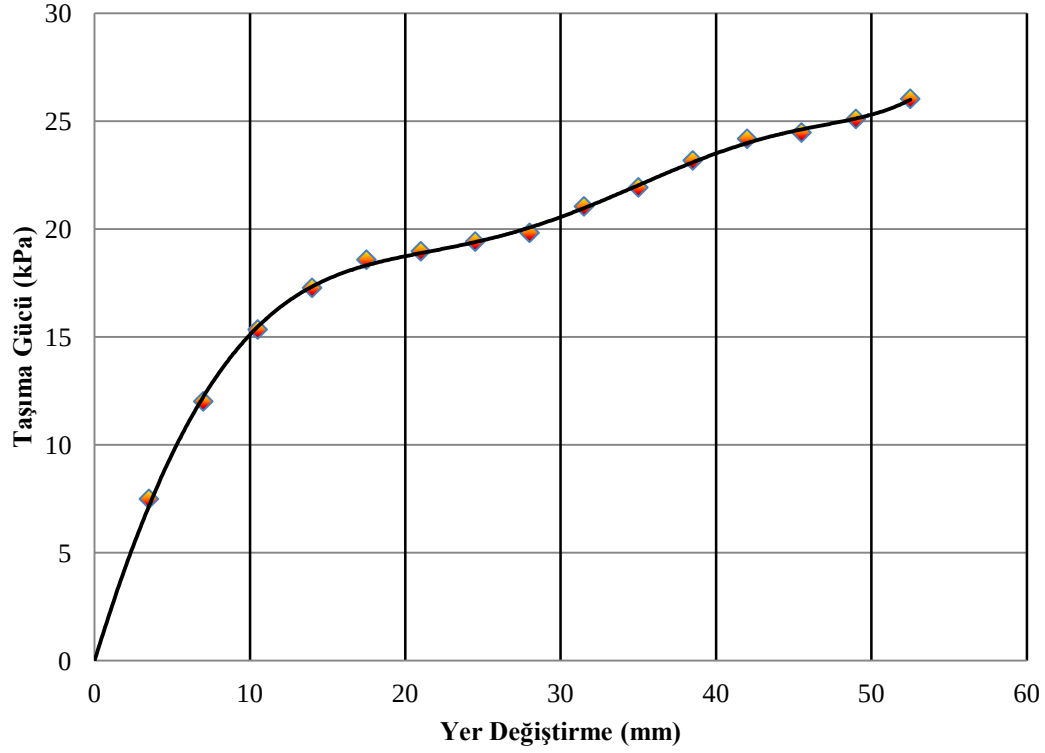
Şekil E. 31 : Numune IV' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B



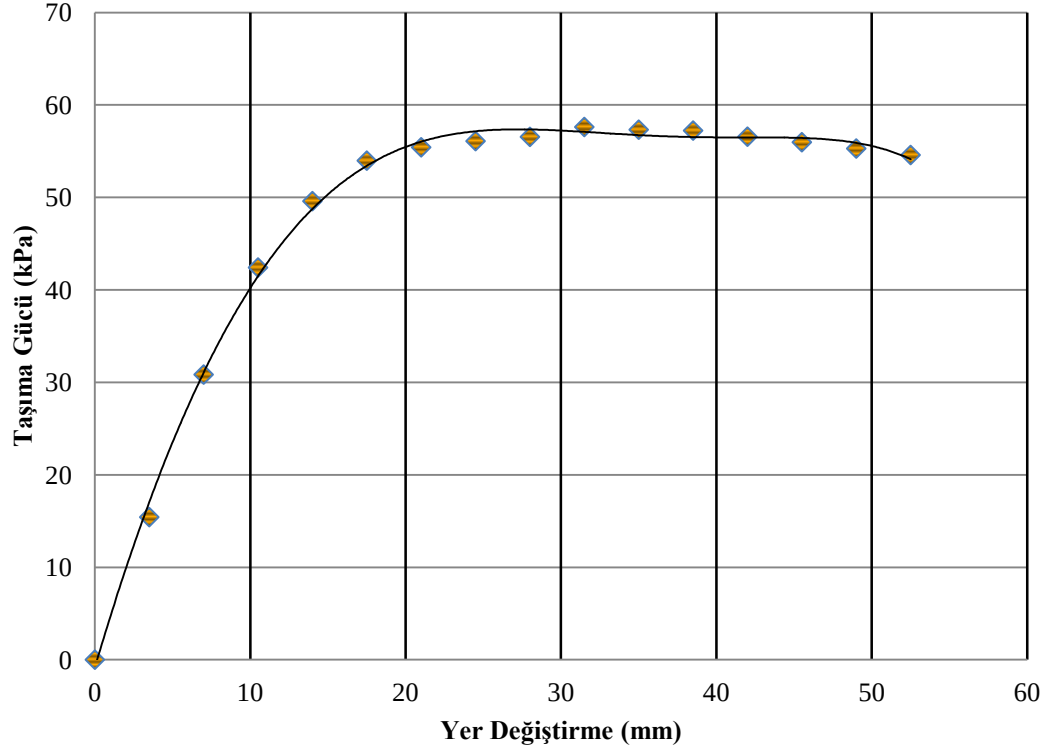
Şekil E. 32 : Numune IV' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B



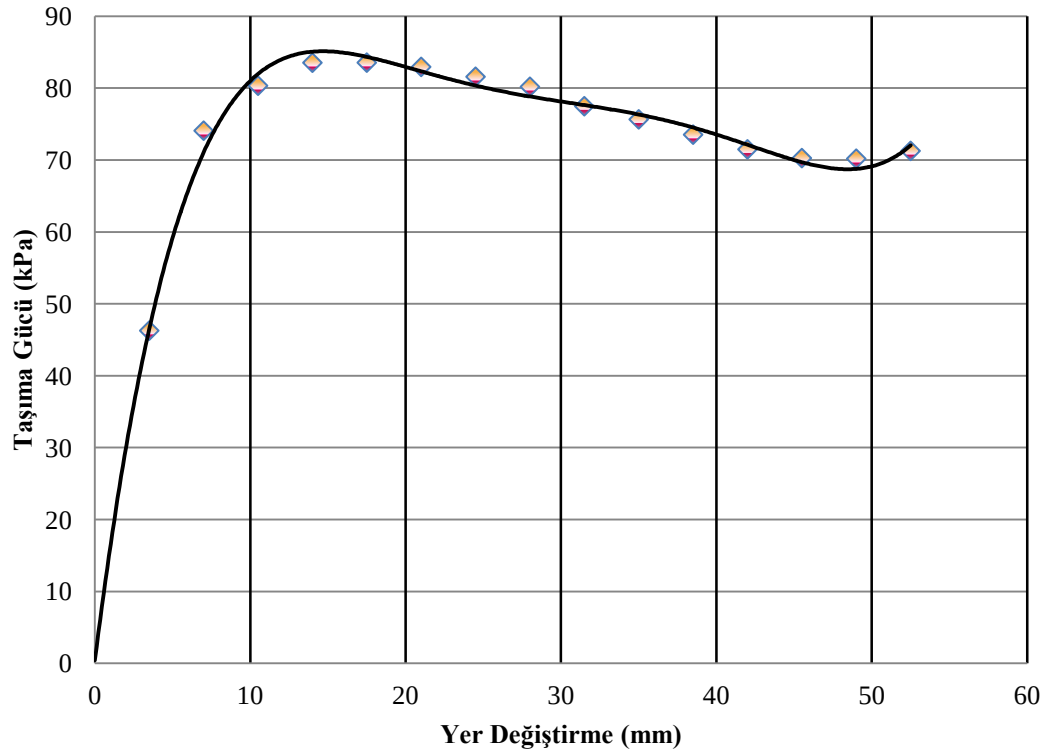
Şekil E. 33 : Numune V' e ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



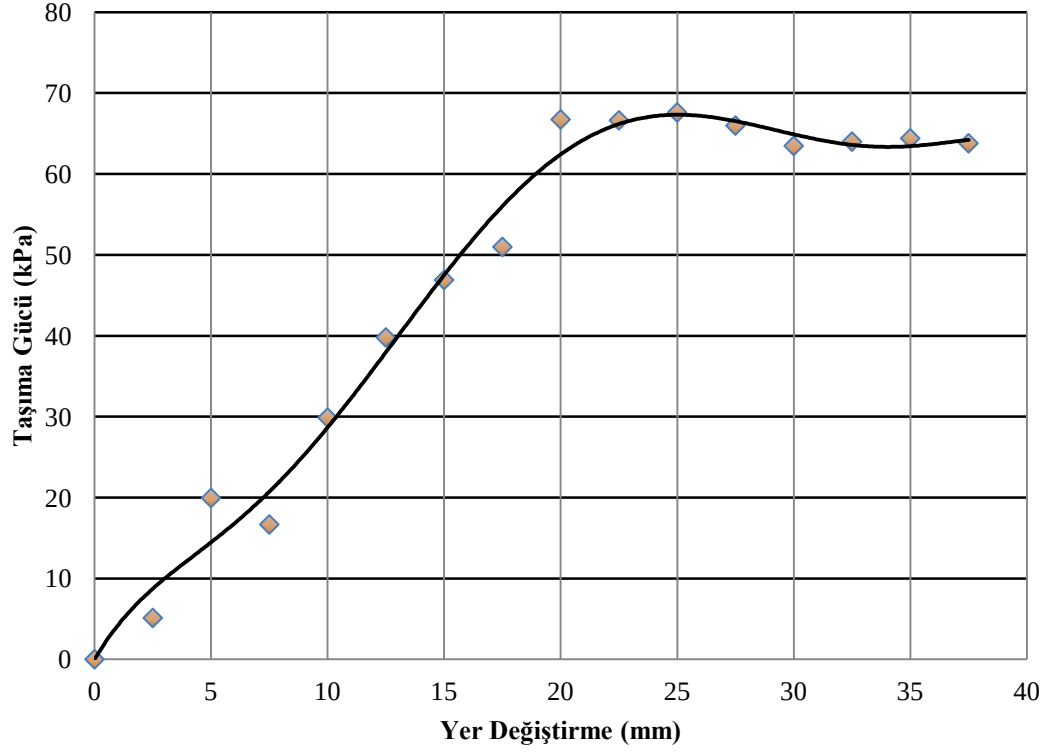
Şekil E. 34 : Numune V' e ait dairesel doymun modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



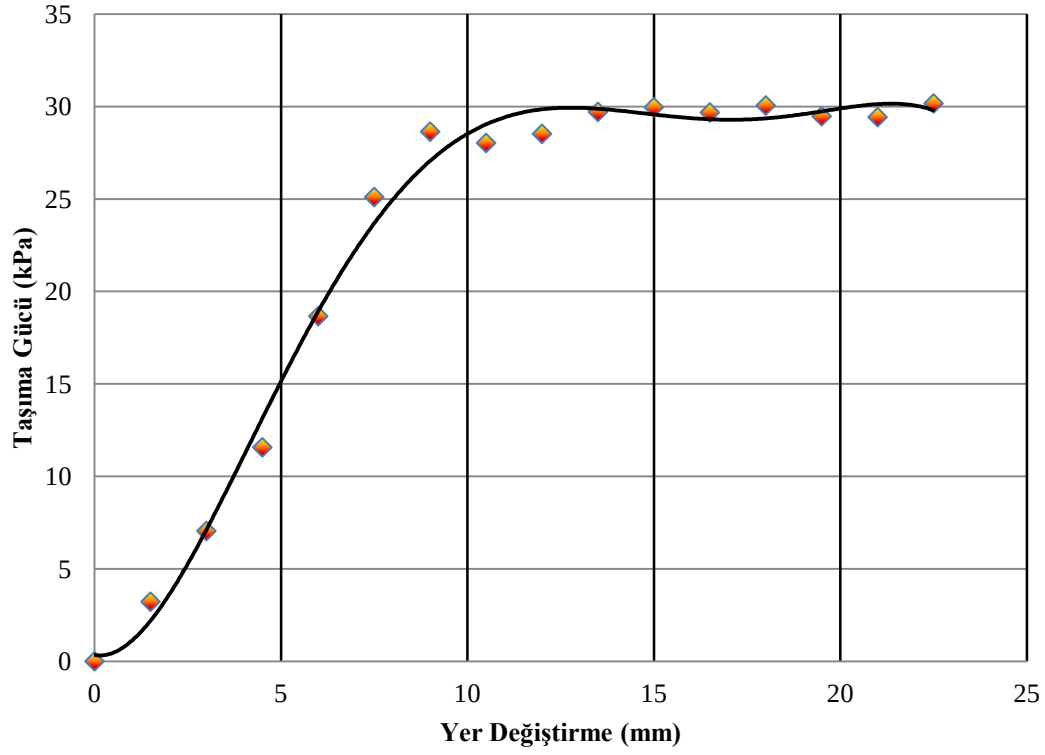
Şekil E. 35 : Numune V' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B



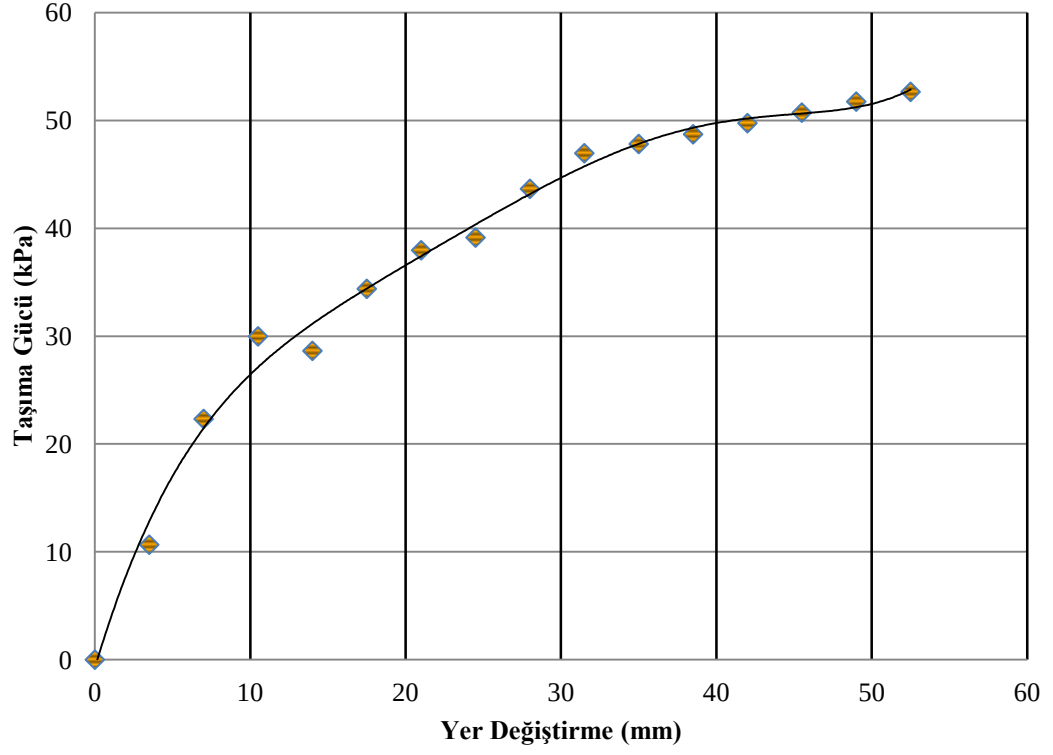
Şekil E. 36 : Numune V' e ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B



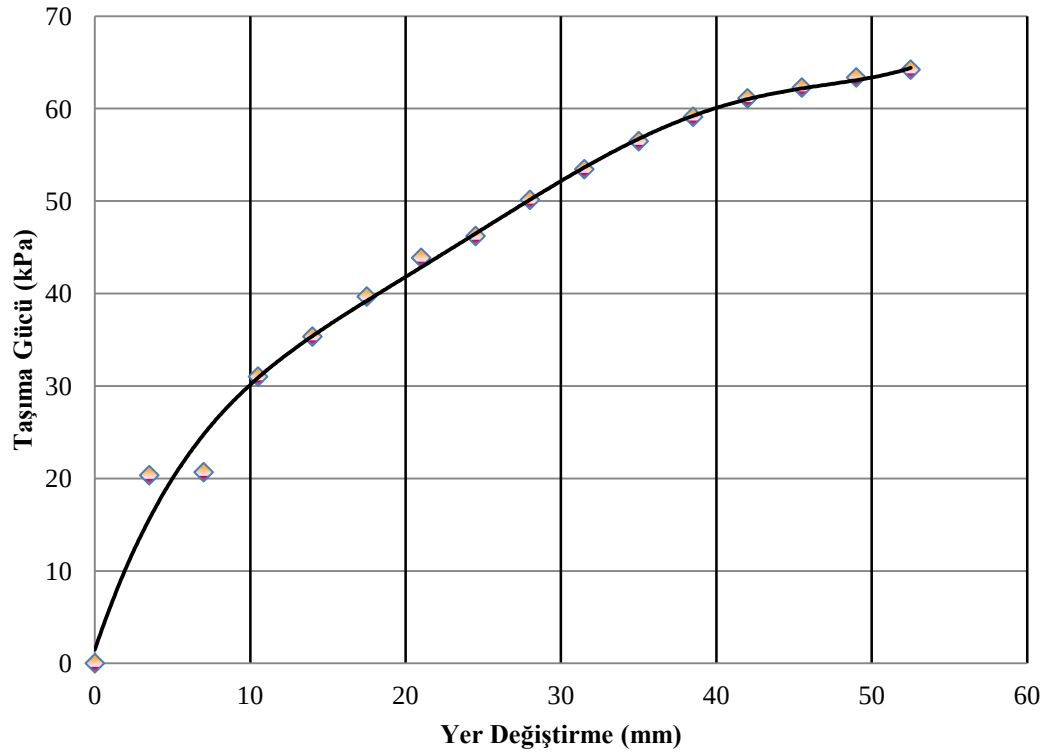
Şekil E. 37 : Numune V' e ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



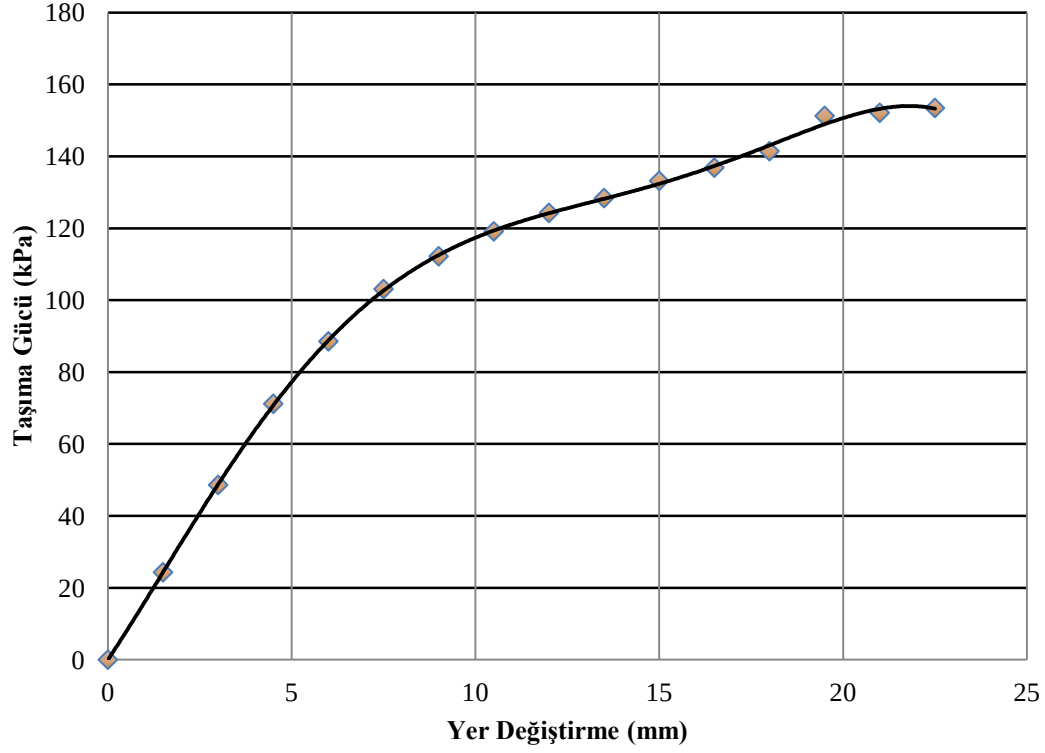
Şekil E. 38 : Numune V' e ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



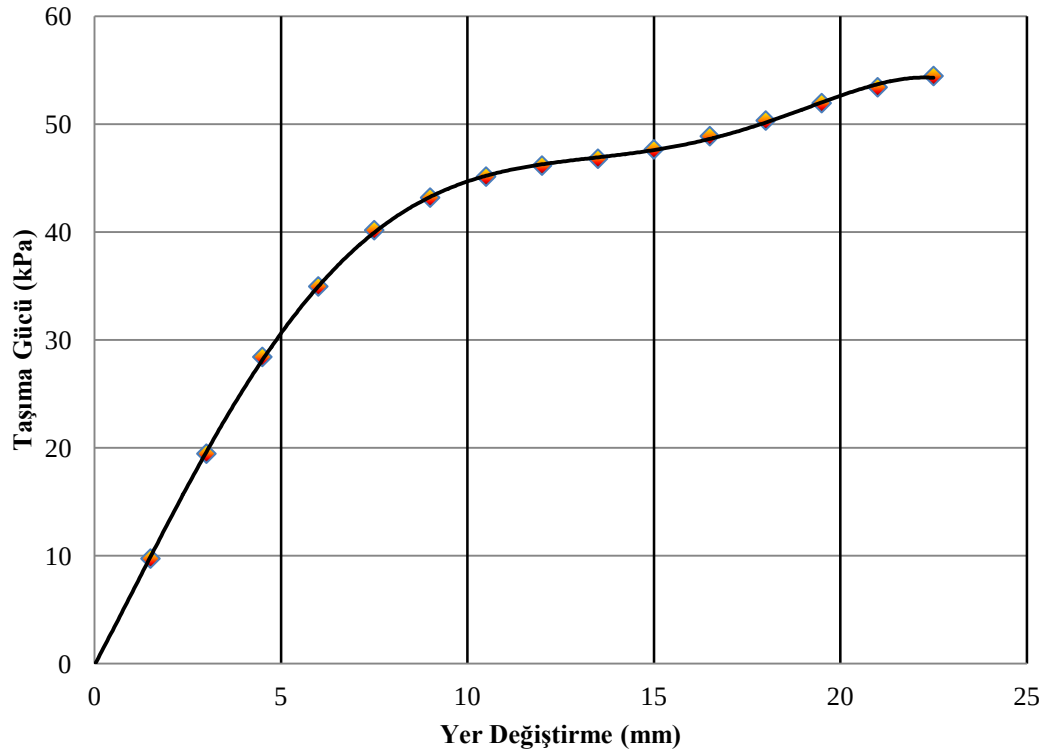
Şekil E. 39 : Numune V' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS B



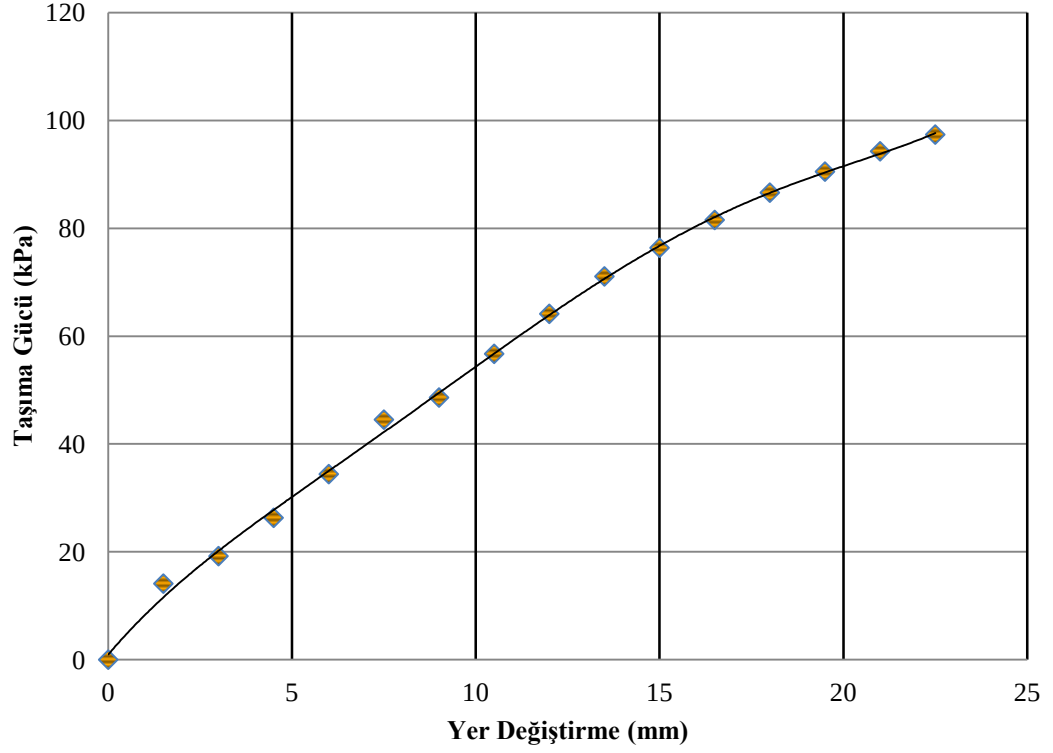
Şekil E. 40 : Numune V' e ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği YASS 2B



Şekil E. 41 : Numune VI' ya ait dairesel tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



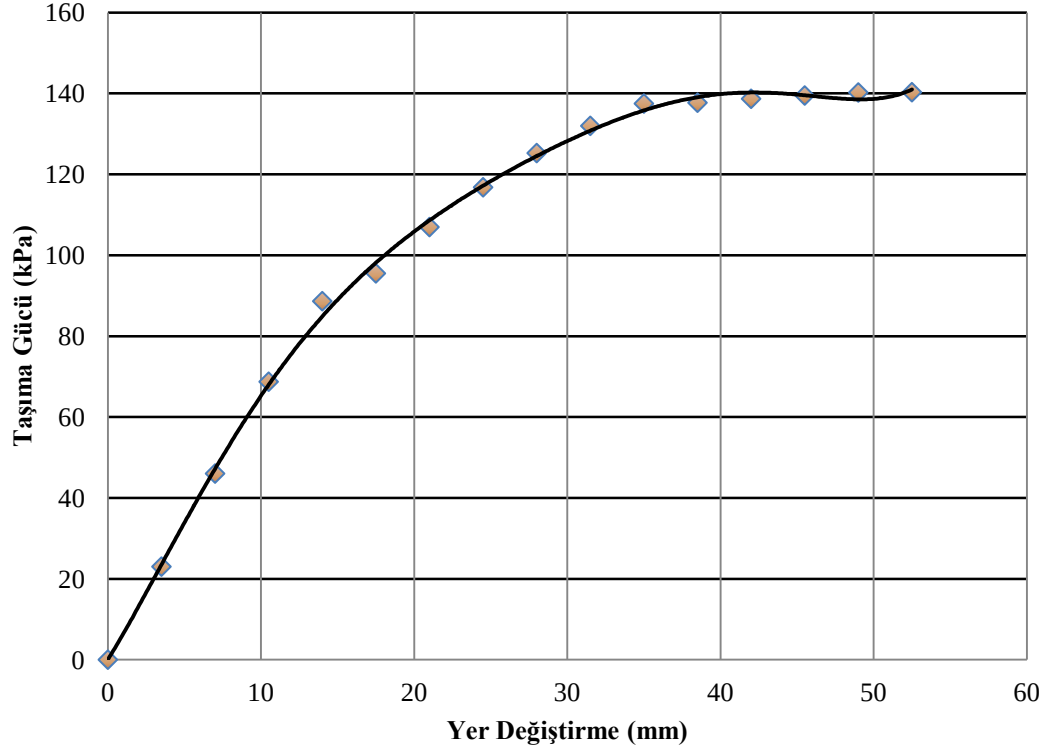
Şekil E. 42 : Numune VI' ya ait dairesel doygun modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



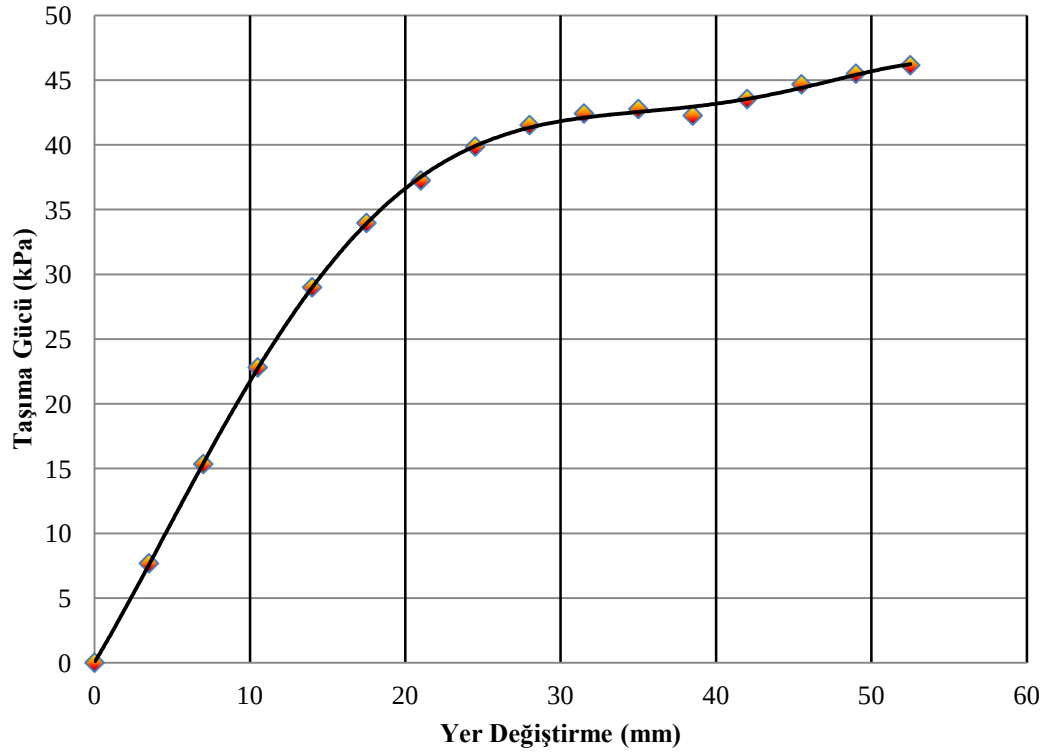
Şekil E. 43 : Numune VI' ya ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B



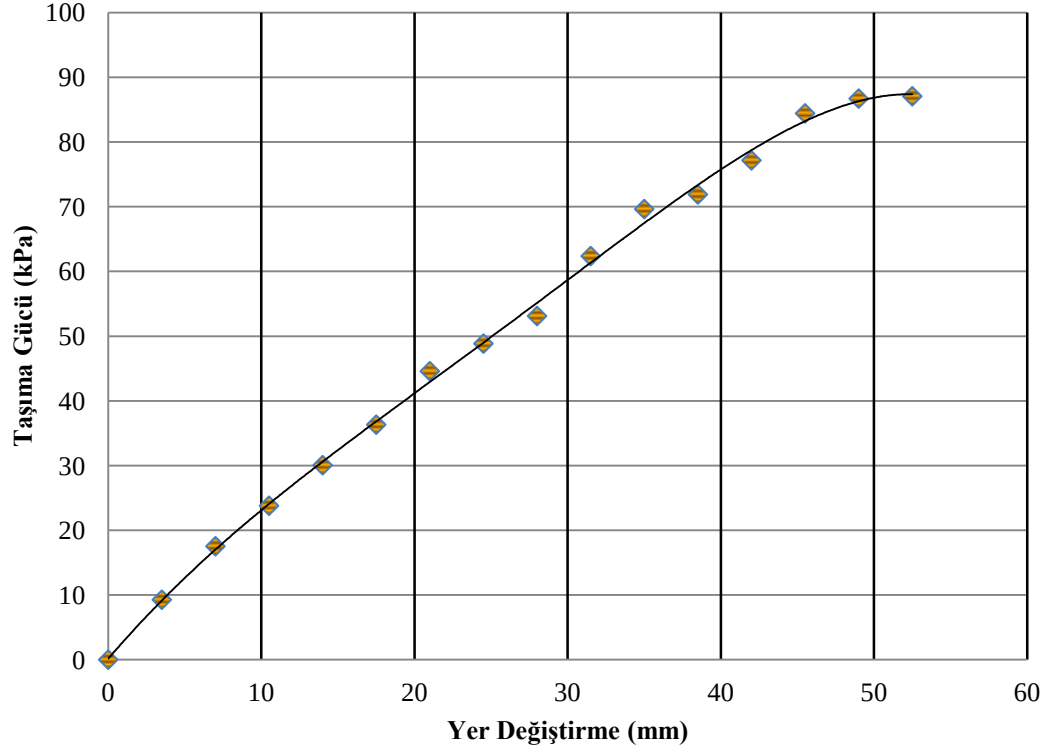
Şekil E. 44 : Numune VI' ya ait dairesel DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B



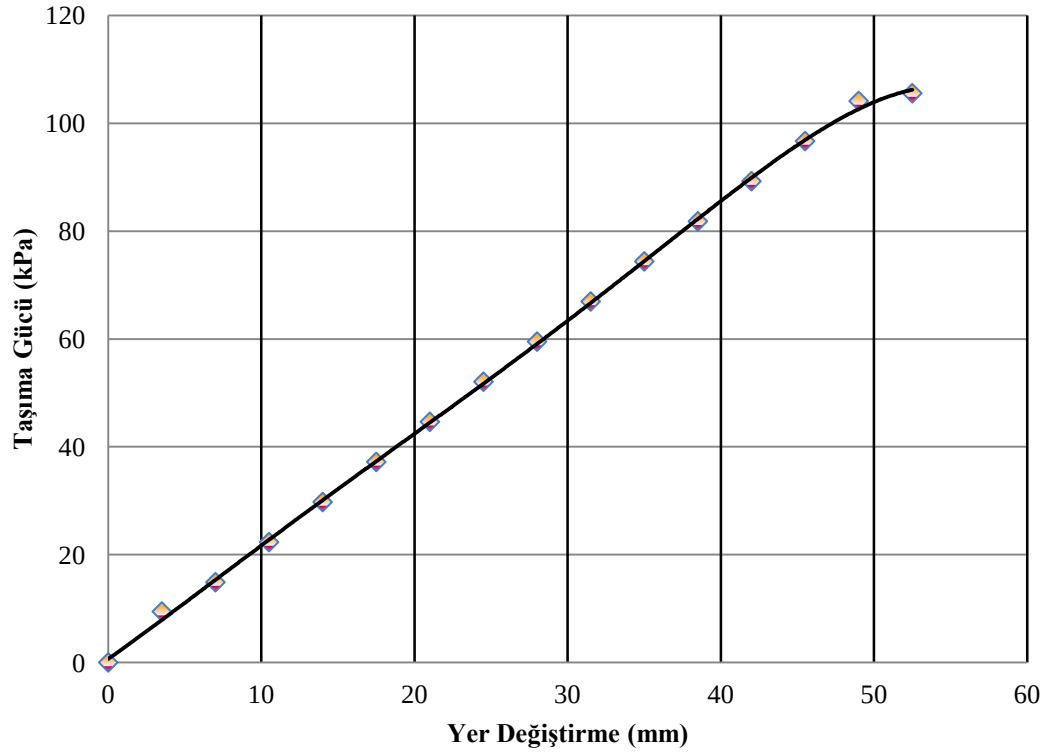
Şekil E. 45 : Numune VI' ya ait şerit tamamen kuru modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



Şekil E. 46 : Numune VI' ya ait şerit doygun modelinin taşıma gücü & yer değişirme grafiği



Şekil E. 47 : Numune VI' ya ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS B



Şekil E. 48 : Numune VI' ya ait şerit DOZ modelinin taşıma gücü & yer değiştirme grafiği YASS 2B

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Feyzullah GÜLŞEN

Doğum Yeri ve Tarihi: Giresun, 20/05/1987

Adres: Nurtepe mah. Sınır Sk. No:31/3 – Kağıthane / İstanbul

E-Posta: fgulsen@itu.edu.tr, feyzullahgulsen@yahoo.com

Lisans: Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği (İngilizce), 2010