

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU KONSOLİDASYON DENEYLERİ



DOKTORA TEZİ

Ayşen ÇELEBİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Programı

NİSAN 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU KONSOLİDASYON DENEYLERİ

DOKTORA TEZİ

Ayşen ÇELEBİ
(501882011)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin YILDIRIM

NİSAN 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501882011 numaralı Doktora öğrencisi, “**Ayşen ÇELEBİ**”, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÜÇ BOYUTLU KONSOLİDASYON DENEYLERİ**” başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin YILDIRIM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Ayfer ERKEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erol GÜLER
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **25 Mart 2015**

Savunma Tarihi : **24 Nisan 2015**



ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesi ve daha sonraki aşamalarında değerli görüş ve önerileri ile tezin şimdiki şeklini almasında önemli katkısı olan Sayın hocam, Prof. Dr. Hüseyin Yıldırım'a çok teşekkür ederim. Ayrıca üç boyutlu konsolidasyon deney aletini tasarladıkları için sayın hocam Prof. Dr. Hüseyin Yıldırım ile Araş. Gör. Dr. Atilla Sezen'e çok teşekkür ederim.

Tezin yazımı esnasında yardımlarını unutamayacağım Araş. Gör. Dr. Atilla Sezen ile Araş. Gör. Dr. Mustafa Hatipoğluna ayrıca sonsuz teşekkürler.

Deneysel çalışmam süresinde öğrencilere yardım etmekten mutluluk duyan zemin mekaniği laboratuvarı çalışanlarına öncelikli olarak İnş. Müh. İsmail Cantekin ve bütün çalışanlara ayrıca çok teşekkürler.

Mart 2015

Ayşen Çelebi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
İNGİLİZCE ÖZET.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	7
3. NUMUNE HAZIRLAMA VE SINIFLANDIRMA.....	57
4. BİR VE ÜÇ BOYUTLU KONSOLİDASYON.....	63
5. BİR VE ÜÇ BOYUTLU KONSOLİDASYON DENEYLERİ.....	69
6..ÖRSELENMEMİŞ VE YENİDEN KONSOLİDE EDİLEREK HAZIRLANAN NUMUNELERİN OTURMA	95
DAVRANIŞLARI.....	95
7. İNCE DANELİ ZEMİNLERİN ÖN KONSOLİDASYON BASINCI.....	99
8. İNCE DANELİ ZEMİNLERİN SINIFLANDIRMA VE OTURMA ÖZELLİKLERİ ARASINDA KORELASYONLAR.....	121
9. SONUÇLAR.....	143
KAYNAKLAR.....	149
EKLER.....	155
ÖZGEÇMİŞ.....	191



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Numunelerin Çamur Konsolidasyon Aletinde Konsolidasyon Süreleri	57
Çizelge 3.2 : Numunelerin Sınıflandırma Özellikleri.....	58
Çizelge 5.1 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deney Sayıları.....	69
Çizelge 5.2 : Bir ve Üç Boyutlu Hacimsel Sıkışma Sayıları ile Sıkışma Modülleri.....	90
Çizelge 7.1 : Farklı Yöntemlere göre Ön Konsolidasyon Basınçları.....	109
Çizelge 7.2 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları.....	116
Çizelge 7.3 : Sıkışma Modülü-Düşey Efektif Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı Gerilme Aralıkları.....	117
Çizelge 8.1 : Standart Ödometre Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	124
Çizelge 8.2 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Merkez Bölge Oturma Miktarları.....	132
Çizelge 8.3 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deney Sonuçları ile Korelasyonlar.....	138

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Numunelerin Plastisite Kartında Yerleri.	60
Şekil 4.1: Bir Boyutlu Konsolidasyon Deneyinde Gerilme Durumu.	64
Şekil 4.2: Üç Boyutlu Konsolidasyon Deney Aleti.	66
Şekil 4.3: Üst başlıklar ile 20, 30, 40, 50, 60 mm Çapında Pistonlar.	66
Şekil 4.4: Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Eksenel Gerilme Durumu.	67
Şekil 5.1: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N1.	71
Şekil 5.2: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre bölge Oturma Eğrisi, N1.	72
Şekil 5.3: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N2.	73
Şekil 5.4: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N2.	74
Şekil 5.5: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N3.	75
Şekil 5.6: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N3.	76
Şekil 5.7: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N4.	77
Şekil 5.8: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N4.	78
Şekil 5.9: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N5.	79
Şekil 5.10: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N5.	80
Şekil 5.11: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N6.	81
Şekil 5.12: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N6.	82
Şekil 5.13: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N7.	83
Şekil 5.14: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N7.	84
Şekil 5.15: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N8.	85
Şekil 5.16: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N8.	85
Şekil 5.17: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N9.	86
Şekil 5.18: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N9.	87
Şekil 5.19: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N10.	88
Şekil 5.20: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N10.	89
Şekil 5.21: Logaritma Zaman Yöntemi, N9 200~300 kPa.	92
Şekil 5.22: Karekök Zaman Yöntemi, N9 200~300 kPa.	93
Şekil 5.23: Logaritma Zaman Yöntemi, N10 200~300 kPa.	94
Şekil 5.24: Karekök Zaman Yöntemi, N10 200~300 kPa.	94
Şekil 6.1: Örselenmemiş ve Yeniden Konsolide Edilerek Hazırlanan Numunelerin Bir Boyutlu Oturma Davranışları.	97
Şekil 7.1: $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, Standart Ödometre Deney Sonuçları	100
Şekil 7.2: $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N6.	101
Şekil 7.3: $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N8.	102
Şekil 7.4: $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N4.	103

Şekil 7.5: $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N5.	104
Şekil 7.6: Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N2.	106
Şekil 7.7: Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N4.	106
Şekil 7.8: Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N4.	107
Şekil 7.9: Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N6.	108
Şekil 7.10a: Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N1.	110
Şekil 7.10b: Sıkışma Modülü Düşey Efektif Gerilme Yöntemi ile Ön konsolidasyon Basıncı, N1.	111
Şekil 7.11a: Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N4.	112
Şekil 7.11b: Sıkışma Modülü-Düşey Efektif Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N4.	113
Şekil 7.12: Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N5.	114
Şekil 7.13: Sıkışma Modülü- Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N9.	115
Şekil 7.14: Oturma Eğrisinde Schmertmann Düzeltmesi, N4.	118
Şekil 7.15: Oturma Eğrisinde Schmertmann Düzeltmesi, N5.	118
Şekil 8.1: Standart Ödometre Deney Sonuçları	123
Şekil 8.2: Likit Limitte Boşluk Oranı ve Düşey Efektif Gerilme 100 kPa iken Boşluk Oranı Arasında Bağntı.	125
Şekil 8.3: Likit Limitte Boşluk Oranı ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.	126
Şekil 8.4: Bir Boyutlu Deneylerde Plastisite İndisi ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.	127
Şekil 8.5: Bir Boyutlu Deneylerde Likit limit ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.	128
Şekil 8.6: Bir Boyutlu Deneylerde Plastisite İndisi ile Sıkışma Modülü Arasında Bağntı	130
Şekil 8.7: Ödometre Deney Sonuçlarının Boşluk İndisi ile Normalize Edilmesi.	130
Şekil 8.8: Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları Merkez Bölge.	131
Şekil 8.9: Likit Limitte Boşluk Oranı ve Düşey Gerilme 100 kPa iken Oturma Miktarı Arasında Bağntı.	133
Şekil 8.10: Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Likit Limitte Boşluk Oranı ve Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.	134
Şekil 8.11: Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Plastisite İndisi ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.	135
Şekil 8.12: Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Likit Limit ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.	136
Şekil 8.13: Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Plastisite İndisi ile Sıkışma Modülü Arasında Bağntı.	136
Şekil 8.14: Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçlarının Boşluk İndisi İle Normalize Edilmesi.	137
Şekil 8.15: Casagrande Yöntemi ile Belirlenen Ön Konsolidasyon Basınçları ile e_0/e_L Arasında Bağntı.	139
Şekil 8.16: Casagrande Yöntemi ile Belirlenen Ön Konsolidasyon	

Basınçları ile e_0/e_L Arasında Bağntı.....	140
Şekil 8.17: Sıkışma Modülü- Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Belirlenen Ön Konsolidasyon Basınçları ile e_0/e_L Arasında Bağntı.....	140
Şekil 8.18: Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Belirlenen Ön Konsolidasyon Basınçları ile e_0/e_L Arasında Bağntı.....	141
Şekil A.1 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N1.....	156
Şekil A.2 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N1.....	156
Şekil A.3 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N1 (MH).....	157
Şekil A.4 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N2.....	157
Şekil A.5 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N2.....	158
Şekil A.6 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonucu N2.....	158
Şekil A.7 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N2 (CH).....	159
Şekil A.8 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N3.....	159
Şekil A.9 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N3.....	160
Şekil A.10 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N3.....	160
Şekil A.11 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N3 (CL-ML).....	161
Şekil A.12 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N4....	161
Şekil A.13 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N4.....	162
Şekil A.14 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N4.....	162
Şekil A.15 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N4 (CL).....	163
Şekil A.16 : Örselenmemiş Numune ile Ödometre Deneyleri N4 (CL).....	163
Şekil A.17 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N5.....	164
Şekil A.18 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N5.....	164
Şekil A.19 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N5.....	165
Şekil A.20 : Örselenmemiş Numune ile Ödometre Deneyi Sonuçları N5.....	165
Şekil A.21 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N5 (CL).....	166
Şekil A.22 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N6.....	167
Şekil A.23 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N6.....	167
Şekil A.24 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N6.....	168
Şekil A.25 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N6 (MH).....	168
Şekil A.26 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N7.....	169
Şekil A.27 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N7.....	169
Şekil A.28 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N7.....	170
Şekil A.29 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N7 (CL-ML).....	170
Şekil A.30 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N8.....	171
Şekil A.31 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N8.....	171
Şekil A.32 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N8.....	172
Şekil A.33 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N8 (CL).....	172
Şekil A.34 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N9.....	173
Şekil A.35 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N9.....	173
Şekil A.36 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N9.....	174
Şekil A.37 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N9 (CH).....	174
Şekil A.38 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N10...	175
Şekil A.39 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N10.....	175
Şekil A.40 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N19.....	176
Şekil A.41 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N10 (MH).....	176
Şekil B.1 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N1 (MH).....	177

Şekil B.2 : Casagrande Yöntemi ile Ön konsolidasyon Basıncı N1.....	177
Şekil B.3 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N2 (CH).....	178
Şekil B.4 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N2.....	178
Şekil B.5 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N2.....	179
Şekil B.6 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N3 (CL-ML).....	179
Şekil B.7 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N3.....	180
Şekil B.8 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N3.....	180
Şekil B.9 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N3 (CL-ML).....	181
Şekil B.10 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N5 (CL).....	181
Şekil B.11 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N5.....	182
Şekil B.12 : Casagrande Yöntemi ile Ön konsolidasyon Basıncı N6 (MH).....	182
Şekil B.13 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N6 (MH).....	183
Şekil B.14 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N7 (CL-ML).....	183
Şekil B.15 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N7.....	184
Şekil B.16 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N7.....	184
Şekil B.17 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N7.....	185
Şekil B.18 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N8.....	185
Şekil B.19 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N8.....	186
Şekil B.20 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N8 (CL).....	186
Şekil B.21 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N9 (CH).....	187
Şekil B.22 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N9.....	187
Şekil B.23 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N9.....	188
Şekil B.24 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N10 (MH).....	188
Şekil B.25 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N10.....	189
Şekil B.26 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı N10.....	189
Şekil B.27 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N10.....	190

SEMBOL LİSTESİ

m_v	: hacimsel sıkışma sayısı
M_c	: sıkışma modülü
k_v	: düşey yönde permeabilite katsayısı
k_{vt}	: kil tabakası üzerinde bulunan zemin tabakasının düşey yönde permeabilite katsayısı
k_{vb}	: kil tabakası altında bulunan zemin tabakasının düşey yönde permeabilite katsayısı
W_n	: doğal su muhtevası
W_L	: likit limit
W_p	: plastik limit
d	: numune çapı
h	: numune yüksekliği
I_p	: plastisite indisi
I_L	: likitlik indisi
I_c	: kıvam indisi
I_v	: boşluk indisi
γ_s	: dane birim hacim ağırlığı
K	: yanal yönde toprak basıncı katsayısı
K_0	: sükunetteki toprak basıncı katsayısı
K_A	: aktif toprak basıncı katsayısı
K_P	: pasif toprak basıncı katsayısı
ν	: Poisson oranı
P_1	: düşey yönde etkiyen asal gerilme
P	: eksenel yönde etkiyen efektif gerilme
E	: üç boyutlu elastik sıkışma modülü
E^*	: bir boyutlu elastik sıkışma modülü
Δh	: oturma
C_s	: kabarma indisi
C_c	: sıkışma indisi
N	: kabarma hassaslığı ve numune

P_c	: ön konsolidasyon basıncı
P_o	: ön konsolidasyon basıncının olma olasılığının en fazla olduğu nokta
P_{max}	: ön konsolidasyon basıncının alabileceği en büyük değer
e	: boşluk oranı
e_0	: deney başı boşluk oranı
e_L	: likit limitte boşluk oranı
e_{100}	: düşey efektif gerilme 100kPa iken boşluk oranı
e_{200}	: düşey efektif gerilme 200kPa iken boşluk oranı
e_{500}	: düşey efektif gerilme 500kPa iken boşluk oranı
e_{1000}	: düşey efektif gerilme 1000kPa iken boşluk oranı
Δh_{100}	: düşey efektif gerilme 100kPa iken oturma miktarı
Δh_{300}	: düşey efektif gerilme 300kPa iken oturma miktarı
Δh_{500}	: düşey efektif gerilme 500kPa iken oturma miktarı

ÜÇ BOYUTLU KONSOLİDASYON DENEYLERİ

ÖZET

Deneyisel çalışmada 10 farklı plastisite indisli yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin yanı sıra araziden tüp yöntemi ile alınan örselenmemiş numuneler kullanılarak ta yeterli sayılarda bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.

Üç boyutlu konsolidasyon deney aleti standart deney aletinin geliştirilmiş modeli olarak tanımlanabilir. Üç boyutlu konsolidasyon deney sonuçlarını standart deney aletinden temin edilen sonuçlar ile karşılaştırabilmek için üç boyutlu deneylerde merkez bölge çapı 50 mm olarak kullanılmıştır. Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde 120 mm çapında, 20 mm yüksekliğinde numune ilk olarak bir birine dik iki yükleme kolu yardımı ile 100 kPa eksenel gerilme değerinde 24 saat konsolide edilmektedir. Moment kollarından biri 50 mm çapındaki merkez bölgeye gerilme uygulanmasına izin verirken diğeri, merkez bölge etrafındaki çevre bölgeye gerilme uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Üç boyutlu deneylerde 50 mm çapındaki merkez bölge etrafında numunenin yanal yönde şekil değiştirmesini engelleyen ring bulunmamaktadır ve buna bağımlı olarak üç boyutlu isimlendirilmektedir. Ancak 100 kPa eksenel gerilme etkisinde olan numune bulunmaktadır. Daha sonra standart gerilme artımı ödometre deneylerine benzer biçimde merkez bölgeye uygulanmaktadır.

Çalışmada yeterli sayılarda yapılan bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarından 200 kPa~300 kPa gerilme değerinden daha büyük gerilme değerlerinde üç boyutlu oturma miktarlarının bir boyutlu oturma miktarlarından daha büyük oldukları görülmüştür. Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrilerinin eğimlerinin 150 kPa~200 kPa gerilme değerinden büyük gerilme değerlerinde bir boyutlu oturma eğrisi eğimlerinden daha büyük oldukları bulunmuştur.

Deneyisel çalışmada yapılan bütün üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde merkez bölgeye ilave gerilme artımları uygulanması aşamasında, çevre bölgede küçük miktarlarda oturmalar görülmekte, merkez bölgeye uygulanan gerilmelerin geri alınması aşamasında ise numunenin grubuna bağımlı olarak çevre oturma miktarları ya sabit kalmakta ya da küçük miktarlarda kabarma veya oturmalar görülmüştür.

Bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında genel olarak 200 kPa, üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ise 300 kPa basınç değerinden sonra oturma eğrileri yarı logaritmik eksenlerde doğrudur. Oturma eğrilerinin doğru olan bölümlerinde her iki grup deney sonucunda sıkışma modülleri hesaplanıp, karşılaştırılmıştır. 10 farklı numunenin kullanıldığı deneyisel çalışma sonucuna bağımlı olarak üç boyutlu sıkışma modülünün, ödometre sıkışma modülünün 0,5~0,75 katı dolaylarında olduğu bulunmuştur.

Bilindiği üzere yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler arazideki zemin tabakalarının özelliklerini tam olarak bulundurmamaktadırlar. Geçen zaman

süresinde oluşan daneler arası bağ kuvvetleri ve bağ kuvvetlerine bağımlı oluşan zemin yapı ve dokusu yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerde görülmemektedir. Laboratuarda yeniden konsolide edildikten hemen sonra deney yapımında kullanılmaktadırlar. Oysa arazide binlerce yıl içerisinde zemin tabakaları oluşmaktadır. Benzeri nedenlerden dolayı arazideki zeminin oturma davranışı ile yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminin oturma davranışı farklı olacaktır.

Açıklamaya bağımlı olarak örselenmemiş numuneler kullanılarak yapılan bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları aynı numunelerin yeniden konsolide edilerek hazırlanan örnekleri ile yapılan bir boyutlu deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Oturma-logaritma düşey gerilme eksenlerinde çizilen oturma eğrileri karşılaştırıldığında örselenmemiş numunelerin oturma eğrilerinin diğerlerinin sağ tarafında bulundukları görülmüştür. Yeniden hazırlanan numunelerin sıkışma indislerinin, örselenmemiş numunelerin sıkışma indislerinden daha büyük oldukları gözlenmiştir. Ayrıca yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunenin kabarma indisinin, örselenmemiş numunenin kabarma indisine oranı kabarma hassaslığı olarak tanımlanmaktadır. Kabarma hassaslığı arazideki zeminin daneleri arasındaki bağ kuvvetleri hakkında önemli bilgi vermektedir. İlgili oran bu çalışmada her iki deney sonucunda hesaplanmış ve her iki numune içinde 0,5 den büyük bulunmuştur.

Ön konsolidasyon basıncının gerçek değerine yakın belirlenebilmesi, oturma miktarlarının arazi değerlerine daha uygun hesaplanabilmesinde oldukça önemlidir. Ön konsolidasyon basıncını; numunenin örselenmesi, gerilme artım oranı, uygulanan gerilmelerin bulunma süresi, numune alma yöntemleri, konsolidasyon deney yöntemleri ve ön konsolidasyon basıncını belirlemede kullanılan hesap yöntemlerinin etkilediği bilinmektedir. Numunede örselenme miktarı arttıkça Casagrande yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının belirlenebilmesi kolay değildir. Böyle durumlarda deney sonuçlarının $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme eksenlerinde çizilmesi önerilmektedir. Konsolidasyon deney sonuçları $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme eksenlerinde çizildiğinde oturma eğrileri iki doğrudur. İki doğrunun kesim noktası ön konsolidasyon basıncı olarak tanımlanmaktadır. Ancak yöntem oturma eğrisinin iyileştirilmesine dolayısıyla ön konsolidasyon basıncının düzeltilmesine olanak sağlamamaktadır.

Deneyisel çalışmada da gerek standart deney aleti gerekse üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında Casagrande ve $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemleri ile ön konsolidasyon basınçları hesaplanmıştır. 10 farklı numunenin kullanıldığı bir boyutlu deney sonuçlarında $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine göre ön konsolidasyon basınçları genel olarak 125 kPa~150 kPa olarak bulunurken aynı deney grubunda Casagrande yöntemine göre 130 kPa~180 kPa olarak bulunmuştur. Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ise Casagrande yöntemi ile ön konsolidasyon basınçları 160 kPa~200 kPa olarak bulunmuştur.

Ön konsolidasyon basıncının belirlenmesinde kullanılan diğer bir yöntem deney sonuçlarının $1/m_v$ -logaritma düşey gerilme eksenlerinde çizilmesidir. Sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme eksenlerinde çizilen grafikte en küçük modül değerine karşılık gelen eksenel gerilme ön konsolidasyon basıncı olarak tanımlanmaktadır. Standart deney aleti kullanılarak yapılan bir boyutlu deney sonuçlarında ön konsolidasyon basıncı konu yönteme dayalı 125 kPa~180 kPa olarak bulunurken üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan aynı grup deney sonuçlarında 160 kPa~200 kPa olarak bulunmuştur. Üç boyutlu konsolidasyon deneyi

sonuçlarında ise 200 kPa~280 kPa olarak Casagrande ve $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemlerinden bulunan değerlerinden daha büyük değerler gözlenmiştir.

Örselenmemiş numuneler ile yapılan ödometre deneyi sonuçlarında da ön konsolidasyon basınçları her üç yöntem ile belirlenmiştir. Temin edilen değerler aynı numunelerin yeniden hazırlanan örneklerinden bulunan değerleri ile karşılaştırılmıştır. Üç yöntem ile örselenmemiş numunelerden bulunan ön konsolidasyon basınçlarının yeniden hazırlanan numunelerden belirlenen değerlerinden daha büyük oldukları görülmüştür.

Ayrıca örselenmemiş numunelerin oturma eğrilerine Schmertmann düzeltmesi uygulanarak arazi oturma eğrisi eğimleri bulunmuştur. Arazi oturma eğrisi eğimleri laboratuvar eğrisi eğimleri ile karşılaştırılmış ve laboratuvar oturma eğrisi eğimlerinden oldukça büyük oldukları görülmüştür.

Literatürde gerilme ekseninin logaritmik çiziminin uygun olmadığı pek çok çalışmanın konusudur. İlgili yayınlarda deney sonuçlarının sıkışma modülüne karşılık düşey gerilme eksenlerinde çizilmesi önerilmektedir. Sıkışma modülü-düşey gerilme eksenlerinde deney sonuçları çizildiğinde ön konsolidasyon basıncı gerilme aralığı olarak tanımlanmaktadır. Burada da hem bir hem de üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları konu eksenlerde çizilerek ön konsolidasyon basıncı gerilme aralıkları belirlenmiştir. Her grup deney sonucunda üç farklı yöntem ile belirlenen ön konsolidasyon basınçlarının tanımlanan aralıkta bulundukları görülmüştür.

Dolayısıyla yapılan açıklamalara bağımlı olarak, ön konsolidasyon basıncı deneylerde kullanılan numunelerin tiplerine, deney yöntemlerine ve hesaplama yöntemlerine bağımlıdır.

Zeminlerin arazideki davranışlarının tahmin edilebilmesinde nümerik çözüm yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çözüm yöntemlerinden iyi sonuçların temin edilebilmesi, zemin parametrelerinin güvenilir biçimde laboratuvar deneylerinden belirlenerek, çözüm yöntemlerinde kullanılmasına bağımlıdır. Çalışmada da likit limit durumunda numuneler suya doymun kabul edilerek likit limitteki boşluk oranı ile eksenel gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranı arasında bağıntının varlığı araştırılmıştır. Ayrıca likit limitteki boşluk oranı ile sıkışma indisi, plastisite indisi ile sıkışma indisi arasında da olası bağıntılar araştırılmıştır. İlave olarak hem bir hem de üç boyutlu deney sonuçlarında zeminlerin likit limitleri ile sıkışma indisleri arasında da korelasyonların bulunup bulunmadığı araştırılmıştır.

Bilindiği üzere yarı logaritmik eksenlerde oturma eğrileri genel olarak ön konsolidasyon basıncı geçildikten sonra doğrudur. Her iki deney grubunda oturma eğrilerinin doğru olan bölümlerinde sıkışma modülleri hesaplanarak, sıkışma modülleri ile plastisite indisleri arasında da olası bağıntıların varlığı incelenmiştir.

Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları ile ilgili bağıntılarda boşluk oranı yerine oturma miktarları kullanılmıştır. Her iki grup deney sonucu ile araştırılan korelasyonlarda sıkışma modülü-plastisite indisi dışında lineer bağıntılar bulunmuştur. Bir boyutlu deney sonuçlarından gözlenen bağıntıların, üç boyutlu deney sonuçlarından temin edilenlerden daha iyi oldukları, regresyon katsayılarının 0,97 dolaylarında bulunması dolayısıyla söylenebilir.

Ayrıca deney başı boşluk oranları likit limitteki boşluk oranları ile normalize edilmiştir. Likit limitteki boşluk oranı ile normalize edilen deney başı boşluk oranları ile ön konsolidasyon basınçları arasında da olası bağıntıların varlığı araştırılmıştır.



THREE-DIMENSIONAL CONSOLIDATION TESTS

SUMMARY

The objective of the study is to examine the compressibility characteristics of clay soils. By using 10 different fine-grained reconstituted soils, sufficient numbers of one and three dimensional consolidation tests were carried out. Undisturbed tube samples, 70 mm in diameter, were also used for performing one-dimensional consolidation tests.

At the process of preparing a reconstituted soil, oven dried sample has been firstly separated to grains with a hammer, then sieved using no 40 sieve. Adequate material, passing 40 sieve, has been taken and then has been thoroughly mixed at between 1.5 and 2.0 times the liquid limit to form a slurry. The mixture has been poured into a cylindrical stiff metal mould, 19 cm in diameter, 81 cm in height, and loaded vertically by means of a hanger. To prevent the soil squeezing out through the clearance gap between the wall of metal mould and the upper porous disc, the load is applied gradually by adding weights to the hanger. The targeted vertical stress, 125 kPa, has generally been reached in 3 or 4 weeks. The sample was consolidated approximately 3 months at this apparatus, in which sample drains at the top and bottom. Taken from the stiff- mould at the end of this period, the reconstituted sample has been used for performing one and three- dimensional consolidation tests.

Before preparing a reconstituted sample, classification tests, such as specific volume, liquid limit, plastic limit and sedimentation tests, have been carried out on samples. All the samples were classified according to the Unified Soil Classification System. Either the reconstituted or the undisturbed specimens lie close to the A line on the plasticity chart.

Undisturbed tube samples were taken from the depths of 1.3~ 2.0 and 3.0~3.4 m below ground surface. The same specimen diameter and height are used for undisturbed specimens so that the test results could be compared. After taken from the cylindrical metal mould, the reconstituted samples were prepared, 120 mm in diameter, 20 mm in height for three-dimensional and 50 mm in diameter, 20 mm in height for one-dimensional consolidation tests.

Three-dimensional consolidation test apparatus can be thought as a modified form of standard oedometer apparatus. The apparatus contains two weight hanger systems, the first hanger is used for loading the central part, 50 mm in diameter, while the second hanger permits loading to the neighboring part of the specimen, 120 mm in diameter.

At the start of the test, the vertical loads 100 kPa are simultaneously applied to the hangers. The specimen is consolidated at this pressure for 24 hours. Standard load increments, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa, are subsequently applied to the central part of the specimen in the same fashion as in a standard oedometer test. The duration of each load increments is 24 hours. The axial displacements, either central part or neighboring part of the specimen, are conventionally being recorded at suitable time intervals.

In three-dimensional consolidation tests central part, 50 mm in diameter, is used so that the results could be compared with the results of standard oedometer tests. This group of test has been called three-dimensional consolidation because there is no ring, which prevents lateral strains, around the central part, 50 mm in diameter, but there is specimen, which is subjected to 100 kPa axial stress.

Three-dimensional consolidation test apparatus is also used for performing one-dimensional consolidation tests, in case the test apparatus may affect the test results. The same load increments have also been used for performing one- dimensional consolidation tests. Each pressure is maintained for a period of 24 hours. Compression readings are being observed at standard time intervals. The axial displacements, at the end of 24 hours, have been used for plotting settlement curves. It is known that this value is neither the end of primary consolidation nor the beginning of secondary consolidation.

The test results, either one or three-dimensional, are plotted in the settlement and the logarithm- vertical stress axes. According to the test results, the three-dimensional settlements are greater than the settlements, observed from standard oedometer tests at pressures greater than 200 kPa- 300 kPa. The test results have also shown that the coefficients of volume-compressibility, determined on the three-dimensional consolidation tests, are greater than the corresponding values, calculated from the standard oedometer-test results at pressures greater than 150 kPa- 200 kPa.

When the stress increments have been applied to the central part of the three-dimensional consolidation specimens, small settlements, at the neighboring part of the specimen, 120 mm in diameter, have been observed all of the consolidation tests results, performed in sufficient numbers by using 10 different fine-grained soils. According to the type of specimen, such as clay content, the type of clay minerals, neighboring-part settlements approximately remain the same, in some specimens however, small swellings can be seen while the loads have been being taken from the central part. At the process of unloading, swellings are also permitted for 24 hours and these values are used on plotting the settlement curves.

The one-dimensional settlement curves plotted, according to the data observed either standard oedometer or three-dimensional consolidation test apparatus, are geometrically similar to each other. In other words one is approximately parallel to the other. One sample, N6, has only shown the same settlement graphs.

One and three-dimensional consolidation test results have also been plotted in the settlement versus logarithm of time and square root of time and the figures have been compared. By doing this, during one and three-dimensional consolidation tests, the characteristics of settlement against time have been also investigated at any pressure increment.

When the one-dimensional test results have been plotted in the settlement versus the logarithm- vertical stress axes, the settlement curves are generally linear at pressures greater than 200 kPa. However, the three-dimensional- consolidation test results, in the same axes, are linear at pressures after 300 kPa. By using one and three-dimensional settlements curves, compression modulus are calculated at the pressure range 300 kPa-500 kPa. Three- dimensional- compression modulus are found to be between 0.5 and 0.75 times of one-dimensional- compression- modulus. These results are in agreement with the studies performed at the literature.

In a reconstituted sample, any structure developed in the soil in the ground due to deposition or ageing which give rise to bonding and to other physical and chemical changes, is removed by the preparation and the test only measure on the nature of the grains. The reconstituted sample is tested soon after it has been reconsolidated.

For this reason, the compression behavior of undisturbed samples, obtained from oedometer tests, are compared with the corresponding properties of reconstituted samples. It is found that undisturbed consolidation curves are well above the reconstituted compression curves, when the test results are plotted in the settlement against the logarithm-vertical stress axes. The compression indexes of undisturbed samples are smaller than the compression indexes of reconstituted samples when the vertical stress greater than the yield stress, which is generally used in place of preconsolidation pressure in reconstituted samples in the studies carried out at the literature. The contrary result, however, was found in the studies, performed in the literature.

The ratio of the swelling index of reconstituted sample to the undisturbed-swelling index is called swell sensitivity. This ratio is a valuable measure of interparticle bonding in the natural soil. One-dimensional test data has shown that this ratio is greater than 0.5 for both of the samples.

The precise determination of preconsolidation pressure is more important to assume the settlements according to field values. As it is known, sampling methods, load increment ratio, duration of each load and the type of test affect the preconsolidation pressure.

At the process of retrieving a sample from the ground, transporting the sample to the laboratory and installing it in a laboratory test apparatus, there are several stages at which disturbance can occur. The preconsolidation pressure is much more difficult to define when sample disturbance has occurred. Increasing disturbance causes the shape of consolidation curve to become less sharp. Increasing disturbance lowers the value of the preconsolidation pressure.

When the preconsolidation pressure becomes difficult to define according to Casagrande method, the test results are proposed to plot $\ln(1+e)$ -logarithm of vertical stress axes in which compression curves can be well represented by two straight lines. The effective vertical stress corresponding to the intersection point of the two straight lines is the preconsolidation pressure or yield stress. The method does not allow the improving of test results and the settlement curves.

One-dimensional consolidation test data, observed from both standard oedometer and three-dimensional test devices, are interpreted according to Casagrande and $\ln(1+e)$ -logarithm-vertical stress methods. The yield stresses of 10 different fine-grained soils are generally found between 125 kPa~150 kPa according to $\ln(1+e)$ – logarithm-vertical stress method, while they are found between 130 kPa~180 kPa according to Casagrande method on the same group of test.

By using Casagrande construction on the three-dimensional consolidation test results, the yield stresses are obtained between 160 kPa and 200 kPa, which are higher than the yield stresses, observed from $\ln(1+e)$ -logarithm-vertical stress on the one-dimensional consolidation test data.

Another method to obtain the preconsolidation stress is to plot the compression modulus $1/m_v$ against the logarithm of the vertical effective stress and to identify the stress corresponding to the minimum value of the compression modulus.

The yield stresses according to this method are observed between 125 kPa and 180 kPa on the test data obtained from standard oedometer tests, while they are found to be between 160 kPa and 200 kPa on the same group of test data determined by using three-dimensional test apparatus.

The yield stresses, according to the compression modulus- the logarithm of the vertical stress, are found between 200 kPa and 280 kPa on the three-dimensional consolidation test results, which are the highest values, if they are compared with the other results. The minimum values are determined by using $\ln(1+e)$ -logarithm-vertical stress method on the standard oedometer test data.

The preconsolidation pressures which were observed on undisturbed settlement curves have been also determined by using 3 methods mentioned above. The values have been found to be greater than the corresponding values determined on reconstituted settlement curves.

By applying Schmertmann method to undisturbed settlement curves, field compression indexes have been found. The field compression indexes have been found to be much steeper than the corresponding values of laboratory settlement curves.

Plotting the vertical stresses to logarithmic scale is considered to have some shortcomings according to literature. It is suggested that the consolidation test data could be plotted in the compression modulus against vertical stress and this method gives a range of values for preconsolidation pressure. This range of values contains the preconsolidation values determined by other techniques.

The method has been applied to the test data obtained either standard oedometer or three-dimensional test apparatus in this study. The ranges of values have been determined for preconsolidation pressures. The values obtained by using other 3 techniques have been found to be in the corresponding ranges.

As a result, according to these explanations the yield stress depends on the type of sample, sample disturbance, the type of consolidation test method and the techniques used for determining the preconsolidation pressures.

Numerical analyses are extensively used to assume the properties of soil behavior in the ground. The success of this sort of analysis largely depends on the choice of soil parameters used to represent the behavior of the soil. It is the subject of many studies, to determine the parameters, by using the soil index properties such as plasticity index, which are used in the numerical analyses.

In this study, by assuming the specimens 100% saturated with water, the void ratios e_L are calculated at the liquid limit. By calculating the void ratios e_{100} at 100 kPa vertical stress, a correlation on the test results, observed from either one or three-dimensional consolidation tests, is investigated between e_L and e_{100} . This correlation is thought to be useful, because it can give any idea about the compression behavior of soils, before the preconsolidation pressure.

In addition, by using the test results the relationships between the void ratios at the liquid limit e_L and the compression index and between the plasticity index and the compression index are also investigated.

Considering the index and compression properties of 10 different fine-grained soils, any possible correlation is also looked for between the liquid limit and the compression index.

The correlation coefficient, determined on the relationship between the liquid limit and compression index, based on one-dimensional consolidation tests results, is found to be 0.979, while the corresponding coefficient is determined to be 0.820 based on the three-dimensional test results.

If we compare the correlation coefficients, observed from the correlations between the plasticity index and compression index, calculated depends on the one and three-dimensional consolidation test results, which were found 0.973 and 0.896 respectively, we can see the one-dimensional correlation coefficient is higher than the other.

The settlement values, in place of void ratio, were used in the correlations on three-dimensional consolidation data.

As it is known, the settlement curves, in semi-logarithmic plot, are linear at pressures after the preconsolidation pressure. By calculating the compression modulus on the linear part of the settlement curves, another relationship is also investigated between the compression modulus and the plasticity index. It is seen that this relation is not linear on both of the test results. The corresponding correlation coefficients have been found 0.970, on one-dimensional and 0.944 on three-dimensional test results

The correlations have shown that the one-dimensional correlation coefficients are generally much better than the corresponding coefficients, determined on the three-dimensional consolidation test results.

In addition, all the test results, determined from one and three-dimensional consolidation tests, performed by both standard oedometer and three-dimensional test apparatus, are normalized with Burland's void index I_v parameter. The normalization on two-group of settlement curves is observed to be suitable.

Initial void ratios e_0 are also normalized with the void ratios at liquid limit e_L . The ratios e_0/e_L are plotted against the preconsolidation pressures, determined by different methods. The best relations have been observed on the values which were determined using Casagrande construction.

1.GİRİŞ

Zemin yüzeyine veya yüzeyden belirli mesafe derinliğe herhangi yapı nedeni ile ilave gerilme uygulandığında, derinlikle zemin kütlesi içerisinde mevcut gerilmelere ilave olarak yeni gerilmeler oluşacaktır. Bu ilave gerilmeler kütle içerisinde ilave deformasyonlara sebep olacaktır. İlave gerilmelerin zemin kütlesi içerisinde oluşturacakları deformasyonların düşey bileşeni oturma olarak isimlendirilir. Zemin mühendisini ilgilendiren problem, toplam oturmanın büyüklüğü ile bu oturmanın ne kadarının ne kadar süre içerisinde oluşacağını belirleyebilmektir. Genel olarak, uygulanan ilave gerilmelerden dolayı, zemin içerisinde derinlikle ilave gerilme değişimleri, elastisite teorisine bağımlı değişik araştırmacıların formülleri yardımı ile veya basit kabul kullanılarak hesaplanmaktadır. Açıklandığı biçimde tahmin edilen gerilme artımları ödometre deneyi ile bulunan oturma eğrisine uygulanarak olması muhtemel oturma miktarları hesaplanmaktadır.

Zemin tabakası içerisinde derinlikle ilave gerilme artımlarının hesaplanmasında çoğunlukla açıklandığı üzere elastisite teorisindeki formüller kullanılmaktadır. Temellerin tasarımında güvenlik sayıları yeterli büyüklükte hesaplarda kullanıldığında olması beklenen deformasyonlar küçük miktarlarda olabilir. Dolayısıyla elastisite teorisi geçerli olabilmektedir. Bu teoriye göre ilave gerilme artımları hesaplanırken, düşey gerilmenin yatay bileşenleri ihmal edilerek hesaplarda hata yapılmaktadır. Düşey gerilmenin yatay yönlerdeki gerilme bileşenlerinin düşey yönde oluşturacakları deformasyon miktarları, oturma miktarlarının tersi yönünde oluşacaktır. Standart ödometre deneylerinde numunenin yanal yönde şekil değiştirmesine izin verilmemesi ise diğer bir hata kaynağıdır.

Çalışmada zeminin yanal yönde şekil değiştirmesine izin veren üç boyutlu konsolidasyon deney aleti kullanılarak yeterli sayılarda konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarını karşılaştırabilmek düşüncesi ile standart ödometre deney aleti de konsolidasyon deneylerinin yapımında kullanılmıştır.

İnce daneli zeminlerin oturma davranışlarının araştırıldığı deneysel çalışmada çoğunlukla laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler kullanılmıştır.

Numune hazırlama aşamasında sınıflandırma deneyleri yeterli sayılarda yapılarak numuneler, birleşik zemin sınıflandırma yöntemine göre sınıflandırılmıştır. Etüvde kurutulan numuneler dövülerek danelerine ayrılıp 40 numaralı elekten elenmiştir. Elek altına geçen malzemeden yeterli miktar alınarak likit limit değerlerinin yaklaşık iki katı su muhtevasında arıtılmış su ile karıştırılarak karışım kabında danelerin tabana çökmesine izin verilmeden üç gün bekletilmiştir. Karışım kabından çamur konsolidasyon aletine alınan numuneler bu alette 125 kPa eksenel basınç değerinde en az üç ay konsolide edildikten sonra deney yapımında kullanılmıştır.

Çamur konsolidasyon aletinde yeniden konsolide edilerek hazırlanan her numune ile, aynı yükseklikten olmak üzere, 120 mm çapında üç boyutlu, 50 mm çapında bir boyutlu konsolidasyon deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Kullanılan numune yüksekliği 20 mm dir. Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde merkez bölge çapı, deney sonuçlarının ödometre deney sonuçları ile karşılaştırılabilmesi amacı ile 50 mm dir.

Laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin yanı sıra örselenmemiş numuneler ile de bir boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bir boyutlu deneylerin yapımında deney aletlerinin deney sonuçlarını etkileyebileceği düşüncesi ile hem üç boyutlu deney aleti hem de standart ödometre deney aletleri kullanılmıştır. Gerçeğe daha yakın oturma davranışının belirlenebilmesi düşüncesi ile deneysel çalışmada aynı numune kullanılarak çok sayıda konsolidasyon deneyi yapılmıştır.

Üç boyutlu deneylerde numunenin çevre bölgesine ve merkez bölgesine iki ayrı moment kolu yardımı ile aynı anda ilk olarak 100 kPa eksenel basınç uygulanmaktadır. 120 mm çapında, 20 mm yüksekliğinde üç boyutlu konsolidasyon numunesi ilk olarak bu basınç etkisinde 24 saat konsolide edilmektedir. Daha sonra 50 mm çapındaki merkez bölgeye standart gerilme artımı uygulanmaktadır. Numune çapının 50 mm, yüksekliğinin 20 mm olduğu standart ödometre deneylerinde de aynı gerilme artımları uygulanmıştır. Bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde herhangi gerilme artımı uygulaması esnasında standart zaman aralıklarında oturma miktarları kaydedilmektedir.

Çamur konsolidasyon aletinde yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler kullanılarak, çok sayıda yapılan deneylerin ortalama sonuçlarından, üç boyutlu konsolidasyon deneylerinden bulunan oturma miktarlarının, ödometre deneyi sonuçlarından bulunan oturma miktarlarından daha büyük oldukları bulunmuştur. Numunelerin sınıflandırma özelliklerine bağlı olarak 150 kPa~200 kPa basınç ve sonrası için üç boyutlu oturma eğrisi eğimlerinin ödometre oturma eğrisi eğimlerinden daha büyük oldukları görülmüştür. Ayrıca herhangi bir gerilme artımının numunelere uygulanması esnasında hem bir boyutlu hem de üç boyutlu oturmaların zaman ile değişimleri Taylor ve Casagrande yöntemlerine göre değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

Üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında; çalışma sürecinde yapılan tüm deneylerde çevre bölgede, merkez bölgeye ilave gerilme artımları uygulanırken küçük miktarlarda oturmalar görülüp, merkez bölgeye uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması aşamasında ise genel olarak çevre bölge oturma miktarlarının sabit kaldıkları gözlenmiştir. Numunelerin sınıflandırma özelliklerine bağlı kalınarak, yapılan deneylerin ortalaması biçiminde çizilen çevre oturma eğrilerinin killi zeminlerde daha düzenli oldukları görülmüştür.

Ayrıca bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyleri sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrilerinde 300 kPa~500 kPa basınç aralığında her iki grup deney sonucunda sıkışma modülleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Farklı plastisite indisli 10 numune ile yapılan deney sonuçlarından üç boyutlu sıkışma modülünün, bir boyutlu sıkışma modülünün 0,5~0.75 katı aralığında bulunduğu görülmüştür. Açıklanan katsayılar literatürde arazi sıkışma modülü ile ödometre deneyinden bulunan sıkışma modülü arasındaki katsayılara uyum göstermektedir.

Laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan ve örselenmemiş numunelerin kullanıldığı bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları oturma- logaritma düşey gerilme eksenlerinde çizilmiştir. Her iki grubun oturma eğrileri karşılaştırıldığında örselenmemiş numunelerin oturma eğrilerinin laboratuarda hazırlanan numunelerin oturma eğrilerinin sağ tarafında bulundukları görülmüştür. Genel olarak büyük eksenel gerilme değerlerinde örselenmemiş numunenin sıkışma indisinin laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunenin sıkışma indisinden daha büyük olduğu literatürde yapılan yayınlarda açıklanmaktadır. Ancak bu çalışmada tam tersi davranış görülmüştür. Ayrıca yeniden konsolide edilerek

hazırlanan numunenin yeniden yükleme indisinin örselenmemiş numunenin yeniden yükleme indisine oranı kabarma hassaslığı olarak tanımlanmaktadır. Arazideki zeminin daneleri arasındaki bağ kuvvetleri hakkında bilgi verdiği kabul edilen kabarma hassaslığı deney sonuçlarına dayalı hesaplanarak karşılaştırılmış ve her iki numune için 0.5'ten büyük bulunmuştur.

Ön konsolidasyon basıncının bulunmasında Casagrande yönteminin yanı sıra diğer yöntemlerin kullanımları araştırılmış ve deney sonuçları bu yöntemlere göre değerlendirilmiştir. Numunelerde bulunan olası örselenmelerin oturma eğrilerini etkiledikleri durumlarda ön konsolidasyon basıncının Casagrande yöntemi ile belirlenebilmesi kolay değildir. Örselenmelerin oturma eğrilerini etkilediği durumlarda, her iki eksenin logaritmik çizimi önerilmektedir. Her iki eksenin logaritmik çizimi oturma eğrilerinin iyileştirilmesine olanak sağlamamaktadır. Ancak bu biçimdeki çizimde oturma eğrileri yaklaşık iki doğrudur. İki doğrunun kesim noktasındaki gerilme ön konsolidasyon basıncı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada da $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme, (P) ve sıkışma modülü, (Mc) ile logaritma düşey efektif gerilme, (P) yöntemleri kullanılarak ön konsolidasyon basınçları üç farklı yöntemle dayalı hesaplanarak bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Böylelikle hesaplama yönteminin ön konsolidasyon basıncına etkisi gözlenmiştir. Deney sonuçları ayrıca düşey efektif gerilme-sıkışma modülü eksenlerinde çizilerek, her numunenin ön konsolidasyon basıncı gerilme aralıkları belirlenmiştir. Üç farklı yöntem ile bulunan ön konsolidasyon basınçlarının tanımlanan aralıkta bulundukları görülmüştür.

Hem bir boyutlu hem de üç boyutlu deney sonuçlarında sözü edilen hesap yöntemleri kullanılarak ön konsolidasyon basınçları hesaplanarak, farklı deney yöntemlerinin ve farklı hesaplama yöntemlerinin ön konsolidasyon basıncına etkileri araştırılmıştır.

Örselenmemiş numuneler ile yapılan bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ön konsolidasyon basınçları yukarıda açıklanan yöntemler ile belirlenerek numune tipinin ön konsolidasyon basıncına etkisi de incelenmiştir. Ön konsolidasyon basıncının belirlenmesinde bilindiği üzere en çok önerilen yöntem Schmertman düzeltmesidir. Örselenmemiş numunelerin deney sonuçlarında bu numunelerin sondaj bilgileri yeterli düzeyde bilinemediğinden, numuneler normal konsolide kabul edilerek, oturma eğrilerine Schmertman düzeltmesi uygulanarak arazi oturma eğrileri çizilmiştir.

İlave olarak numune alma yöntemlerinin ön konsolidasyon basıncına etkisi konu ile ilgili literatürde yapılan yayınlar okunarak araştırılmıştır.

Numuneler likit limit durumunda yüzde yüz suya doygun kabul edilerek likit limitte boşluk oranları (e_L) hesaplanmıştır. Oturma eğrilerinin, her iki eksen logaritmik olduğunda (ön konsolidasyon basıncına kadar ve ön konsolidasyon basıncı sonrası) yaklaşık iki doğru oldukları bilinmektedir. Ödometre deneyi sonuçlarında likit limitteki boşluk oranı (e_L) ile düşey efektif gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranı (e_{100}) arasında korelasyonun bulunup bulunmadığı araştırılmıştır. Bu korelasyonun zeminlerin ön konsolidasyon basıncı öncesi oturma davranışları hakkında genel görüş verebileceğine inanılmaktadır.

Ön konsolidasyon basıncından daha büyük gerilme değerlerinde boşluk oranı-logaritma düşey gerilme eksenlerinde, ince daneli zeminlerin oturma eğrileri doğrudur. Dolayısıyla sıkışma indisi ile likit limitteki boşluk oranı arasında da olası bağıntının olup olmadığı araştırılmıştır.

Benzer biçimde zeminlerin sıkışma indisleri ile plastisite indisleri arasında da herhangi olası bağıntının varlığı araştırılmıştır.

Normal konsolide killi zeminlerin oturma özellikleri ile ilgili matematiksel formüllerde zeminlerin plastisite indislerinin yanı sıra likit limit değerleri de kullanılmaktadır. Bu çalışmada da likit limit ile sıkışma indisi arasında korelasyonun varlığı ayrıca incelenmiştir.

Burland (1990)'da tanımlanan boşluk indisi parametresi ile hem bir boyutlu hem de üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları normalize edilmiştir.

Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında yukarıda açıklanan korelasyonlarda boşluk oranı yerine 100 kPa gerilme etkisindeki oturma miktarları kullanılmıştır. Düşey gerilme 100 kPa iken oturma miktarları ile likit limitteki boşluk oranı arasında korelasyonun varlığı araştırılmıştır. Yine bu grup deney sonuçlarında sıkışma indisi ile likit limitteki boşluk oranı ve sıkışma indisi ile plastisite indisi arasında olası korelasyonların bulunup bulunmadığı araştırılmıştır.

Ayrıca hem bir boyutlu hem de üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrilerinde, düşey efektif gerilme ile sıkışma modülü arasında da olası bağıntının varlığı incelenerek, düşük plastisiteli kil-silt olan N3 ile N7 dikkate

alınmadığında doğrusal, dikkate alındığında ise üst bağıntının bulunduğu gözlenmiştir.

Deney başıboşluk oranları, deney sonunda numuneler suya daha doygun olduklarından deney sonu su muhtevaları ile yeniden hesaplanıp düzeltilmiştir. Her numune ile yapılan tüm konsolidasyon deneylerinin deney başı boşluk oranlarının ortalaması ilgili numunenin likit limitteki boşluk oranı ile normalize edilmiştir. Normalize edilmiş deney başıboşluk oranları ile yukarıda açıklandığı biçimde belirlenen ön konsolidasyon basınçları arasında da olası bağıntılar araştırılmıştır.

Farklı plastisite indisli, yeniden konsolide edilerek hazırlanan 10 numunenin sınıflandırma ve oturma özellikleri arasında araştırılan korelasyonların kötü olmadığı, regresyon sayılarının genel olarak 0,9'dan büyük bulunması dolayısıyla söylenebilmektedir. Ancak pratikte kullanılabilmeleri için daha çok sayıda numunenin bulunduğu matematiksel formüllerin tercih edilmesi gerektiğine inanılmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Walker ve Indraratna (2009) spektral yöntemi kullanarak çok tabakalı zeminlerde zaman ile değişmeyen zemin özellikleri kullanarak, hem düşey hem radyal drenajı dikkate alarak ilave boşluk suyu basınçlarını belirlemişlerdir. Nümerik çözüm yönteminde düşey ve radyal deformasyonlar eşit kabul edilmiştir. Modelin doğruluğu, çözümlerde artan sayıda terim kullanılmasına bağlıdır. Söz konusu yöntem kullanılarak, zemin yüzeyine ilave yük ve vakum yükünün derinlikle ve zamanla değiştiği kabul edilerek çok sayıda konsolidasyon probleminin çözülebileceğini göstermişlerdir. Oluşturdukları diferansiyel denklemdeki zemin özellikleri hacimsel sıkışma sayısı m_v , düşey yöndeki permeabilite katsayısı k_v , η katsayısının zamandan bağımsız olduğu, derinlikle doğrusal değiştiği kabul edilmiştir. η katsayısı yatay drenaj ile ilgilidir. Yatay drenaj dikkate alınmak istenmediğinde bu katsayı sıfır olarak alınmaktadır. Diferansiyel denklemde radyal terim ihmal edildiğinde denklem Terzaghi'nin (1923) bir boyutlu konsolidasyon denklemi olmaktadır. Eğer denklemdeki düşey terim ihmal edilirse denklem Hansbo'nun (1981) radyal konsolidasyon denklemi olmaktadır. Çözüm yöntemi kullanılarak hesaplanan oturma oranının Terzaghi teorisi ile karşılaştırılmasında daha hızlı olduğu bulunmuştur. Ancak elde edilen sonuç kil tabakası kalınlığı büyük olduğunda geçerlidir. $k_{vt}/k_{vb} > 1$ olduğunda bu sonuca ulaşılmıştır. Terzaghi teorisinde $k_{vt}/k_{vb} = 1$ dir. Burada k_{vt} kil tabakası üzerinde bulunan tabakanın permeabilite katsayısı, k_{vb} kil tabakası altında bulunan tabakanın permeabilite katsayısıdır. Modelin en önemli eksikliği düşey ve radyal yöndeki deformasyonları eşit kabul etmesidir. Model küçük deformasyonlar için geçerlidir. Yazarlar modeli 2. Uluslar arası Bangkok havaalanı dolgularında ve Japonya'da Saga alanındaki konsolidasyon problemlerinde kullanmışlardır. Yerinde ölçülen oturmalar ile model kullanılarak hesaplanan oturmalar arasında iyi bir uyum bulunmuştur.

Konsolidasyon teorilerinin analizi ile ilgili diğer bir çalışma Schiffman ve diğ. (1969) tarafından yapılmıştır. Bir boyutlu Terzaghi (1923) teorisi ile sözde üç

boyutlu Verigin (1961) teorisi ve üç boyutlu Biot (1955, 1956) konsolidasyon teorilerinin karşılaştırması yapılmıştır. Standart teoride konsolidasyon anında herhangi bir zamanda sönümlenen ilave boşluk suyu basıncı, o andaki efektif gerilme artımına eşittir. Düşey yöndeki oturmayı da bu bileşen oluşturur. Yazarlara göre zemin yüzeyine yapılan ilave yükleme, zemin içerisinde üç yönde de toplam gerilmelerde artmaya neden olur. Dolayısıyla konsolidasyon oturması düşey yönden oluşmamaktadır. Yanal yönde de şekil değiştirmeler olmakta ve ilave boşluk suyu yanlara da hareket etmektedir. Bir boyutlu teori ile ilgili yapılan hesaplarda aşırı konsolide killerde konsolidasyon zamanının gerçektekinden daha fazla hesaplandığı bulunmuştur.

Sözde üç boyutlu teori, bir boyutlu teori ile üç boyutlu teori arasındadır. Eksikleri olmasına rağmen üç boyutlu konsolidasyon özelliklerine sahiptir. Toplam gerilme bileşenleri zamandan bağımsızdır. Aynı zamanda teori Poisson oranından da bağımsızdır. Mandel-Cryer etkisi geçerli değildir.

Üç boyutlu teoride dört değişken vardır. Bunların üçü deformasyon bileşenleri diğeri ilave boşluk suyu basıncıdır. Toplam gerilmeler ilave boşluk suyu basıncının ve zeminin bünye bağıntılarının fonksiyonudur. Teoride zemin suya doymun kabul edilip boşluklardaki su akımında Newton yasası geçerlidir. Mandel- Cryer etkisinin Mandel (1950, 1953), Cryer (1963) geçerliliği kabul edilmektedir. Drenaja açık yüzeyde yüklemeden kısa bir zaman sonra yüzeye yakın elemanlar drene olacaktır. Bu da deformasyonlara, toplam ve efektif gerilme artımlarına sebep olacaktır (drenaj olan bölgede). İç bölgelerde henüz drenaj başlamamış olacaktır. Deformasyonların sürekliliğinden dolayı, drenaj olan bölgelerdeki toplam gerilme artımı iç bölgelere transfer olacaktır. Böylelikle konsolidasyon başlarında toplam gerilme bileşenlerinde bir artım olacaktır. Yazarlara göre yatay toplam gerilme bileşenindeki artım düşey toplam gerilme bileşeninden fazladır. İşlem devam ederek drenaj alanı genişleyecektir. Mandel-Cryer, ya da gerilme transferi rötre olarak kabul edilip, Josselin De Jong (1965) yüzeyde kabuk oluştuğu varsayılmaktadır. Bu etki (gerilme transferi) konsolidasyon oranının derinlik arttıkça azaldığı varsayımına dayalıdır. Drenajı tamamlanan zemin elemanı komşu elemana basınç uygulamaktadır. Bu da zemin kütlelerinin kırılması ile ilgilidir.

Bir boyutlu teoride toplam gerilme bileşenleri konsolidasyon esnasında sabittir. Dolayısıyla maksimum kayma gerilmesi de sabittir. Zemin yüzeyine statik dış yük

ilave edildiğinde konsolidasyon esnasında en büyük kayma gerilmesi dikkate değer biçimde değişmektedir. Konsolidasyonun başlarında olmasa bile daha sonra kırılma olabilmektedir. İlave yükün zeminde oluşturduğu drenajsız kayma gerilmeleri zeminin drenajsız kayma mukavemeti değerine yakınsa durum tehlikelidir. Geçirimsiz zemin yüzeyi durumunda şerit yüklü alanın köşesi altında en büyük kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Zemin yüzeyi drenaja açık ise aynı durum geçerli değildir. Konsolidasyon esnasında özellikle hassas killerde kayma mukavemetindeki değişimin bilinmesi, olması muhtemel kırılma probleminin önlenmesi açısından önemlidir.

Konsolidasyon zamanı açısından bir boyutlu teori ile üç boyutlu teori karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu teoride ilave boşluk suyunun dağılımı 10 defa bir boyutlu teoriden daha fazladır. Eğer kil yumuşak kil ise Poisson oranı sıfıra yakındır. Bu durumda sözü edilen fark azalmaktadır. Hatta Poisson oranı sıfıra eşit olduğunda üç boyutlu teori konsolidasyonun başlarında bir boyutlu teoriye oranla daha yavaştır.

Sonuç olarak üç boyutlu teori hem bir boyutlu teoriden hem de sözde üç boyutlu teoriden gerçeğe daha uygun sonuçlar vermektedir. Ancak pratikte matematiksel formüllerin basitliği ve çok fazla alanda kullanılmış olması sebebi ile çoğunlukla bir boyutlu teorinin kullanımı tercih edilmektedir.

Standart konsolidasyon yöntemindeki eksiklikler isimli Duncan (1993) çalışmasında kil üzerine yapılan dolgularda, iki modern projenin düzenlenmesi ve inşaatı esnasında konsolidasyon oturmalarının hesaplanması ve bu oturmaların ne kadar zamanda oluşacağını belirlenmesindeki zorluklardan söz edilmiştir. Oturma ve oturma oranlarının gerçeğe daha uygun belirlenebilmesi için gerekli düzeltme yöntemleri de ayrıca çalışmada konu edilmiştir.

San Francisco rıhtımında bir alan 1967 yılından önce tarım arazisi olarak kullanılmaktadır. Söz konusu alanın su altında kalması ve suyun geri çekilmesi nedenleri ile çamur tabakası üzerinde karmaşık kabuk tabakası oluşmuştur. Bu tabaka alanın bazı bölgelerinde ince bazı bölgelerinde kalın bazı bölgelerinde ise hiç bulunmamaktadır. 1967 yılı başlarında kalınlığı 2,5- 6,0 m arasında değişen kum dolgu bu tabaka üzerine serilmiştir. Çamur tabakası kalınlığının fazla olduğu yerlerde kum dolgu kalınlığı da fazladır. Bölgede cadde ve binaların inşaatından önce çamur tabakasının konsolidasyon oturmasının büyük bölümünün tamamlanması amacı ile dolgu serildikten sonra 12 yıl beklenilmiştir. Çamur tabakasının en kalın olduğu 10

bölgede 45 oturma plağı yerleştirilerek arazideki oturmalar 1967 yılından 1979 yılına kadar ölçülmüştür. Tanımlanan süreçte 2 m büyüklükte oturmalar ölçülebilmıştır. Ayrıca oturmaların üniform olmadığı belirlenmiştir. Ölçülen oturmaların büyüklükleri 1 m ile 2 m arasındadır. Yazara göre oturmalar arasındaki farklılık çamur tabakasının farklı kalınlıkta olmasından kaynaklanmamaktadır. Oturma ölçümlerinin alındığı bölgelerde çamur tabakasının kalınlığı 14 m ile 15 m arasında değişmektedir. En küçük oturmanın ölçüldüğü noktada çamur tabakasının kalınlığı 14 m en büyük oturmanın ölçüldüğü noktada ise 14,6 m dir. Ölçülen oturma değerlerindeki farklılığın tabaka yüzeyindeki kabuk tabakasının kalınlığından kaynaklandığı savunulmaktadır. İnşaatların 23 m, 23 m kare alana yapımı planlanıp, sığ temel kullanımına karar verilmiştir. Herhangi bir bina altında oluşabilecek farklı oturmayı, bir firma en büyük 250 mm, başka bir firma 50 mm olarak hesaplamıştır. 100 mm farklı oturma değeri dikkate alınarak cadde inşaatlarında ve gider tesisatında ilgili düzenlemeler yapılmıştır. Temeller ise ön gerilmeli radye temel olarak inşa edilmiştir. Kasım 1997 yılına kadar ölçülen farklı oturmalar yaklaşık 45 mm-60 mm arasındadır. Mimari hasarlardan dolayı birkaç evde onarım yapılmıştır.

Kansai uluslararası havaalanı Osaka rıhtımına inşa edilen insan yapısı adadır. Ada 4,3 km uzunlukta 1,3 km genişliktedir. 1987 yılında inşaata başlanıp 1994 yılında uçak seferlerine başlanması planlanmıştır. Adanın inşa edildiği yerde su derinliği 18 m dir. Tabanda 20 m yumuşak alüvyonlu kil tabakası, bunun altında içerisinde kum tabakası ve kum mercekleri bulunan 150 m kalınlığında başka bir kil tabakası bulunmaktadır. Dolgu kalınlığı 33 m ve çok geniş bir alandadır. Buna bağlı olarak zemin içerisinde oluşturacağı ilave gerilme çok büyüktür. Kil zeminler aşırı konsolide olduğundan fazla oturma beklenmemektedir. Yapılan dolgu geniş bölgede olduğundan zemin kesiti içerisinde yüzeyden 150 m derinliğe kadar olan bölgede oturma beklenilmektedir. Alüvyonlu kil tabakasında kum drenler ile beklenen konsolidasyon oturması hızlandırılmıştır. Havaalanı kullanıma geçtiğinde bu tabakadaki oturmalar tamamlanmış olacaktır. Bu tabakanın altındaki kil tabakasında beklenen oturma miktarı yaklaşık 5,5 m dir. Başlangıçta tabakanın kalın olması sebebi ile drenajın geç olacağı ve havaalanı açıldığında 0,3 m oturmanın oluşacağı kabul edilmiştir. Sözü edilen bu değerler tahminlere dayalıdır. Bunların kanıtlanması amacı ile ölçüm alanı inşa edilmiştir. 335 m uzunluğunda 170 m genişliğindeki bu alanda oturmaların yanı sıra boşluk suyu basınçları da hem dolgu derinliğince hem

de alttaki zemin tabakaları boyunca ölçülmektedir. Ölçülen ve hesaplanan değerler karşılaştırıldığında, alüvyonlu kil tabakasında gerçek değerinden biraz fazla buna karşın diğer kil tabakasında hesaplanan değer çok üzerinde oturma değerleri görülmüştür. Yine drenajın yavaş olacağı hesap edilirken çok hızlı olduğu bulunmuştur. Böylece tabaka içerisindeki kum mercekleri ile kum tabakalarının yeterli drenajı sağladığı gözlenmiştir. Yeni hesap modeli geliştirilerek ölçülen değerler ile hesaplanan değerler arasında iyi uyum bulunmuştur. Beklenen toplam oturma dolgu için 0,6 m alüvyonlu kil tabakası için 5,5 m diğer kil için 5,5 m olmak üzere toplam 11,6 m dir. Havaalanı açıldıktan sonra 1,5 m ile 1,8 m arasında oturma beklenmektedir. Terminal binasının inşası farklı oturmalarından olabilecek zararı önlemek için iki özelliğe dayalı projelendirilmiştir. İlki, kazı ile kaldırılan ağırlığın dengelenmesi amacı ile tabana demir cevheri yerleştirilmesi ikincisi ise, terminal binasındaki her kolon, tabliyenin farklı oturmalarından görebilecekleri zararın önlenmesi nedeni ile ayarlanabilir tabana yerleştirilmesidir. Kolonlar 400 mm kadar uzatılıp kısaltılabilir biçimde tasarlanmıştır.

Bu işlemler yapılırken, ön konsolidasyon basınçlarının belirlenmesinde, konsolidasyon katsayılarının seçiminde, kil tabakaları içerisinde bulunan kum tabakalarının yeterli drenajı sağlayıp sağlamayacağı ve standart konsolidasyon yöntemindeki eksiklikler olmak üzere pek çok sorun ile karşılaşmıştır. Konsolidasyon oturması ve oranlarının belirlenmesinde arazideki durumu daha iyi model edebilecek bilgisayar programlarının kullanılması gereklidir.

Bir boyutlu konsolidasyon problemleri ile ilgili diğer bir çalışma Olson ve Ladd (1979) çalışmasında yapılmıştır. Çalışmada konsolidasyon probleminin çözümü sonlu farklar yöntemi ve bir boyutlu yöntem kullanılarak yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonlu fark çözümü iki adımdan oluşmaktadır: (1) Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra düğüm noktalarında aşağıya doğru ilave boşluk suyu basınçları belirli zamanlarda hesaplanır. (2) Bilinen toplam gerilmelerden ve boşluk suyu basınçlarından efektif gerilmeler ve oturmalar hesaplanmaktadır. Çözümde tabaka kendi içerisinde alt tabakalara bölünüp, her tabakanın boşluk oranı, konsolidasyon katsayısı, permeabilite katsayısına karşın efektif gerilme grafikleri, birim hacim ağırlıkları belirlenir. Deformasyon devam ederken düğüm noktaları arası mesafeler sabit kalmayıp değişecektir. Sonlu fark çözümde tabakalardaki zemin özelliklerinin değişimi, büyük ve üniform olmayan deformasyonların etkileri

otomatik olarak dikkate alınmaktadır. Zamana bağımlı ve kademe olarak yük artımı dikkate alınmıştır. Dolgu yapımlarında gerçekte de basınç artımları bu biçimdedir. Hesaplamalarda basınç artımından hemen sonra ve 100 gün sonrası dikkate alınabilmektedir.

Standart teoride konsolidasyon esnasında drenaj yüksekliğinin sabit kaldığı kabulü ile deformasyonların küçük olduğu varsayılmaktadır. Yazarlara göre bu yöntem kullanılarak binaların altında oluşabilecek oturma hesaplarında hatalar izin verilebilen sınırlar içerisindedir. Ancak sıkışabilir zeminler üzerine dolgu inşa edildiğinde durum böyle değildir. Söz gelimi Weber (1969) drenaj kalınlığının konsolidasyon esnasında 80% azaldığını ilgili yayında söylemektedir. Zeminler lineer elastik değildir. Bu kabulün yapılması ile oluşan hatalar kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.

Pratikte birçok problemin çözümünde sonlu fark, fourier serisi ve standart yöntem kullanılarak oturma zamanları, nihai oturma değerleri hesaplanmıştır. Üç farklı çözüm yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonlu fark ve Fourier çözümlerinden farklı sonuçlar gözlenmiştir. Farklı sonuç bulunmasının en önemli nedenleri olarak, Fourier çözümlerinde ortalama konsolidasyon katsayısının kullanılması, Fourier serisi çözümlerinde büyük deformasyonların etkisinin dikkate alınmaması yine bu çözüm yönteminde lineer elastik davranışın geçerli olduğunun kabulü, zeminlerdeki tabakalanmanın dikkate alınmak istenmesi halinde tabaka kalınlığındaki değişimin düzeltilememesi söylenebilir. Sonlu fark çözüm yöntemini kullanmak standart teoride yapılan kabullerin neden olduğu bazı belirsizlikleri kaldırabilmektedir. Bununla beraber standart teori, mevcut ve kullanımı kolay olmasından dolayı çok yaygın biçimde kullanılmaktadır. Sonuçlardaki belirsizliklerin en önemli kaynağı problemin, zemin özelliklerinin ve yükleme durumunun arazideki durumu tam olarak yansıtmadan analitik çözümlerde kullanılmasıdır. Büyük deformasyonlar, zamana bağımlı yükleme, zemindeki tabakalanma gibi arazideki durum daha iyi model edildiğinde standart yöntem kullanılarak ta kabul edilebilir sonuçların elde edilmesi mümkündür.

Killi zeminlerde düşey dren kullanılarak konsolidasyon oturması hızlandırılmaktadır. Baek ve Moriwaki (2004) geliştirdikleri deney sistemi ile arazideki durumu model ederek ikinci oturmayı da içeren toplam oturmayı belirleyebildikleri gibi hem radyal yönde oluşan deformasyonları hem de numune içerisinde oluşan ilave boşluk suyu

basınçlarını ölçebiliyorlar. Deney sisteminde dairesel 60 mm çapında, ortası 12 mm çapında boşluklu 20 mm yüksekliğinde numune kullanılmaktadır. Numunenin dış çevresinde konsolidasyon ringi, iç çevresinde geçirimli konsolidasyon ringi ve numune ortasında dren bulunmaktadır. Numune tabanına yerleştirdikleri 3 basınç ölçer ile konsolidasyon esnasında oluşan ilave boşluk suyu basınçlarını ölçebiliyorlar. Radyal yöndeki deformasyonları, numune içerisine, 2 mm * 4 mm * 3 mm boyutlarına sahip mıknatısları gömerek elde edilen manyetik alanın yoğunluğunun numune merkezinde bulunan düşey drene ve dış konsolidasyon ringine yerleştirilen manyetik sen sörler kullanılarak ölçülmesi ile hesaplayabiliyorlar. Deney sisteminin sınır koşulları, numunenin alt ve üst yüzeyleri ile konsolidasyon ringleri ile olan yüzeyleridir. Ringler şekil değiştirmedeği için bu yüzeyler sabittir. Ortası boşluklu numunenin üst yüzeyi konsolidasyon esnasında deney başındaki orijinal durumuna paralel oturmaktadır (üniform deformasyon kabulü). Bu sınır koşulu pratikte çoğunlukla kabul edilen, düşey drenlerle iyileştirilen yumuşak kil tabakası üzerine şekil değiştirmeyen gerilme artımı uygulamasıdır.

Çalışmada, mıknatısları dren merkezinden ölçülmek üzere değişik mesafelere gömerek çok sayıda kalibrasyon deneyi yapılmıştır. Mıknatıs aynı noktaya üç defa gömülerek hem bir boyutlu hem de radyal konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bir boyutlu deneylerde drenaja yalnızca alt yüzeyden izin verilmektedir (düşey dren drenaja kapalı). Radyal yönde ise drenaja, düşey drenin bulunduğu yüzey açık bırakılmaktadır. Dolayısıyla konsolidasyon esnasında su akımı radyal yönde oluşurken oturma düşey yönde oluşmaktadır. Şekil değiştirmeler yalnız düşey yönde değil yanal yönde de oluşmaktadır. Deney sonuçlarına göre bir boyutlu konsolidasyon esnasında, mıknatıs düşey yönde hareket ederken, düşey dren durumunda ise ilk drene doğru, daha sonra tabana doğru hareket etmektedir. Drenaja açık kenara yakın elemanda hacimsel deformasyonlar oluşurken, drenaja uzak elemanlarda henüz ilave boşluk suyu basıncında dağılım başlamamıştır. Bu elemanlarda ilave boşluk suyu basıncı sönmüldikten sonra içindeki elemanlarda hacimsel deformasyonlar başlayacaktır. Bu esnada deformasyonların sürekliliğinden drenajı tamamlanan bölgede kayma deformasyonları oluşacaktır. Deformasyon bileşenlerindeki fark nedeni ile konsolidasyonun ileri aşamalarında drenaja açık kenardan drenaja kapalı kenara doğru radyal yer değiştirmeler oluşacaktır.

Çalışmada kalibrasyon deneyleri hem normal konsolide hem de aşırı konsolide durumlar için aynı kil kullanılarak yapılmıştır. Normal konsolide durumda üç boyutlu konsolidasyonda oturma-zaman grafiklerinden, konsolidasyon basıncı arttıkça oturmaların azaldığı görülmektedir. Yük artım oranı 1 ve kilin sıkışma indisi aynı ise konsolidasyon basınçları farklı bile olsa oturma değerleri aynı olarak bulunmuştur. Drenaja açık tarafta oluşan radyal yer değiştirmelerin değeri, drenaja kapalı tarafta oluşan değerlerinden daha büyüktür. Bu davranış Kumamoto (1988) elastik modeline dayalı olarak üç boyutlu konsolidasyon teorisi yardımı ile açıklanabilmektedir. Konsolidasyonun son aşamalarına doğru 1000~2000 dakikadan sonra, drenaja açık tarafta oluşan radyal deformasyonlar iç tarafa doğru oluşmaktadır. Drenaja kapalı tarafta ise radyal deformasyonlar dış tarafa doğru oluşmaktadır. Bu zamanda numunenin her tarafında ilave boşluk suyu basınçları sönmülmüş durumdadır. Yazarlara göre bu davranış, numune sabit gerilmeye maruz iken deformasyonların devam etmesi ile kilin ikinci oturmasıdır.

Aşırı konsolide killi zeminlerde oturma miktarının, zeminin aşırı konsolidasyon oranı ile önemli ölçüde değişim gösterdiği bilinmektedir. Aşırı konsolidasyon oranı arttıkça oturma miktarı azalmaktadır.

Numunede oluşan radyal deformasyonların en büyük değeri konsolidasyon basıncı arttıkça artmaktadır. Normal konsolide kil zemin için üç boyutlu konsolidasyon esnasında deformasyon- zaman eğrilerinin eğimi konsolidasyonun ileri aşamalarında zamanla azalarak sabit bir değere ulaşmaktadır. Aşırı konsolide kil için aşırı konsolidasyon oranı 2 ile 4 arasında ise deformasyon-zaman eğrileri başlangıçta zamanla artım gösterip daha sonra normal konsolide durumdaki değerine gelmektedir.

Bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları kullanılarak konsolidasyon katsayısının hesaplanması geoteknik mühendisliğinde yaygındır. Deformasyon-hız grafiği çizilerek konsolidasyon katsayısının hesaplanması ile ilgili çalışma Mckinley ve Sıvakumar (2009) tarafından yapılmıştır. Deneysel davranışa uygun model parametrelerinin belirlenmesi, model parametrelerinin değerlerinin tahmini ile modelin uygulanacağı aralığın belirlenmesine bağlıdır. Çalışmada deformasyonun düzeltilmiş sıfır değeri ile birinci konsolidasyonun yüzde yüz değerinin belirlenmesine yöntem sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar Taylor yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonlu fark yöntemi ile deneysel veriler kullanılarak hız ve

deformasyon değerleri hesaplanıp, bu değerler kullanılarak grafik çizilmektedir. Göz kararı grafikteki doğru olan bölüm belirlenerek deformasyonun 50% değeri tespit edilmektedir. Doğrusal bölümde regresyon yöntemi ile yüzde yüz oturma hesaplanır. Yine hız-deformasyon grafiği çizilerek doğrusal bölüm belirlenir. İlgili 50% değeri okunmaktadır. Doğrusal bölümde doğrusal regresyon kullanılarak sıfır deformasyon değeri belirlenir. Sıfır ve yüzde-yüz oturma değerleri ile 50% oturma değeri hesaplanmaktadır. Birinci konsolidasyondaki zamanın 50% si doğrusal enterpolasyon ile hesaplanır. Standart formül ve çalışmadaki formüller kullanılarak konsolidasyon katsayısı hesaplanmaktadır. Konsolidasyon deneyleri için laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan killi numuneler kullanılmıştır. Taylor yöntemi ile belirlenen sıfır ve yüzde-yüz deformasyon değerleri, hız-deformasyon yöntemi ile hesaplanan değerlerine uygundur.

Chai ve diğ. (2009) yayınında standart ödometre koşullarında vakum basıncı ile ilave basınç uygulanması durumlarında zemin tabakalarının sırasının etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada Maruto'nun 5 hücreli ödometre aleti kullanılmıştır (Chai ve diğ. 2005b). Laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan Ariake kili ile 50% kil ve 50% kum (2mm den geçen) karışımı olarak, iki tabaka kullanılmıştır. Bir yönden drenaja açık ve iki yönden drenaja açık olma durumlarında da deneyler yapılmıştır. Kullanılan numunelerin çapı 60 mm ve yüksekliği 20 mm dir. Bir yönden drenaja açık iken, 80 kPa ilave gerilme ve vakum basıncında (numune üst başlıktan drenaja açık) hem ilave gerilme hem de vakum basıncında toplam oturma yaklaşık olarak aynı belirlenerek, zemin tabakalarının sırasının toplam oturmaya etkisinin olmadığı bulunmuştur. Bununla beraber zemin tabakalarının sırasının konsolidasyon oranına etkisinin bulunduğu açıktır. Vakum basıncı uygulamasında, drenaja açık yöne kil daha sonra kum kil karışımı kullanıldığında 50% oturma için 37 dakika geçerken, kum kil karışımı daha sonra kil kullanıldığında bu süre 28,5 dakikadır. İki yönden drenaja açık olduğunda ilave gerilme uygulanmasında zemin tabakalarının sırasının hem toplam oturmaya hem de oturma oranına etkisi yoktur. Her iki durum içinde toplam oturma miktarı aynı değer olarak bulunmuştur. Buna karşın vakum basıncı uygulamasında zemin tabakalarının sırası konsolidasyon oranını etkilemekle kalmayıp toplam oturma değerlerini de etkilemektedir. Üstte kum kil karışımı daha sonra kil kullanıldığında hem konsolidasyon oranı daha hızlı hem de daha büyük oturma değeri gözlenmektedir. Bu sıralamada toplam oturma 0,94 mm iken tersi

sıralamada 0,80 mm bulunmuştur. Oturma oranlarına bakıldığında 50% oturma için 28,5 dakika geçerken tersi sıralamada 43,3 dakika geçmektedir. Yazarlara göre oluşan farkın nedeni; iki yönden drenaja açık durumda, vakum basıncı uygulanan sınıra doğru sabit su akımının oluşmasıdır. Su akımında süreklilik denkleminin sağlanması için zemin tabakalarındaki vakum basıncı dağılımı rölatif permeabilite katsayısının fonksiyonu olmakla birlikte zemin tabakalarının sırasına da bağlıdır. Vakum basıncı uygulanması esnasında ring ile zemin arasından sızma olması ve vakum basıncının üniform dağılmamasından farklı sonucun kaynaklandığı düşünülmektedir.

Killi zeminlerin konsolidasyonu nedeniyle boşluk boyutu dağılımındaki değişim Griffith ve Joshi (1989) tarafından yapılan çalışmada araştırılmıştır. Konsolidasyon esnasında killi zeminlerin davranışını inceleyen iki görüş bulunmaktadır. Makro açıdan konsolidasyon, boşluk suyundaki ilave gerilmenin danelere aktarılmasıdır (Lambe, 1951). Mikro açıdan ise Van Olphen (1977), Nagaraj ve Srinivasa Murthy (1983) daneler ya da agregalar arasındaki kuvvetlere bağlı fiziksel-kimyasal görüşlere dayalıdır. Mikro açıdan daneler arası boşlukların araştırılmasında kullanılan yöntemlerden birisi, boşluklara cıva yerleştirilmesidir. Diğer yaygın biçimde kullanılan yöntem ise boşlukların fotoğraflanmasıdır. Cıva yerleşme yönteminde numunelerin etüvde, açık havada ya da dondurularak kurutulması deney sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışmada dört farklı kil numune kullanılmış ve dondurularak kurutulmuştur. Cıva yerleşme yönteminde temel kural, kuru yüzeylere basınç olmadan cıvanın yerleşmeyeceğidir. Cıvanın boşluklara ilk yerleşmesinde bütün boşlukların dolduğu kabul edilerek, yerleşen cıva miktarından toplam porozite belirlenir. Cıvanın yerleşmesinde uygulanan basınç geri alınarak, cıvanın boşluklardan atılması sağlanır. Ancak bir miktar cıva zemin boşluklarında kalacaktır. Bu halde ikinci cıva yerleşmesi ile zeminin serbest porozitesi belirlenecektir. İki değer arasındaki farkın boşluklarda kalan cıva olduğu açıktır. Merak edilen, cıvanın yerleşmesi için uygulanan basıncın daneler arası kuvvetleri etkileyip etkilemediğidir. Lawrence (1978) çalışmasında cıvanın yerleşmesi için uygulanan basıncın daneler arası kuvvetleri etkilemediği kabul edilmektedir. Likit limit durumundaki numunelerin konsolidasyon esnasında boşluk boyutlarının belirlenmesinde cıva yerleşme yönteminin en uygun yöntem olduğu, yapılan çok sayıda deney sonucuna bağlı olarak bulunmuştur. Konsolidasyon gerilmesi arttıkça

büyük boşlukların etkilendiği, toplam porozitenin azaldığı, küçük boşlukların etkileneceği, serbest porozitenin aynı kaldığı ve daneler arasında kümeleşmenin olmadığı bulunmuştur. Deney sonuçları fotoğraf yöntemi ile de karşılaştırılmış ve iyi bir uyumun olduğu gözlenmiştir.

Konsolidasyon ile ilgili diğer bir çalışma Biot (1941) tarafından yapılmıştır. Zemin özelliklerinin tanımlanması için gerekli fiziksel sabitler, üç boyutlu olarak gerilme ve oturmaların belirlenmesinde kullanılan genel denklemler ile belirlenmektedir. Zamanla değişen gerilme durumunda, lineer elastik izotrop ortamda denklemler üç boyutta dikkate alınmaktadır. Zemini oluşturan danelerin, daneler etrafındaki yüzey kuvvetleri ile bir arada tutulduğu ve çok az da olsa minimum potansiyel enerjinin var olduğu kabul edilmektedir. Bu durum özellikle küçük dane boyutuna sahip killi zeminler için geçerlidir. Denklemlerde dikkate alınması gereken diğer bir durum, gerilme değişimi uygulanmadan önceki gerilme durumudur. Çalışmada oluşturulan denklemler ile zemin içerisinde gerilme ya da su basıncı dağılımı hesaplanmadan oturma miktarının hesaplanabilmesidir. İki veya üç boyutlu karmaşık problemlerin çözümüne olanak sağlamaktadır. Potansiyel enerjinin var olduğu kabulü ile zeminde gerilme değişimi olmadan su muhtevası ve deformasyon durumunun, gerilme değişiminden sonraki denge durumuna gelmesi için yapılan iş izlenen yoldan bağımsızdır ve su muhtevası ile altı deformasyon bileşeninin fonksiyonudur. Belirsiz miktarda enerji zemine basınç uygulanması, basıncın geri alınması esnasında zeminden atılır. Çalışmada oluşturulan denklemler bir boyutlu konsolidasyon için uygulanmıştır.

Dairesel temellerin düşey kuvvet, yatay kuvvet ve moment yükleri altındaki davranışları çok sayıda kuvvet bileşimi düşünülerek üç boyutlu sonlu eleman çözüm yöntemi kullanılarak Taiebat ve Carter (2010) yayınında araştırılmıştır. Çalışmada zemin tabakası homojen, üniform kil olarak dikkate alınıp, deformasyonların drenajsız koşullarda olduğu varsayılmıştır. Klasik çözümlerde bulunan eksiklikler, kuvvetin etkiye şekli, eksantrisite, temel şekli vs limit denge çözümleri veya deneysel çözümlerle düzeltilmeye çalışılmıştır. Eksantrisite genel olarak etkin genişlik ile düzeltilirken, kuvvetin etkiye biçimi; kuvvetin düşey bileşenine karşılık temelin taşıma kapasitesinin azaltılması ile düzeltilmektedir. Dolayısıyla tek ve kesin kırılma yüzeyi tanımlanamamıştır. Bu çalışmada çok sayıda çözüm yapılmasının amacı kırılma yüzeyinin belirlenmesidir. Zemin elastik-tam plastik Tresca kırılma

hipotezine uymaktadır. Zemin ve temel ara yüzeyinde çekme gerilmelerinin olmadığı kabul edilmektedir. Çekme gerilmeleri var kabul edildiğinde normalite kuralına uyulmamaktadır. Temel ile zemin ara yüzeyinde çok ince ayrılmanın olması halinde kayma gerilmeleri de oluşmamaktadır. Bu aşamada dengelenmemiş gerilmeler sonlu eleman ağında komşu düğüm noktalarına yeniden dağıtılmaktadır. Düşey yöndeki kuvvet sıfır olduğunda temelin moment taşıma kapasitesi de bulunmamaktadır. Kırılma yüzeyi, temel- zemin ara yüzeyinde çekme gerilmeleri sıfır kabul edildiğinde çekme gerilmesinin var olmasına oranla daha az simetriktr. Standart yöntem ile Vesic (1973) elde edilen kırılma zarfı, bu çalışmada oluşturulan kırılma zarfı ile karşılaştırıldığında, standart yöntem göçme kuvvetini, düşey gerilme, küçük yatay gerilme, büyük gerilme bileşeni için, daha büyük değer olarak vermektedir. Bununla beraber daha değişik gerilme bileşenleri için göçme kuvvetini daha küçük değer olarak hesaplamaktadır. Eksantrisite'nin etkisinde efektif alan kuralının uygun olduğu bulunmuştur. Yazarlar kuvvetin etkime biçimi için, standart yöntemdeki katsayı yerine kendi geliştirdikleri katsayının kullanılmasını önermektedirler.

Geoteknik mühendisliğinde yapılan kabullerden birisi yatay düzlemde izotropinin varlığıdır. Bununla beraber, zeminlerin oluşumları esnasında, yer çekimi kuvvetinin etkisi ile oturmalarında, özellikle buzullar ile oluşan zeminlerde yatay düzlemde izotropik olmayan özellikler bulunmaktadır. Bu tür buzul killerinin gerilme ve deformasyon özelliklerinin deneysel olarak daha iyi anlaşılması amacı ile yanal gerilme-ödometre deney aleti Gareau ve diğ. (2006) geliştirilmiştir. Sözü edilen alet, zeminlerin anizotropik rijitliğinin belirlenmesine de olanak sağlamaktadır. Ödometre ringinde ring düzleminde üç ayrı noktada normal gerilmeler ölçülebilmektedir. Ölçülen üç normal gerilme düzlemde en büyük ve en küçük asal gerilmelerin büyüklüğü ile yönlerinin belirlenmesi analizinde kullanılmaktadır. Kullanılan çözüm yöntemi ring ile zemin ara yüzeyinde kaymanın olmaması halinde geçerlidir. Bu durumda tamamen pürüzlü yüzeye sahip ödometre ringi gerektirmektedir. Ödometre ringi çevresi boyunca sinüzoidal olarak değişen radyal gerilme dağılımı olacaktır. Kayma gerilmesi sinüzoidal dağılıma bağlı olarak değişim gösterecektir. Genel olarak ringin pürüzlülüğü kayma gerilmelerini taşımaya yeterli olmayıp, ödometre sınırı boyunca bölgesel kırılmaya neden olacaktır. Sözü edilen durum numunede düzlemde homojen olmayan gerilme ve deformasyon oluşumuna neden olmaktadır. Ringin pürüzlülüğü, ödometre sınırı boyunca teğetsel sürtünme kaybına karşılık

eksenel sürtünme kaybının dikkate alınması ile belirlenebilir. Ödometre ringi boyunca oluşan bölgesel kırılmaların ne kadar hataya sebep olduğu tamamen pürüzsüz ödometre ringi kullanılarak Rohe ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada araştırılmıştır. Çalışmada ring boyunca radyal deformasyon sıfır kabul edilmiştir. Tamamen pürüzsüz ringde, ring ile zemin arasında kayma gerilmeleri de sıfır alınmaktadır. Deneysel olarak belirlenen ring pürüzlülük katsayısının analitik çözümde kullanımı, kesin tam pürüzlü çözüm ile yaklaşık pürüzsüz çözüm arasında lineer enterpolasyon ile belirlenen yaklaşık orta çözüm sunmaktadır. Çalışmada tamamen pürüzlü ring durumunda yapılan temel kabul, ring boyunca zemin ve ring ara yüzeyinde kırılmanın olmadığıdır. Sözü edilen durum, düzlemde bütün numunede deformasyonun sıfır olması anlamında olup, üniform anizotropik gerilme durumudur.

Üniform anizotropik gerilmeler en büyük ve en küçük asal gerilmeler olarak hesaplanabilmektedir. Polar koordinatlarda da normal radyal gerilme, normal teğet gerilme ve kayma gerilmesi tam pürüzlü ring için çalışmada verilen denklemler kullanılarak hesaplanabilmektedir. Böylece ring çevresi boyunca radyal gerilme, teğet gerilme ve kayma gerilmesi sinüzoidal dalgalar biçiminde gösterilebilmektedirler. Yanal gerilme-ödometre deney aletinde Remijn (2004) tarafından yapılan deneylerde, numune boyutları çap; 25 mm, yükseklik; 30 mm dir. Deney esnasında beş eksenel gerilme artımı numune üzerinden uygulanırken, numune tabanında gerilme miktarları ölçülmektedir. Gerilme artımı uygulandığı esnada ring çevresinde üç ayrı noktada gerilmeler ölçülebilmektedir. Numune üzerinden uygulanan gerilme kullanılarak hesaplanan anizotropi oranı gerilme seviyesi arttıkça azalmaktadır. Eksenel hareket için ortalama eksenel sürtünme katsayısı, numune üzerinden uygulanan eksenel gerilme ile numune tabanında ölçülen gerilme farkına, ortalama yanal gerilmeye, numune çapı ve yüksekliğine bağlıdır. Sürtünme katsayıları numune üzerinden uygulanan gerilmenin artması ile azalmaktadır. Tamamen pürüzsüz ring durumunda, ring ile zemin arasında kayma gerilmeleri sıfırdır. Pürüzlü ödometre ringi numunedeki anizotropiyi daha küçük vermektedir. Anizotropi oranından kaynaklanan rölatif hata 9% ~ 13% aralığının da bulunup artan eksenel efektif gerilme ile artmaktadır.

Islanma ve gerilme artımlarına maruz kalma durumlarında sıkıştırılmış Londra kilinin mikro yapısının araştırılması ile ilgili çalışma Monroy ve diğ. (2010)

tarafından yapılmıştır. Suya doymun olmayan killi zeminlerin davranışı ile ilgili bilinenlerin çoğunluğu, laboratuarda sıkıştırılarak hazırlanan numuneler kullanılarak yapılan deney sonuçlarından temin edilmiştir. 1970 li yıllarda değişik araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda optimum su muhtevsından kuru tarafta statik olarak sıkıştırılan numunelerde genel olarak boşluk boyutu dağılımlarının iki tür olduğu bulunmuştur (Diamond, 1970; Sridharan ve diğ.1971; Ahmed ve diğ. 1974; Garcia-Bengochea ve diğ.1979). Literatürde mevcut bünye denklemlerinin çoğunluğu ile suya doymun olmayan zeminlerin önemli özellikleri belirlenebilmektedir. Bununla beraber killi zeminlerin karmaşık davranışları detaylı olarak araştırılmak istendiğinde hiçbir model denklemlerinde zemin dokusunun etkisini dikkate almamaktadır. Yeniden düzenlenmiş Barselona modeli, iki poroziteli doku ile sınırlı olmasına rağmen zemin dokusunun etkisini dikkate almaktadır. Sözü edilen model a- aktif kil mineralleri ile ilgili mikro yapıyı ve kil minerallerinin yakın çevresini, b- zeminin büyük ölçekteki yapısını dikkate almaktadır. Lloret ve diğ. (2003) modelin zemin davranışını ve bu davranışın nedenlerinin anlaşılmasında yeterli olduğunu açıklamışlardır. Bununla beraber modelde yapılan kabulleri destekleyen deneysel veriler yeterli değildir. Ayrışmış Londra kili kurutularak toz haline getirilmiştir. Optimum su muhtevsından kuru tarafta kalacak biçimde belirlenen su miktarı ile karıştırılıp, havası alınan torbalarda 3 ay bekletilmiştir. Daha sonra modifiye Proktor yöntemi ile statik olarak sıkıştırılıp, çapı 75 mm, yüksekliği 30 mm olan ödometre ringine alınmıştır. Çalışmada kullanılan numunelerin hepsi aynı başlangıç özelliklerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan 83 numunenin 8'i doku ile ilgili çalışmalarda kullanılırken diğerleri gerilme artımı, gerilme azaltılması, ıslanma-kuruma içeren karmaşık gerilme izi çalışmalarında kullanılmıştır. Deneylerde hem standart hem de osmotik ödometre aletleri kullanılmıştır. Mikro yapının araştırılmasında sıkıştırılmış numunelerden iki set 1gr - 2gr ağırlığında küçük numuneler alınmıştır. Bir set deney başlangıcındaki dokuyu koruyarak, dondurularak kurutulup cıva yerleşme yönteminde kullanılmıştır. Diğer elektron mikroskobu yönteminde kullanılmıştır. Bu yöntem numunenin doğal su muhtevsında araştırılmasına olanak sağladığından ön hazırlık gerektirmemektedir. Zemin dokusunun araştırılmasında cıva yerleşme yöntemi 1970'lerden bu yana kullanılmaktadır. Basınca dayanıklı kapalı bir kaba yerleştirilen numuneye ilk olarak vakum uygulanmaktadır. Daha sonra kaba cıva doldurulur. Cıva basıncı adım-adım arttırılmaktadır. Cıva basıncının artımı cıvanın zemin boşluklarına yerleşmesine

neden olmaktadır. Her basınç artımında numuneye yerleşen cıva hacmi kaydedilir. Optimum su muhtevasından kuru tarafta sıkıştırılan numunelerde doku, kil minerallerinin yüz yüze öbekleşmesi ile agregalar biçiminde oluşmaktadır. Agregalar arası boşluklar iyi tanımlanmıştır. Sekiz numune ıslanma ve gerilme artımı, gerilme izlerine maruz bırakılarak, her gerilme izinin sonunda zemin dokusu hem cıva yerleşme hem de elektron mikroskobu yöntemleri ile araştırılmıştır. Serbest kabarmaya bırakılan numunelerde dokunun agrega türünden matris türüne geçtiği görülmüştür. Söz konusu geçiş, emme basıncının 40 kPa dan 0 kPa azaltılmasında görülmektedir. Emme basıncı 1000 kPa–40 kPa aralığında iken orijinal yapının korunduğu bulunmuştur. Çalışmada yapılan deney sonuçlarından, zemin dokusunun gerilme izine bağımlı olduğu ve mikro yapının çok karmaşık olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gerilme artımı, büyük boşlukların hacminde ve boyutunda azalmaya neden olurken, ıslanma orijinal agrega türü dokunun yok olmasına sebep olmaktadır.

Oturma özellikleri farklı, iki komşu tabakanın bir boyutlu oturma özellikleri ilk olarak Gray (1945) tarafından araştırılmıştır. Tabakalı zeminlerin bir boyutlu konsolidasyonu için genel analitik çözüm Schiffman ve Stein (1970) tarafından geliştirilmiştir. Lee ve diğ. (1992) yayınında tabakalı zeminlerin konsolidasyonu esnasında zeminin hacimsel sıkışma sayısı ile permeabilite sayısının etkisini dikkate alan oldukça uygun analitik çözüm yöntemi oluşturulmuştur. Zemin tabakalarının hacimsel sıkışma sayısı, bir boyutlu oturmanın süresini önemli ölçüde etkilemektedir. Oturma özellikleri farklı, tabakalı zeminlerde bir boyutlu konsolidasyon teorileri; ilave boşluk suyu basıncı ve oturmayı, yalnızca ilave boşluk suyu basıncını dikkate alan çözümler ile Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon denklemi sonlu eleman yöntemi kullanılarak Huang ve Griffiths (2010) tarafından yapılan çalışmada yeniden çözülmüştür. Terzaghi denkleminin sonlu eleman yöntemi kullanılarak çözümü, tabakalar arasında akımın süreklilik şartının sağlanmaması sebebi ile hatalı sonuçların gözlenmesine neden olmaktadır. Hem ilave boşluk suyu basıncını hem de oturmayı dikkate alan çözümlerde; ortalama konsolidasyon derecesi, tabakalı zeminde çözümün oturmayı veya ilave boşluk suyu basıncını tanımlamasına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yalnızca ilave boşluk suyu basıncı dikkate alındığında, ortalama konsolidasyon derecesi oturma ile tanımlanmaktadır. Bu durumda hacimsel sıkışma sayısı zemin tabakaları boyunca sabit kabul edilmektedir.

Deney başlangıç su muhtevaları oldukça yüksek olan, yeniden hazırlanan killi zeminlerin oturma davranışları Hong ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmada araştırılmıştır. Sözü edilen çalışmada üç ayrı killi numune kullanılarak, Burland (1990) tarafından önerilen (ICL) yeniden hazırlanan numunelerin oturma doğrusu çalışmasını desteklemektedir. Örselenmemiş numuneler 300 mm çapında, 300 mm yüksekliğinde özel tüpler kullanılarak alınmıştır. Numunelerin likit limitleri Casagrande yöntemi ile belirlenmiştir. Baimahu kilinin doğal su muhtevası, likit limit değerinin yaklaşık 3 katı dolaylarındadır. Numunelerin üçü de plastisite kartında A doğrusunun az miktar üzerinde bulunmaktadır. Deneylerde standart ödometre deney aleti 0,5 kPa gibi küçük basınç değerlerinin kullanımına izin verecek biçimde iyileştirilerek kullanılmıştır. Ayrıca numunelerin başlangıç su muhtevaları yüksek olduğundan, ring ile üst poroz taş arasından numune kaybı önlenmeye çalışılmıştır. Gerilme artım oranının etkisi bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Kullanılan numune çapı, 61,8 mm numune yüksekliği 20 mm ve her yük artımının bulunma süresi 24 saattir. Numunelerin başlangıç su muhtevaları, likit limit değerlerinin 0,7~2,0 katı aralığında olacak biçimde ayarlanmıştır. Toplam 42 deney çalışmada yapılmıştır. Numunelerin başlangıç su muhtevaları istenen değerden az olduğunda damıtık su ilavesi ile istenen su muhtevalarına getirilmişlerdir. Ters olarak başlangıç su muhtevası, istenen değerden büyük olduğunda, numuneler havada istenen değerden daha küçük bir değere kadar kurutularak su ilavesi ile belirlenen değerlerine getirilmişlerdir. Deney sonuçları boşluk oranı ve düşey efektif gerilmenin logaritması eksenlerinde gösterilmiştir. Ön konsolidasyon basıncının Casagrande yöntemi ile belirlenmesinin güç olduğu eğrilerde, her iki eksenin logaritması alınarak, oturma eğrileri iki doğru biçiminde gösterilmiştir. Butterfield (1979), Onitsuka ve diğ. (1995) yayınlarında iki doğrunun kesim noktasındaki düşey efektif gerilme değerini, konsolidasyon akma gerilmesi olarak tanımlamaktadırlar. İlgili yazarlar ön konsolidasyon basıncı teriminin arazideki zeminler için kullanımının daha uygun olduğunu açıklamaktadırlar. Laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerde akma gerilmesinin kullanımını önermektedirler. Çalışmadaki deney sonuçları her iki eksen logaritmik olarak dikkate alınıp çizilmiştir. Ancak bu çalışmada yazarlar iki doğrunun kesim noktasındaki düşey efektif gerilme değerini emme basıncı olarak isimlendirmişlerdir. Verilen kil için başlangıç su muhtevası arttıkça emme basıncının azaldığı yapılan deney sonuçlarından görülmektedir. Çok geniş likit limit ve deney başlangıç su muhtevası

aralığında; emme basıncı, likit limit değerindeki boşluk oranı ile normalize edilmiş başlangıç boşluk oranı arasında oldukça iyi bağlantı bulunmuştur. Burland(1990) tarafından önerilen boşluk indisi kavramının; likit limit değerlerinin 0,7~2,0 katı aralığında başlangıç su muhtevasında yeniden hazırlanan killi zeminlerin oturma eğrilerinin korelasyonunda çok güçlü ve yeterli kavram olduğu, çalışma çerçevesinde yapılan deneysel sonuçlara bağlı kalınarak önerilmektedir. Düşey efektif gerilme emme basıncından büyük olduğunda korelasyon iyi olmasına karşın, emme basıncından küçük basınçlarda aynı durum geçerli değildir. Emme basıncından küçük düşey efektif gerilmeler için genişletilmiş oturma doğrusu denklemi geliştirilmiştir (EICL).

Yeniden konsolide edilerek hazırlanan killi zeminlerin oturma ve mukavemet özellikleri, doğal killi zeminlerin yerindeki ilgili özelliklerinin anlaşılması konusunda temel referans olarak kullanılmaktadır. Doğal killi zeminlerin kayma mukavemeti ve oturması ile ilgili Burland (1990) tarafından yapılan çalışmada, laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan killi zeminlerin özellikleri, arazideki doğal durumdan bağımsız olmaları, ancak konu edilen zemine özgü olmalarından dolayı küçük yıldız üst simgesi ile tanımlanabilirler. Zemin daneleri arasındaki bağ kuvvetleri ve zemin dokusunun etkisi nedeni ile doğal killi zeminlerin mekanik davranışları, laboratuarda yeniden hazırlanan zeminlerin davranışlarından farklıdır. Yeniden konsolide edilerek hazırlanan killi zemin; likit limit veya likit limit değerinden daha büyük su muhtevasında karıştırılarak, bir boyutlu olarak konsolide edilen killi zemin olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada likit limitteki boşluk oranı değerinin, likit limit değerinden daha gerçekçi parametre olduğu kabul edilmiştir. Boşluk indisi olarak tanımlanan parametre, değişik killi zeminlerin oturma özelliklerinin korelasyonuna olanak sağlamaktadır. Plastisite indisine bağlı oluşturulan korelasyonlar da araştırılmış, plastisite indisinin yüksek değerleri için iyi uyum bulunmasına karşın, plastisite indisinin daha küçük değerlerinde korelasyonların iyi olmadığı görülmüştür. Likit limit ve plastik limit değerlerinin belirlenmesinde yapılabilecek küçük hatalar, biri diğerinden çıkarıldığında daha önemli duruma gelmektedir. Birçok bölgede değişik araştırmalarda yapılan deney sonuçları değerlendirildiğinde, normal konsolide killi zeminlerin büyük çoğunluğunun oturma eğrileri, laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminlerin oturma eğrilerinin oldukça sağ tarafında bulunmaktadır. Bu gözlemden; doğal killi zemin tarafından taşınan düşey

efektif gerilme değeri, yeniden hazırlanan ilgili zeminin taşıdığı düşey efektif gerilme değerinden yaklaşık beş kat daha büyüktür. Bu sonuçsa, pek çok doğal killi zeminde, zemin yapısının gösterdiği direncin ölçümüdür. İlgili zeminin doğal oturma eğrisi eğiminin, aynı zeminin yeniden konsolide edilerek hazırlanan oturma eğrisi eğiminden önemli ölçüde dik olduğu konu edilen çalışmada görülmüştür. Aşırı konsolide killi zeminlerde, laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminin kabarma indisinin, doğal oturma eğrisindeki kabarma indisine oranı; doğal zeminde daneler arası bağ kuvvetleri hakkında önemli bilgi sağlamaktadır. Çalışmada yapılan drenajsız üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre normal konsolide killi zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti, boşluk oranı veya boşluk indisinden çok killi zeminin yapısına ve yerindeki düşey efektif gerilmelere bağlıdır. İki aşırı konsolide örselenmemiş düşük plastisiteli Todi kili ile yüksek plastisiteli Londra kili kullanılarak yapılan üç eksenli deneylerden küçük ve orta düzeydeki gerilme seviyelerinde gevrek davranış görülmüştür. Deneylerde fisür bulunmayan numunelerin yanı sıra fisür bulunan numunelerde kullanılmıştır. Kayma yüzeylerinde mukavemet değeri birkaç milimetre yer değiştirmeden sonra önemli ölçüde azalarak sabit değere ulaşmaktadır. Bu değerde yazar tarafından göçme sonrası mukavemet değeri olarak isimlendirilmiştir. Todi ve Londra killeri göçme sonrası kırılma zarfı ile yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminin kritik kırılma zarfları, küçük gerilme seviyelerinde birbirlerine daha yakın olarak bulunmuştur. Yüksek gerilme değerlerinde göçme sonrası mukavemetler, kritik mukavemetlerden daha küçüktür. Sert killi zeminlerde göçme sonrası mukavemet değerinin, stabilite problemlerinde uygun değer olabileceği yazar tarafından önerilmektedir. Ayrıca Henkel (1972) yayınında yatay ve düşey numunelerin kullanıldığı, drenajlı ve drenajsız üç eksenli deney sonuçlarından, yatay rijitlik değerinin düşey rijitlik değerinden önemli ölçüde büyük olduğu bulunmuştur.

SCK-CEN Belçika Kurumu tarafından Mol şehri dolaylarında Boom kilinde 223 m derinlikte, yer altı araştırma laboratuvarı inşası amacı ile kazı yapılmıştır. Yer altı araştırma laboratuvarının (URL) inşa nedeni, nükleer atıkların incelenmesidir. Doğal Boom kilinin mekanik özelliklerinin, başlangıç durumunda ve daha sonra oluşan anizotropinin, sözü edilen kilin bünye denklemlerine etkisinin araştırılması amacı ile Sultan ve diğ. (2010) tarafından iki seri üç eksenli deneyler yapılmıştır. Pek çok deneysel çalışma ince daneli zeminlerde anizotropinin var olduğunu ve bu

anizotropinin, zeminlerin oluşumu ve konsolidasyonu esnasında oluşan plastik deformasyonlarla bağlantılı olarak, K_0 gerilme koşulları ile ilgili olduğunu göstermektedir. Doğal zeminlerde başlangıçta ve daha sonra oluşan anizotropi, p' : q düzleminde çizilen akma eğrilerinin şekline dayalı olarak (Mitchell ve Wong, 1973; Tavenas ve Leroueil, 1979; Graham ve diğ.1983; Leroueil ve Vaughan, 1990; Wheeler ve diğ. 2003) ilgili çalışmalarda araştırılmıştır. Bu çalışmada başlangıç ve daha sonra oluşan anizotropinin Boom kilinin akma ve plastik davranışına etkisinin yanı sıra, ilgili kilin mekanik özelliklerine deneysel veri temini amaçlanmıştır. Kazı esnasında alınan blok numuneler ile yüksek basınçlarda deney yapımına uygun üç eksenli hücresi kullanılarak çok sayıda drenajlı ve drenajsız kesme deneyleri yapılmıştır. Yarı logaritmik çizimden ön konsolidasyon basıncı 0,37 MPa, aritmetik eksenlerdeki çizimden 0,38 MPa olarak belirlenirken, arazide düşey gerilmelerden 2,4 MPa olarak belirlenmiştir. Sözü edilen durumun, laboratuarda numunelerin 0,07 MPa izotropik gerilme etkisinde doymun duruma getirilirken, hafızasını yitirmesinden kaynaklandığı kabul edilmektedir. İlk seri deney grubu 0,37 MPa'dan küçük çevre basınçlarında izotropik olarak konsolide edilip drenajlı olarak kesilmiştir. İkinci grup doymun duruma getirildikten sonra 9 MPa izotropik olarak konsolide edilip, 0,9, 1, 3, 5, 7,1 MPa basınç değerlerinde drenajlı olarak kesilmiştir. Deneysel sonuçlardan, akma özellikleri ve gerilme geçmişi arasında tanımlanan bağlantının iyi olduğu bulunmuştur. Başlangıçta akma eğrisi K_0 doğrusu boyunca düzenlenmiştir. Bu sonuçta az bir miktar kabarmanın yapısal anizotropiyi önemli ölçüde etkilemediği anlamındadır. 9 MPa basınç seviyesinde izotropik olarak konsolide edilen numunelerde, p' - q eksenlerinde çizimde akma eğrisinde dönmenin olduğu görülmüştür. Çalışmada geliştirilen model sekiz parametre ile tanımlanmaktadır. Akma eğrisinin tanımında kullanılan formül, sertleşme esnasında oluşan şekil değişimini dikkate almaktadır.

Zeminler geçen zaman ile yaşlanıp değişmektedir. Geoteknik mühendisliği açısından geçen zaman ile zeminlerin özellikleri hem iyi yönde hem de kötü yönde değişim göstermektedir. Her iki yönden değişim Mitchell (1986) çalışmasında bulunabilir. Schmertmann (1991) çalışmasında yalnızca iyi yönlerdeki değişimi dikkate almıştır. İlk olarak çalışmada geçen zamanın ön konsolidasyon basıncına etkisi araştırılmıştır. Bunun için laboratuarda hazırlanan kil numune 46 gün oturmaya bırakıldıktan sonra 100 gün ikinci oturmaya bırakılmıştır. Çalışmanın sonunda ön konsolidasyon

basıncının yaşlanma ile yaklaşık 40% dolaylarında arttığı bulunmuştur. Konu ile ilgili olarak Eide ve Holmberk (1972) tarafından yapılan diğer bir çalışmada arazi değerleri normal konsolide zemin tanımını göstermesine rağmen, üç eksenli ve ödometre deney sonuçları 1,5-2 dolaylarında aşırı konsolidasyon oranı vermektedir. Yazarlara göre sözü edilen sonucun yaşlanmadan kaynaklandığı kabul edilmektedir.

Killi zeminlerle yapılan dolgularda da bir boyutlu oturma modülünün yaşlanma ile arttığı görülmüştür. Yazarın ilgilendiği bir dolguda 1500 gün sonunda modülün 100% arttığı görülmüştür. Hardin ve Richart (1963), Stoke ve Richart (1973), Anderson ve Woods (1976) çalışmalarında küçük deformasyonlarda hesaplanan dinamik kayma modülü nünde geçen zaman ile arttığını bulmuşlardır. Daramola (1980) ya göre drenajsız sekant modülünde de artım söz konusudur. Bu artım killi zeminlerde olduğu kadar suya doymuş kumlu zeminlerde de görülmektedir.

Seed (1979) tarafından hem laboratuarda hem de arazide yapılan çalışmalara dayalı olarak, dinamik gerilmeye karşı sınılaşma değerleri de geçen zaman ile artım göstermektedir.

Kazıklı temellerin gerilme taşıma kapasite sininde geçen zaman ile arttığı yapılan çalışmalardan bilinmektedir. Tavenas ve Audy (1972) 45 kazık ile yaptıkları çalışmada kazıkların statik yük taşıma kapasitesinin iki, üç hafta süre içerisinde ortalama 70% dolaylarında arttığını bulmuşlardır. Yazarlara göre sözü edilen artım, kazık etrafında bulunan kumlu zeminin yapısındaki değişim sebebi ile oluşmaktadır.

Çalışmada aynı zamanda geçen zaman süresince bir boyutlu modül ve drenajsız mukavemet değerlerinde görülen artımların, daneler arasındaki sürtünme kuvvetlerinden mi, kohezyondan mı yoksa her iki bileşenden mi kaynaklandığı da araştırılmıştır. Bu çalışma için özel üç eksenli deney aleti Florida Üniversitesin de yapılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçlarına dayalı olarak mukavemet değerinde görülen artımın kohezyon değerinden kaynaklanmayıp mukavemetin sürtünme bileşeninden kaynaklandığı bulunmuştur. Arazideki efektif gerilmeler zemin yapısı içerisinde danelerin yer değiştirmesine, bu durumda daneler arası kuvvetlerin artmasına, bu sonuçta zemin tabakası içerisinde gerilme kemerlenmesine sebep olmaktadır.

Japonya'nın değişik bölgelerinden temin edilen 12 farklı numune ile çok sayıda üç eksenli basınç, üç eksenli çekme ve ödometre deneyleri Nakase ve diğ. (1988)

tarafından yapılmıştır. Deneyler Kawasaki kil karışımları ve doğal deniz tabanı kil zeminleri olarak iki seri biçiminde yapılmıştır. Deneylerde kullanılan zeminlerin plastisite indisleri (PI) 10%-55% şeklinde çok geniş aralıkta bulunmaktadır. Her iki deney serisinde de zeminler yüksek su muhtevalarında zemin mikseri ile iyice karıştırılıp, havası alınarak hazırlanmışlardır. Böylelikle numuneler, yeniden konsolide edilerek hazırlanan, genç ve suya doygün olarak kabul edilebilmektedir. Her numune kullanılarak, ödometre deneyinin yanı sıra, izotropik konsolide konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç, izotropik konsolide konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli çekme, K_0 da konsolide bir boyutlu drenajsız basınç ve K_0 da konsolide drenajsız çekme deneyleri yapılmıştır. Deneylerden belirlenen sonuçlardan biri, plastisite indisinin azalması ile kırılmanın olduğu eksenel deformasyon değerinin azalmasıdır. Deneysel çalışmanın amacı bünye denklemlerinde kullanılan zemin parametrelerinin, plastisite indisi yardımı ile belirlenip belirlenemeyeceğidir. Bu amaca bağlı kalınarak çok sayıda korelasyonun varlığı da ayrıca çalışmada araştırılmıştır. Plastisite indisi ile sıkışma indisi arasında korelasyon katsayısı yüksek lineer bağıntı bulunmuştur. Kritik zemin mekaniği teorisi belirlenmeye çalışılarak, kabarma indisi ile plastisite indisi arasında da lineer bağıntının var olduğu gözlenmiştir. Kritik durum parametresi (M), $p' : q$ düzleminde kritik durum doğrusunun eğimi olarak tanımlanmaktadır. M_c değerinin Japonya'nın killi zeminlerinde, plastisite indisi $PI < 50$ halinde değişmeyip yaklaşık 1,65 olarak sabit olduğu bulunmuştur. M_c değerinin ise plastisite indisinin artması ile azaldığı görülmüştür. Bu deneysel sonuçlara rağmen yazarlara göre, M_c ve PI arasındaki bağıntının gerçeği tam olarak yansıtmadığı düşünülerek ilgili değerlerin, deney yapılarak bulunması önerilmektedir.

Blok numuneler ile örselenmenin en az olduğu Osterberg (1952) ve Tornaghi ve Cestari (1977) yöntemleri kullanılarak, İtalyanın Montalto di Castro bölgesinden aynı yükseklikten alınan numuneler kullanılarak çok sayıda ödometre deneyi Holtz ve diğ. (1986) yayınında yapılmıştır. Çalışmada standart gerilme artımının kullanıldığı (IL), sabit deformasyonun uygulandığı (CRS), hidrolik eğimin kontrol edildiği (CHG) olmak üzere üç tip ödometre deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarından ön konsolidasyon basıncı Casagrande (1936) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Piston numunelerden belirlenen ön konsolidasyon basıncının, blok numunelerden belirlenen değerinden az bir miktar daha küçük olduğu deneysel çalışmada

görülmüştür. Oturma eğrilerinde eğimin çok farklı olması, piston numunelerinde örselenmenin fazla olmasına bağlanmaktadır.

En iyi ön konsolidasyon basıncının belirlenebilmesinde, arazide hesaplanan efektif düşey gerilme değerine kadar laboratuvar oturma eğrisindeki düşey deformasyonun kullanımı önerilmektedir. Numune alma yönteminin ön konsolidasyon basıncına etkisinin yanı sıra, ödometre deney tipinin de etkisinin olduğu bilinmektedir. Sabit deformasyonun uygulandığı (CRS) deneylerden en büyük ön konsolidasyon basıncı belirlenirken bu değeri hidrolik eğimin kontrol edildiği (CHG) deneyler ile standart gerilme artımının uygulandığı deneyler (IL) izlemektedir. Zeminlerin oturma özelliklerinin yanı sıra mukavemet özellikleri de numunedeki örselenmelerden etkilenmektedir. Özellikle 0.1%'den küçük deformasyonlarda, gerilme-deformasyon özellikleri istendiğinde blok numunelerin kullanılması gerektiği Hight ve diğ. (1985) tarafından önerilmektedir.

Deneyin herhangi bir aşamasında K_0 değerinin belirlenmesine olanak sağlayan, yanal toplam gerilmenin ölçüldüğü ödometre deneyleri de yapılmıştır. Ortam ısısının ve sünmenin K_0 değerine etkileri dolayısıyla deneyler ısısının kontrol edildiği laboratuvarlarda, deney sisteminin su dolu kapta bulunduğu ortamda yapılmıştır. Yanal toplam basınç miktarı ölçülürken sistemin ısısı da ölçülmüştür. Gerilme artımının zemin yapısını değiştirdiği bilinmektedir. Zemin yapısındaki değişimin ödometre deney sonuçlarına etkisinin araştırıldığı, birden fazla gerilme çevriminin uygulandığı ve gerilmelerin uzun süre sabit bırakıldığı deneyde K_0 değerleri hesaplanmıştır. Zamana karşın K_0 değerlerine bakıldığında 35gün K_0 değerinde önemli bir değişim olmadığı ve sabit kaldığı bulunmuştur. Isıdaki küçük değişimlerin K_0 değerini değiştirmedeği görülmüştür.

Zemin yapısındaki değişim, konsolidasyon esnasında düşey deformasyonda artıma, modülde azalmaya, kırılma esnasında asal gerilmelerde farka ve kırılma zarfının şeklinde değişime neden olmaktadır. Böylece yapının önemli ölçüde değişime uğradığı, örselenmelerin fazla olduğu numunelerin deney sonuçları ile oturma hesabı yapıldığında, gerçek değerinden daha fazla oturma miktarı bulunacaktır.

Suya doygun ince daneli zeminlere oturan temel ve toprak dolgu yapıların stabilitesi, zeminin permeabilitesi ve drenaj yolu uzunluğu dolayısıyla zamana bağımlı işlem olarak tanımlanmaktadır. Suya doygun zemin durumunda, boşluklardaki suyun sıkışmadığı kabul edildiğinde, kayma gerilmelerindeki artım zemin yapısının

oturmasına neden olacaktır. Zemin tabakası içerisinde emniyet katsayısının en küçük olduğu durum yükler uygulandıktan hemen sonradır. Bu da bilindiği üzere kısa süreli stabilite problemidir. Boşluklardaki ilave su basıncı henüz sönümlenmemiştir. Boşluklardaki ilave basıncın sönümlenip dengeye ulaştığı durum drenajlı durum olarak tanımlanmaktadır. Şevlerde gecikmiş kayma problemi Griffiths ve Li (1993) tarafından sonlu eleman yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Gecikmiş kaymaya, zaman içerisinde zeminin kayma mukavemeti değerinin azalması neden olarak gösterilmektedir. Terzaghi (1936) zamanla zeminin kayma mukavemetinde oluşan azalmayı, kazı gibi nedenlerle yanal gerilmelerdeki azalma sonucu malzemenin yumuşamasına bağlamaktadır. Çalışma çerçevesinde oluşturulan algoritmanın geçerliliği ilk olarak pasif toprak basıncı ile rijit istinad duvarına uygulanmıştır. Daha sonra 2:1 eğimi ile su altı kazısına uygulanmaktadır. $K_0=0,5$ durumunda şev, topuk ve en yüksek noktadaki deformasyonlar nedeni ile 6 gün sonra göçmüştür. $K_0=1,5$ durumunda ise şev, taban kabarması ile 15 gün sonra göçmüştür. Bu sonuçlar, $K_0=1,5$ iken başlangıçtaki efektif gerilmeler drenajsız kayma mukavemetinin $K_0=0,5$ durumundan daha büyük olmasına neden olmaktadır. Başlangıçtaki gerilme durumunun drenajlı stabiliteye etkisinin olmadığı yapılan çözümlerin sonucuna dayalı olarak bulunmuştur. Hem drenajlı hem drenajsız koşullarda, K_0 değeri arttıkça kırılma halinde şev topuğundaki yer değiştirmelerde artmaktadır. Her iki çözümde de aynı elastisite modülü kullanılmıştır. Aşırı konsolide killerde bulunan fisürler, kırılma durumunda kayma mukavemeti oluşumunda deformasyon yumuşamasına neden olmaktadır. Skempton (1970) drenajlı çözümde, zamanla kohezyon değerinin azalması nedeni ile kayma mukavemeti değerinin azalacağı görüşü ile en büyük kayma mukavemeti değerinin çözümlerde kullanılmamasını önermektedir.

Hight ve diğ. (1992) yayınında Bothkennar kilinde laboratuvar deneyleri öncesi oluşan örselenmelerin deney sonuçlarına etkilerini araştıran detaylı çalışma yapılmıştır. Yumuşak killi zeminden numunenin alınması, numunenin laboratuara ulaşımı, laboratuarda saklanması, deneyler için hazırlanması aşamalarında, istenildiği kadar dikkat edilse de, en son teknoloji kullanılsa da örselenmeler oluşmaktadır. Bu örselenmelerin etkileri, ilgili çalışmada laboratuarda yapılan deney tipine bağımlı olarak, farklı yollarla açıkça gösterilmektedir. Çalışmada laboratuvar deneyleri öncesi oluşan örselenmelerin etkileri, konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyleri (UU_{TC}), arazide etkisinde kaldığı kabul edilen basınç değerinde konsolide

edilen numunelerle drenajsız üç eksenli basınç ve çekme deneyleri yapılarak (CK_0U_{TC} ve CK_0U_{TE}) ve ayrıca ödometre deneyleri yapılarak tanımlanmıştır.

Sherbrooke, Laval ve piston yöntemleri kullanılarak numuneler benzer derinliklerden alınmıştır. Sherbrooke ve Laval yöntemleri kullanılarak alınan numunelerin, standart blok yöntemi ile alınan numunelere eş değer kalitede numune alımına izin verdiği çalışma sonuçlarına bağlı olarak açıklanmaktadır. Sherbrooke numune alma yönteminde 250 mm çapında, 400 mm yüksekliğinde blok kesilerek zeminden alınmaktadır. Numune alma tüpünün zemine batırılması ile oluşan deformasyonlardan böylelikle kaçınılır. Ancak numunenin kesme ve sondaj çukurundan alınması esnasında sondaj çamuruna maruz kalması engellenememektedir. Laval yöntemi ile numune alımında 200 mm çapında 530 mm uzunluğunda tüp ile numune alınmaktadır. Numune tüpten alınarak arazide yalıtımı yapılmaktadır. Böylece tüpün sürekli kullanımı sağlanmış olur. Tüpte piston bulunmamaktadır. Çeper kalınlığı 2 mm, numune çapı 100 mm olan standart piston yöntemi ile alınan numunelerde ayrıca deneylerin yapımında kullanılmıştır.

Deneyler için numune hazırlanması aşamasında, tel testere kullanılarak numunelerin istenen boyutlara 100 mm çap, 200 mm yüksekliğe, getirilmesi ve ring batırılarak numune hazırlanması olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. Deneyler hem numunelerin alındığı bölgede bulunan arazi laboratuvarında hem de 30 mil uzaklıkta bulunan üniversite laboratuvarında yapılmıştır. 38 mm çap ve 76 mm yükseklik olmak üzere iki tip numune boyutu kullanılmıştır. Laval ve Sherbrooke yöntemleri ile alınan numunelerin piston numunelerinden çok daha fazla kaliteli oldukları deneysel çalışma sonuçlarından bulunmuştur. Piston yöntemi kullanılarak Bothkennar kilinden örselenmemiş numune alımının mümkün olmadığı açıkça gösterilmiştir. Bothkennar kili arazide etkisinde kaldığı kabul edilen gerilme seviyesinde yeniden konsolide edildikten sonra drenajsız olarak kesildiğinde, ilgili kilin küçük deformasyon rijitliği; drenajsız kesme hızına, yeniden konsolidasyon gerilme izine, zemin yapısına, sünme oranına ve yeniden yapılanma miktarına bağlıdır. Tel testere ile hazırlanan numunelerde oluşan örselenme miktarı, tüp batırılması yöntemine oranla daha azdır. Sherbrooke yöntemi, Laval yöntemine oranla örselenmenin daha az olduğu numune alımına olanak sağlamaktadır. Piston yöntemi ile numune alımının zeminin akma özelliklerini güvenilir biçimde sağlamadığı kanıtlanmıştır. Laval yöntemi ile numune alımında oluşan örselenme miktarı, numune alma tüpünün zemine batırılması

esnasında oluşabilir. Tabakalı zeminlerde 10 m derinlikten sonra sondaj çukurunda olması muhtemel göçükler, ilave örselenme nedeni olabilmektedir. Örselenme ortalama efektif gerilme değerinde azalmaya, numune sınır yüzeyinde, artan örselenme miktarı ile artan hacim küçülmesine neden olmaktadır. Örselenmenin etkisi konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç (UU_{TC}) deneylerinde açıkça görülmektedir. Konsolide edilen deney sonuçlarında sınır yüzeye örselenmenin etkisi üç eksenli basınç deneylerinde çekme deneylerinden daha açık görülmektedir. Ödometre deneylerinde örselenme miktarı arttıkça akma öncesi oturma miktarı artmakta, görünen ön konsolidasyon basınç değerleri azalmaktadır. Arazide etkisinde kaldığı kabul edilen gerilme değerinde yeniden konsolidasyon numunede ilave, önemli yeniden yapılanmaya sebep olmamaktadır. Yeniden konsolidasyon gerilme izi küçük deformasyon rijitliğini, efektif gerilme izinin şeklini etkilemektedir. Konsolidasyon esnasında oluşan hacimsel deformasyonlar numune örselenmesine iyi bir göstergedir. Hacimsel deformasyonların miktarı, numune boyutuna, yeniden konsolidasyon izine, numunenin alındığı zeminin tabakalanma durumuna ve örselenmenin miktarına bağlıdır.

Ödometre deneylerinde gerilme artımının, gerilme azaltılmasının yeniden değerlendirilmesi konusunu kapsayan çalışma Butterfield ve Baligh (1996) tarafından yapılmıştır. Oturma hesaplarının büyük çoğunluğu zeminin hacimsel sıkışma sayısı dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu katsayı bilindiği üzere zemin sabiti değildir. Gerilmenin artımı, gerilmenin azaltılması çevrimlerinde değişmektedir. Düşey efektif gerilme ile hacimsel sıkışma sayısındaki değişim (m_v), sıkışma indisinin (C_c) kullanımı ile bir miktar dikkate alınabilir. Gerilme değeri azaltılıp tekrar artıma geçildiğinde, geçişler ani olmaktadır. Oturma grafiğinde eğri bölge bulunmaktadır. Oturma hesaplarında eğri bölgeden çok doğrunun kullanımının daha iyi olduğu (Butterfield, 1979) çalışmasında gösterilmiştir. Ödometre deney sonuçları her iki eksenin logaritması alınarak çizildiğinde oturma grafiğinin iki doğrudan oluştuğu görülmektedir (Nash ve diğ. 1993). Yazarlar hacimsel sıkışma sayısını yeniden tanımlayarak bu doğrunun (her iki eksen logaritmik) eğimi olduğunu söylemektedirler. Ödometre deneylerinden belirlenen hacimsel sıkışma sayısı m_v 'ye karşılık düşey efektif gerilme değerlerinin logaritması alınarak oturma grafiği çizildiğinde, oturma grafiğinin yatay eksen ile -45^0 açı yapan, birbirine paralel iki doğrudan oluştuğunu gözlemişlerdir. Çalışmada farklı killi zeminler Rowe

hücresinde konsolide edildikten sonra kullanılmıştır. Standart ödometre deney aletlerinde iki gerilme artımı, iki gerilme azaltılması olacak biçimde iki çevrim olarak deneyler yapılmıştır.

Son yıllarda kabarmaya eğilimli killi zeminler, nükleer atık depolarında yalıtım amaçlı kullanıldıklarından, bu zeminlerin davranışlarının belirlenmesine yeterli önem verilmektedir. Değişik su muhtevalarında, farklı kuru birim hacim ağırlık değerlerinde kompaksiyon yöntemi kullanılarak sıkıştırılan bentonit kilinin zaman içerisindeki davranışını kapsayan çalışma Delage ve diğ. (2006) tarafından yapılmıştır. Sıkıştırılan bentonit kili örnekleri ısının kontrol edildiği ortamda (20°C) 30 gün ve 90 gün olmak üzere yaşlanmaya bırakılırlar. Sözü edilen süre tamamlandığında ilgili örnekler kaplarından alınarak, dondurulma yöntemi kullanılarak kurutulmaktadır. Kurutulan numuneler cıva yerleşme yöntemi ve elektronik mikroskop yöntemi ile taramadan önce bir-kaç saatten pek çok güne ulaşan zaman sürelerinde bekletilirler. Çalışma kapsamında dört farklı kompaksiyon özelliği ile 12 numune kullanılmıştır. Yazarlara göre kompaksiyon işlemi bu çalışma için hazırlanmış özel hücrelerde yapıldığından kompaksiyon sonunda eksenel gerilmenin uzaklaştırılmasına karşın yanal yönde bir gerilme kalacaktır. Kuruma işlemi için numuneler kaplarından alındığında gerilme çevrimi oluşacaktır. Bentonit kilinin su tutma özelliği araştırıldığında, kabarma eğiliminin su muhtevasına bağımlı olduğu, su muhtevası 8,2% iken ilgili değer 80 MPa ve su muhtevası 12,5% iken emme basıncının 50 MPa'dan yüksek olduğu görülmüştür. Zeminin zaman ile mikro yapısında oluşan değişimlerin, boşluklarda bulunan suyun yeniden dağılımı ile oluştuğu kabul edilmektedir. Kompaksiyon tamamlandıktan sonra kesit yüksekliği boyunca emme basıncı tamamen dengelenmemiştir. Kil danelerinin geçen zaman süresinde parçalanması sonucu cıvanın yerleşemediği küçük boşluk miktarında artım görülmüştür. Kuru numunede kil parçacığını oluşturan danelerin sayısı az fakat kalın, su muhtevası daha fazla olan numunede ise daha çok sayıda daha ince daneler kil agregasını oluşturur. Bu sonuçta daneler arası boşlukların artımına neden olmaktadır. Sabit su muhtevasında geçen süre içerisinde boşluk boyutlarında görülen değişim, permeabilitenin azalmasına neden olmakta azalan permeabilitede nükleer atıklar için iyi bir sonuçtur.

Tabakalı zeminlerin bir boyutlu konsolidasyonu ile ilgili diğer bir çalışma Pyrah (1996) tarafından yapılmıştır. Terzaghi yönteminde homojen kil tabakası bir boyutlu

olarak düşey yönde gerilme artımına maruz kaldığında boşluk suyu basıncı, kil tabakası kalınlığına ve kil tabakasının konumuna, gerilmenin uygulanmasından sonra geçen zamana, zeminin konsolidasyon katsayısına c_v bağlıdır. Bilindiği üzere konsolidasyon katsayısı zeminin permeabilitesi ile sıkışabilirliğinin fonksiyonudur. Zemin tabakalı olsa bile çözümlerde bu katsayı sabit kabul edilmektedir. Sözü edilen bu kabul hatalı hesaplamalara sebep olabilmektedir. Çalışmada bu kabulün yetersizliğini göstermek amacı ile iki eşit yükseklikte farklı zemin kullanılarak dört zemin profili kullanılmıştır. A ve B zeminleri. B zemininin permeabilite katsayısı ve hacimsel sıkışma sayısı A zemininden on defa daha büyüktür. Zemin profillerinde zemin üst yüzeyi drenaja açık, taban ise drenaja kapalıdır. Oturma hesaplarında üç yöntem kullanılmıştır. Toplam oturma miktarı standart yöntemle göre A ve B zeminlerinin oluşturdukları profillerde A tabakası oturması ile B tabakası oturmasının toplamıdır. Ortalama konsolidasyon derecesi tabakaların sırasından bağımsızdır. İkinci çözüm yönteminde boşluk suyu basıncının derinlikle ve zamanla değişim eğrileri kullanılmaktadır. Herhangi bir kil tabakasında boşluk suyu basıncı, drenaja açık sınıra yakın bölgelerde uzak bölgelerden daha hızlı sönümlenecektir. Böylece konsolidasyonun başlangıcında yüzeyde oluşacak oturmalar, drenaja açık sınıra yakın zemin tabakasının oturma özellikleri ile kontrol edilecektir. Drenaja açık sınırdan uzakta bulunan zemin tabakasının oturması konsolidasyonun ileri aşamalarında önem kazanacaktır. Böylece efektif gerilme değerlerinde zaman ve derinlik ile meydana gelecek değişimi dikkate alan çözüm yöntemi hesaplarda kullanılmalıdır. Üçüncü yöntemde hacimsel sıkışma sayısı ve permeabilite katsayısı kullanılarak hesaplar yapılmaktadır. Tabaka yüzeylerinde süreklilik şartını sağlayan nümerik çözüm yöntemleri çözümlerde kullanılmaktadır.

Bir boyutlu konsolidasyon probleminde elastik, zamana bağımlı plastik davranışı model edebilen çalışma Yin ve Graham (1996) yayınında yapılmıştır. Killi zeminler bir boyutlu gerilme artımına maruz kaldıklarında boşluklarda bulunan su da ilave gerilme oluşacaktır. Geçen zaman ile boşluklarda bulunan suyun, gerilmenin fazla olduğu bölgeden gerilmenin az olduğu bölgeye akması ile zemin yapısı yeni denge konumuna ulaşmaktadır. İşlemin sonucunda zemin yüzeyinde düşey yönde oturmalar görülebilir. Standart çözüm yönteminde yapılan kabuller, zemin tamamen suya doygunudur. Zemin daneleri ve daneler arası boşluklarda bulunan su sıkışmaz. Oturma ve boşluklarda bulunan su akımı bir boyutlu ve düşey yöndedir.

Deformasyonlar küçüktür. Boşluklarda bulunan suyun hareketinde Darcy yasası geçerlidir. İlave boşluk suyu basıncının dağılması esnasında tüm zemin kesitinde permeabilite katsayısı sabit kabul edilmektedir. Sonuç olarak oluşan oturma miktarı ilgili zemin tabakasının gerilme değişimini deformasyona dönüştürme yeteneğine bağlıdır. İlave boşluk suyu basıncı sıfır olduğunda oturmalar artmayacaktır aynı kalacaktır. Ancak gerçekte durum böyle değildir. Konu edilen bu eksikliklerin giderilmesi amacı ile iki farklı çözüm yöntemi kullanılmaktadır. A ve B hipotezleridir. A hipotezinde ilave boşluk suyu basıncının efektif gerilmelere aktarılması ile ilgili birinci konsolidasyon oturması, sabit efektif gerilme etkisi ile zaman içerisinde oluşan deformasyonlardan ayrı olarak dikkate alınmaktadır. Birinci konsolidasyon oturmasında Terzaghi teorisi kullanılmaktadır. Keyfi olarak ayrılan sünme deformasyonlarının hesaplanmasında farklı konsolidasyon katsayısı $C_{\alpha e}$ kullanılmaktadır. Bu hipotezde boşluk oranı ile efektif gerilme arasında bulunan bağıntıda oturmanın oluşacağı zemin tabakasının kalınlığı dikkate alınmaz. B hipotezinde konsolidasyon işleminin tüm aşamalarında sünme deformasyonları oluşmaktadır. Bu da sürekli ortam mekaniğinde zamana bağlı oluşan plastik deformasyonları dikkate alabilen bünye denklemlerinin oluşturulmasını gerektirmektedir. Çalışma çerçevesinde elastik vizko-plastik bünye denklemi oluşturulmuştur. Modelde eşdeğer zaman terimi kullanılarak hem normal konsolide hem de aşırı konsolide zeminlerde olabilecek sünme deformasyonları dikkate alınmaktadır. Oluşturulan model ile oturma miktarları Terzaghi teorisinden daha büyük hesaplanmaktadır. Gerilme miktarının artması ile oluşan ilave boşluk suyu basınçları çok iyi model edilebilmektedir. Zemin tabakasının kalınlığını da dikkate alabilen model ile farklı kalınlıktaki kil tabakalarında deformasyonların tabakanın kalınlığının artması ile arttığı bulunmuştur.

Yol mühendisliğinde zemin mekaniği kurallarının kullanımı ile ilgili çalışma Brown (1996) tarafından yapılmıştır. Yol ya da dolgu yapımında zemin mekaniği problemi, zeminlerin ve yol dolgularında bulunan kaba daneli malzemenin tekrarlı gerilmeye nasıl direnç gösterdiğinin anlaşılmasıdır. Kırılma sistemini anlayarak, uygun teorik çözümler ile bu bilginin dolgu düzenlenmesinde kullanımıdır. Yol veya dolgu yapımı ile ilgilenen mühendise, teorik çözüm yöntemleri, laboratuvar deneyleri, arazi deneyleri, uygun deney aletlerinin kullanıldığı tam ölçekteki deney alanları gibi pek çok değişik araçlar eşlik etmektedir. Dolgunun maruz kalacağı gerilme koşullarında

dolguyu oluşturan tabakaların geçici ve kalıcı deformasyon özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Demir yolu, gerilmenin zemine aktarılması açısından otoyol ve havaalanı dolgularından farklıdır. Ancak zemin mekaniği kuralları aynı biçimde uygulanmaktadır. Drenaj için geosentetiklerin kullanımının yanı sıra, filtre malzemeleri ile donatılı zemin malzemelerinin de bilinmesi önemlidir. Herhangi bir kaplama malzemesi ile yalıtılmış dolgu tabakasında yer altı su seviyesi de kaplama yüzeyinden derinlerde olduğunda, bu ortamda da zemin için tamamen kurudur kabulü yapılamaz. Dolayısıyla hem suya doygun hem de kısmen suya doygun koşullar geçerli olmaktadır. Dolgu tamamlandığında dolguyu oluşturan tabakalar, kayma mukavemetlerinden çok daha küçük gerilme değerlerine maruzdurlar(Brunton ve Akroyde, 1990). Tamamlanmış dolguya hareketli tekerlek yükü uygulandığında davranış zorunlu olarak elastik olacaktır. Tekrarlı gerilme durumunda plastik ve viskoz deformasyonlarda oluşacaktır. Bu durum elasto-plastik çözüm yerine iki aşamalı teorik çözümü getirecektir. Elastisite teorisinin kullanıldığı çözümlerde davranış lineer elastik, tekerlek yükü ise dairesel alana üniform dağılmış gerilme olarak dikkate alınmaktadır. Gerçekte gerilme hareket halindedir. Dolguyu oluşturan tabakaların davranışı, lineer elastik değildir ve pek çok değişkenden etkilenmektedir. Dolgu kaplaması bitümlü malzemeden yapıldığında, bu malzeme yükleme oranı ve ısı koşullarından etkilenecektir. Hveem dolguyu oluşturan malzemelerin elastik özellikleri ve bitümlü malzemedeki yorulma çatlakları ile ilgilenmiştir (Hveem, 1955). Seed ve ekip arkadaşları, sıkıştırılarak hazırlanan numunelerde tekrarlı üç eksenli deneyler yaparak tekrarlı deviatör gerilmenin elastik deformasyona bölünmesi ile hesaplanan elastik modül değerini yaptıkları çalışmalarında tanımlamışlardır. Yazara göre lineer elastik çözümler dolgularda kaplama yeterli kalınlıkta ise güvenle kullanılabilirler. Kaplamanın olmadığı veya kaplama kalınlığının az olduğu dolgularda lineer olmayan çözüm yöntemleri kullanılmalıdır. Lineer elastik çözümlerde yanal yönde oluşan gerilme değişimleri dikkate alınmamaktadır. Lineer olmayan davranışın kullanıldığı sonlu eleman çözümlerinde yanal yönde oluşan gerilmelerde dikkate alınmaktadır. 8 düğüm noktalı dikdörtgen elemanların kullanıldığı sonlu eleman ağında giriş verileri malzemelerin birim ağırlıkları, yer altı su seviyesinin yeri, tahmin edilen emme değerleri ve K_0 değerleridir. K_0 değerleri dolgu yapımında kompaksiyon esnasında oluşan yanal gerilmelerin hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Sonlu eleman çözüm yöntemi kullanılmasının diğer bir nedeni kaba daneli tabaka tabanında oluşan çekme

gerilmelerinin hesaplanabilmesidir. Daneler arası bağ kuvvetlerinin olmadığı bu malzemede çekme mukavemeti ihmal edilebilecek düzeydedir. Arazide transdüserlerin kullanımı ile bir tekerleğin uyguladığı gerilmeye gösterilecek direnç ve gerilme durumundaki değişimler, tekrarlı gerilme durumunda oluşacak deformasyon ve yer değiştirmeler ölçülebilmektedir. Bu üç parametreye ilave olarak ortamdaki ısı ve boşluk suyu basınçları da ölçülmektedir. Kaplama tabakasında ve dolguda gerilmelerin bilinmesi toplam gerilmelerin ve boşluk suyu basınçlarının bilinmesine bağlıdır. Boşluk suyu basınçları doğru ölçülemediği takdirde efektif gerilmelerde güvenilirmezdir. Hareketli tekerlek yükünün dolguya uygulanması esnasında, asal gerilmelerin etkidiği asal düzlemlerde dönme görülmektedir. Yazara göre kaplama tabakasının hemen altında yatay gerilmeler çekme durumundadır. Diğer bölgelerde ise basınç durumundadır. Bu durum laboratuarda en iyi biçimde, orta bölümü boş olan silindirik üç eksenli deney aleti ile temsil edilebilir. Aletin kullanımı ile hem normal gerilmeler hem de kayma gerilmeleri kontrol edilebilmektedir. Benzer gerilme durumu dinamik basit kesme deney aleti ile de oluşturulabilmektedir. Ancak tekrarlı yüklemede numuneye üniform gerilme uygulanması ve numunede oluşacak deformasyonların ölçümünde zorluklar ile karşılaşmaktadır.

Tekrarlı gerilmeye maruz dolgularda hem elastik hem de elastik olmayan deformasyonlar bulunmaktadır. Geriye dönebilen deformasyonlar için nümerik çözümlerde geçici elastik modül değeri kullanılmaktadır. Kaplamalarda görülen ezilmeleri en aza indirebilmek için geriye dönmeyen deformasyonlar ile ilgilenilmelidir. Dolgu durumunda efektif gerilme durumunun daha iyi anlaşılması için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Kısmen suya doygun zeminlerin davranışının anlaşılması da önemlidir.

Clayton ve diğ. (1992) tarafından aşırı konsolidasyon oranı küçük Bothkennar kilinden Laval ve Sherbrooke yöntemleri kullanılarak alınan numunelerle üç eksenli deformasyon izi deneyleri yapılmıştır. Numuneler belirli bölgelerde oluşan deformasyonları, radyal deformasyonları ve orta düzlemde boşluk suyu basınçlarının ölçümüne izin verecek biçimde deney aletine kurulmuştur. Arazideki boşluk suyunun kimyasal özelliklerinde boşluk suyu verilmiştir. Deneyler numune alınması ve yeniden konsolidasyon işlemlerinin neden olduğu mukavemet ve rijitlikteki azalmaları belirlemek amacı ile değişik büyüklüklerde kayma ve hacimsel

deformasyonlar uygulanarak yapılmıştır. Tüp yöntemi ile numune alımında çok dikkat edilse dahi ortalama efektif gerilme değerinde önemli azalma olduğuna inanılmaktadır. Çeşitli derinlik ve dört yüzeyden alınan numuneler ile üç grup deney yapılmıştır. Arazide etkisinde kaldığı kabul edilen gerilme değerinde izotropik olarak konsolide edilip daha sonra drenajlı deviatör gerilme izi uygulanıp üç eksenli basınç durumunda drenajsız kesilenler (CK_oUC). İkinci grup deneyler K_o değeri yaklaşık 0,5 de sabit gerilme oranında arazide etkisinde kaldığı kabul edilen efektif gerilme değerinin iki katında konsolide edilerek üç eksenli basınçta drenajsız olarak kesilenler (K_oRUC). Üçüncü gruptakiler ise idealize edilmiş tüp numune deformasyon izi deneyleridir. Numune ilk olarak arazideki efektif gerilme değerinde konsolide edilmektedir. Daha sonra önceden tanımlanmış maksimum deformasyon seviyesine kadar üç eksenli basınçta kesilmektedir. Takiben aynı deformasyon büyüklüğünde üç eksenli çekme koşullarında kesme işlemi yapılmaktadır. Deney esnasında eksenel gerilme, eksenel deformasyon sıfır değerini alana kadar arttırılmaktadır. 10 cm çapında numunelerin kullanıldığı deneylerden rijitliğin numunenin alındığı yüzeye de bağlı olduğu görülmüştür. Bölgesel farklılıkların bulunduğu yüzeylerden alınan numunelerde tabakalı yüzeylerden alınan numunelerden daha küçük değerler elde edilmiştir. Ön konsolidasyon basıncından büyük gerilmelerde konsolidasyon, akma yüzeyini drenajsız kayma deformasyonlarından daha fazla değiştirmektedir. Sözü edilen değişim küçülme eğilimindedir. Ön konsolidasyon basıncından daha büyük basınç değerlerinde, konsolidasyon esnasında zemin yapısında sürekli yeniden yapılanma oluşmaktadır. Bu durum ödometre deneyi ve sabit deformasyon oranı deneylerinde görülememektedir. Boşluk suyu basınçlarının ölçüldüğü deneylerde akma gerilmesinde, radyal yönde şekil değiştirmesi engellenen numunelerde, daneler arası bağ kuvvetlerinin kopmasının sonucu oturmalar daha büyük oluşmakta ve boşluk suyu basınçlarının artmasının sonucu olarak düşey efektif gerilmelerde önemli azalmalar görülmektedir. Üç eksenli deneylerde numune yanal yönde şekil değiştirebildiğinden böyle bir durum görülmemektedir. Zemin yapısında açıklanan bu göçmelerin, akma yüzeyinin küçülmesi ile ilgili olduğu çalışmada düşünülmektedir. Yapıdaki sürekli değişimin, daneler arası bağ kuvvetlerinin detaylı incelenmesi ile açıklanabileceğine inanılarak bu konuda yapılan çalışmalar araştırılmıştır. Ön konsolidasyon basıncında göçme, en büyük boşluklardan başlayarak en küçük boşluklara doğru devam etmektedir.

Normal konsolide ve aşırı konsolidasyon oranı küçük olan kohezyonlu zeminlerde örselenme olmadan numune alınması zordur. Dolayısıyla örselenmeden dolayı, bu tip zeminlerde rijitlik ve drenajsız mukavemette ciddi azalmalar oluşacaktır. Basit tüp yöntemi ile numune alımında numune merkezi boyunca uygulanan basınç ve çekme deformasyonları eşittir (Clayton ve diğ. 1992). Bu deformasyonlar numune çapının tüpün çeper kalınlığına oranına bağlıdır.

Bothkennar kili kullanılarak yukarıda tanımlanan deney sonuçlarından drenajsız kayma deformasyonlarının mevcut akma yüzeyinin küçülmesine hacimsel deformasyonların ise normalize edilmiş akma yüzeyinin küçülmesine neden olduğu bulunmuştur. İdealize edilmiş tüp numune deformasyon izleri drenajsız üç eksenli çekme ve basınç deneylerinde uygulanarak ortalama efektif gerilme değerinde azalmalara sebep olduğu bulunmuştur. Ortalama efektif gerilme değerinde görülen azalmaların, uygulanan deformasyon genliğinin artması ile arttığı görülmüştür. Sabit gerilme oranında akma gerilmesinden sonra arazideki efektif gerilme değerinin yaklaşık iki katı gerilme değerinde konsolidasyon ise, 6-9% hacimsel deformasyonlara neden olmaktadır. Tabakalı yüzeylerden alınan numunelerde arazideki gerilme değerine kadar konsolidasyon esnasında ortalama efektif gerilme değerlerinde önemli azalmalar ve daha büyük hacimsel deformasyonlar görülmektedir. Zeminde bölgesel farklılıkların bulunduğu yüzeylerden alınan numune sonuçları ile karşılaştırıldığında. Bu durumun gerilmenin azaltılması esnasında Sherbrooke numunelerinde sondaj sıvısının siltli bölgelere sızmasından kaynaklanabileceğine inanılmaktadır.

Bothkennar kilinin bir boyutlu konsolidasyon özellikleri Laval yöntemi ile alınan örselenmemiş numuneler ile yeniden hazırlanan numuneler kullanılarak yeterli sayılarda deneyler yapılarak Nash ve diğ. (1992) tarafından araştırılmıştır. Çalışmanın amacı deformasyon oranının etkilerinin araştırılması, seçilen numunelerde düşey permeabilitenin ölçülmesi ve bir seviyede zeminin değişim etkilerinin değerlendirilmesidir. Üç seri deneyde numune çapı 75 mm dir. Bunlar standart gerilme artımı (IL), sabit deformasyon oranı (CRS), akımın kontrol edildiği (RF) deney gruplarıdır. Standart gerilme artımının uygulandığı deneyler 20 mm numune yüksekliği ile standart ödometre hücrelerinde yapılmıştır. Sabit deformasyon uygulanan deneyler 25 mm yüksekliğindeki numuneler ile iyileştirilmiş üç eksenli deney hücrelerinde yapılmıştır. Numunelerde tam doygunluk koşullarının sağlanması

için deneyler esnasında numunelere 100 kPa hücre basıncı uygulanmıştır. Numunenin üst yüzeyinden drenaja izin verilmekte drenaja izin verilmeyen alt yüzeyde boşluk suyu basıncı ölçümü yapılmaktadır. Boşluk suyu akımının kontrol edildiği (RF) deneylerde 20 mm yüksekliğindeki numuneye drenaja izin verilmeden gerilme uygulanmaktadır. Numune tamamen suya doymuş ise boşluk suyu basıncı toplam gerilmedeki değişim kadar artacaktır. Efektif gerilmelerde herhangi bir değişime izin verilmemiştir. Boşluk suyu akımını kontrol ederek drenaja bir yönden izin verilmektedir. Akım kontrol edilerek numune kesiti boyunca boşluk suyu basıncında çok az bir azalmaya izin verilmektedir. Böylelikle efektif gerilmeler yaklaşık olarak numune kesiti boyunca üniormdur ve drenaj devam ederken değerleri artmaktadır. Numune tamamen suya doymuş değil ise drenajsız aşamada efektif gerilme değerlerinde küçük değişimler olacaktır. Bu değerlerin yeterli doğrulukla hesaplanabilmesi için toplam gerilme en büyük değerine ulaşınca kadar, gerilmeler küçük miktarlarla arttırılmaktadır. Böylelikle ilgili boşluk suyu basınçları ölçülebilmektedir. Permeabilite deneyleri bu grup deneylerde numune boyunca akım oranını kontrol eden akım pompaları kullanılarak yapılmaktadır.

Deneysel çalışmada ön konsolidasyon basınçları Casagrande yöntemi ile hesaplanmıştır. Bir deney sonucundan, bir yöntem kullanılarak ön konsolidasyon basıncının gerçeğe uygun biçimde belirlenebilmesi zor bir işlemdir. Diğer yöntemlerin kullanımları da araştırılmalıdır. Yöntemlerden birisi deney sonuçlarının sıkışma modülüne ($1/m_v$)'ye karşın düşey efektif gerilmenin logaritması eksenlerinde çizilmesidir. Deney sonuçları her iki yöntem ile değerlendirilmiş ve zemine ait ön konsolidasyon basınçları belirlenmiştir. Casagrande yöntemine göre bu yöntem ile ön konsolidasyon basınçları daha büyük bulunmuştur. Yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin deney sonuçlarında her iki yönteme göre ön konsolidasyon basınçları bulunmamaktadır. Deney sonuçları $\ln(1+e)$ -Logaritma düşey efektif gerilme eksenlerinde çizildiğinde bulunan ön konsolidasyon basınçlarının Casagrande yöntemi ile bulunan değerlerine benzer oldukları görülmüştür.

Sabit deformasyon oranı (CRS) ve akımın kontrol edildiği (RF) deney sonuçları akma gerilme oranına karşılık deformasyon eksenlerinde çizildiğinde akma gerilme oranının deformasyon oranına bağımlı olduğu görülmüştür. Daha yüksek deformasyon oranları daha yüksek gerilme oranı vermektedir.

Standart gerilme artımının uygulandığı(IL) deney sonuçlarında sünme davranışı incelenmiştir. Bütün gerilme artımlarında ikincil oturmaların da olduğu görülmüştür. En büyük sünme oranı akma gerilmesinden sonra oluşmaktadır. Deneysel sonuçlara dayalı olarak ön konsolidasyon basıncında yapısal göçme ile sünme arasında bir bağlantının bulunduğu gözlenmiştir. Gerilme artımlarının 5 gün devam ettiği deney sonuçları standart deney sonuçlarından daha küçük akma gerilmeleri vermektedir. İkincil oturma katsayısının $C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t$ akma gerilmesine yaklaşıırken yaklaşık sabit kaldığı gözlenmiştir. Benzer sonuçlar Mesri ve Godlewski (1977) tarafından değişik killi zeminlerde de bulunmuştur.

Deneylerde kullanılan Bothkennar kilinin su muhtevası derinlikle ve yatay düzlemde dahi değişmektedir. Dolayısıyla deney başı-boşluk oranlarında değişmektedir. Deney başı-boşluk oranlarının farklı olmasına karşın dört numunede de düşey deformasyon (ϵ_v)-Logaritma efektif gerilme grafiğinde benzer davranış görülmektedir. Aynı zamanda sünme davranışları da benzerdir. Diğer grup deneylerde de benzer davranış görülmesine karşın aynı bloktan hazırlanan numunelerde akma gerilmesi dolaylarında davranış farklıdır. Farklılığın numune alınması ve deneyler için hazırlanması aşamalarında oluşan örselenmelerden kaynaklandığına inanılmaktadır.

Permeabilite değerleri sabit deformasyon oranında (CRS) yapılan deneylerde numune yüksekliği, deformasyon oranı, ölçülen boşluk suyu basıncı değerlerinden hesaplanmaktadır. Akma gerilmesi dolaylarında hesaplanan permeabilite değerlerinin gerçeği yansıtmadığına inanılmaktadır. Yarı logaritmik çizimde azalan boşluk oranı ile permeabilitenin azaldığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada deneylerin çoğunluğu Laval yöntemi ile alınan numuneler kullanılarak yapılmasına karşın birkaç deney Sherbrooke yöntemi kullanılarak alınan numuneler ile de yapılmıştır. İki yöntem kullanılarak alınan numunelerin sonuçları piston yöntemi ile alınan numunelerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sherbrooke yönteminde örselenmenin piston numunelerine oranla daha az olduğu görülmüştür. Örselenmenin etkisi akma gerilmesine kadar etkili olmaktadır. Numune alma yönteminin akma gerilme oranına açık bir etkisi bulunmamaktadır. Numunenin alındığı derinliğin büyük olduğu durumlarda da benzer koşullar geçerlidir.

Sabit deformasyon oranında (CRS) yapılan deney sonuçları diğer grup deney sonuçlarından daha avantajlıdır. Ancak deneyler daha uzun sürede

tamamlanmaktadır. Standart gerilme artımının uygulandığı deneyler (IL) temel deney olarak görülmektedir. Bu grup deneylerde gerilme artımlarının uygulanabilmesi için yeterli süre var olduğunda detaylı sonuçlar temin edilebilmektedir. Akımın kontrol edildiği (RF) deneyler basit olması nedeniyle tercih sebebidir. Efektif gerilmenin gerçeğe daha yakın ölçümü için deneyler 7-10 gün gibi sürelerde bitirilebilmektedir.

Killi zeminlerin arazideki davranışlarının belirlenebilmesi amacı ile literatürde zemin modelleri oluşturulmuş ve oluşturulmaktadır. Zemin yapısının homojen olmaması nedeni ile bu modellerde kullanılan zemin parametreleri laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler kullanılarak yapılan deneylerden bulunmaktadır. Bu durum dikkate alındığında, laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler, arazideki zeminin gerçek özelliklerini yansıtmadıkları düşüncesiyle eleştirilebilirler. Aynı kil kullanılarak hem örselenmemiş hem de laboratuarda hazırlanan numuneler kullanılarak aradaki farkın ne olduğunun araştırılması için dört grup deney Graham ve Li (1985) tarafından yapılmıştır. Deney programı; zeminin oturma davranışını, zemin modülünü, zeminin mukavemetini, akma değerini, boşluk suyu basınçlarını ve deformasyon oranı etkilerini belirleyecek biçimde düzenlenmiştir. İlk grupta örselenmemiş numuneler ile 76 mm çapında üç eksenli numuneleri $K_0=0,65$ olacak biçimde anizotropik olarak konsolide edilmiştir. Örselenmemiş numunelerin diğer bir bölümü eksenel olarak, normal konsolide olacak biçimde konsolide edilmiştir. Diğer grup numuneler, etüvde kurutulup, danelerine ayrılıp, 4 numaralı elekten elenmiştir. Elek altına geçen malzemenin likit limit değeri belirlenerek, likit limit değerinin iki katı su ile karıştırılmış ve bu karışıma 36 saat vakum uygulanmıştır. Karışım daha sonra 100 mm çapında silindire alınıp 80 kPa gerilme değerinde eksenel olarak konsolide edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan numuneler de çalışmada üç eksenli deneyler için, örselenmemiş numunelerin yapımında kullanılan basınç değerlerinde tekrar konsolide edilmiştir. Hazırlanan numunelerin bazılarında uygulanan basınç değerleri, aşırı konsolidasyon oranı 2 olacak biçimde geri alınmıştır. Numunelerin yarısı yanal gerilme sabit iken drenajsız olarak kesilmiştir. Diğer yarısında gerilmelerin kontrol edildiği gerilme izi deneyleri yapılmıştır.

Örselenmemiş ve yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerden temin edilen konsolidasyon deneyi sonuçları; örselenmemiş numunelerden gözlenen oturma eğrisi yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerden belirlenen eğriye yaklaşık

paralel ve eğrinin sağ tarafındadır. Örselenmemiş numunelerin gerilme geçmişleri yeniden hazırlanan numunelerden çok farklı olmasına rağmen, özgül hacim $(1+e)$ ve $\log. P'$ grafiğinde akma sonrası normal konsolidasyon doğruları benzer ve eğimleri sırasıyla 0,70, 0,72 dir.

Drenajsız kayma mukavemeti deneyi sonuçları, laboratuarda numunelere uygulanan konsolidasyon basıncı ile normalize edilmiştir. Normal konsolide, laboratuarda yeniden hazırlanan numunelerin sonuçları maksimum gerilme değerine küçük eksenel deformasyon değerlerinde ulaşp, artan deformasyon ile küçük miktar azalma göstermektedir. Benzer sonuç anizotropik olarak konsolide edilen deney sonuçlarında da görülmektedir. Boşluk suyu basınçları deney sonuna kadar artım göstermektedir. Aşırı konsolide yeniden hazırlanan numuneler, örselenmemiş numunelerden daha büyük mukavemet değerine sahiptir. Boşluk suyu basınçları daha küçüktür. Örselenmemiş normal konsolide numuneler ile yapılan deneylerden de benzer sonuçlar görülmüştür. Ancak boşluk suyu basınçları örselenmemiş numunelerde daha küçüktür.

Hacimsel sıkışma modülü hem örselenmemiş hem de yeniden hazırlanan numunelerden aynı değer olarak bulunmuştur. Yeniden hazırlanan numunelerden bulunan kayma modülü, örselenmemiş numunelerden bulunan değerinden daha büyüktür. Eğer killi zemin izotropik ise hem hacimsel sıkışma modülü hem de kayma modülü eksen seçiminden bağımsızdır. Doğal killi zeminlerde her iki değerinde seçilen eksenlere ve gerilme izinin yönüne bağımlı olduğu Graham ve Houlsby (1983) çalışmasında gösterilmiştir.

Yeniden hazırlanan ve örselenmemiş numunelerden belirlenen akma zarfları detaylarda farklı olmalarına karşın genel olarak birbirlerine benzerdir.

Deney sonuçlarında görülen farklı davranışların, arazideki zeminde çimentolanmanın bulunmasından ve yukarıya doğru hareket halinde olan kalsit içerikli yer altı suyundan kaynaklanabileceğine inanılmaktadır. Yeniden hazırlanan numunelerden belirlenecek boşluk suyu basınçlarının arazi değerlerinden daha küçük belirlenebileceği deneysel çalışmadan bulunmuştur. Kullanılan killi zemin arazide aşırı konsolide olmasına karşın, dolguların uzun süreli stabilite hesaplarında normal konsolidasyon parametrelerinin kullanılması gerektiği Rivard ve Lu (1978) çalışmasında önerilmektedir. Deformasyon oranının söz konusu olan killi zeminin mukavemet değerlerine etkisinin oldukça küçük olduğu yapılan deney sonuçlarından

bulunmuştur. Yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerden belirlenen rijitlik modülü, örselenmemiş numunelerden belirlenen değerinden daha büyüktür. Sürpriz olan bu sonucun deney yönteminden çok arazideki zeminin mineral yapısından kaynaklandığına inanılmaktadır. Akma zarfının şekli de killi zeminin mineral yapısına bağlıdır.

Homojen olmayan zemin tabakalarında bir boyutlu konsolidasyon denkleminin çözümü için pek çok nümerik model bulunmaktadır. Bu modeller giriş verisi olarak derinlikle zemin parametrelerindeki değişimin dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Mevcut arazi yöntemlerinin bu tip kesin bilgiyi sağlayıp sağlamadığı Freeze (1977) yayınında araştırılmıştır. Arazi araştırma programından ölçülen verilerin en gerçekçi biçimde değerlendirmesi her zemin parametresi için zemin parametreleri arasındaki korelasyon bağıntıları ile birlikte olasılık yoğunluk fonksiyonları türündendir. Olasılık yoğunluk fonksiyonları arazideki zemin tabakalarının heterojenliğini tanımlamaktadır. Bu fonksiyonlar heterojen sistemin oluşumundaki belirsizlikleri yansıtmaktadırlar. Freeze(1977) çalışmasında bir boyutlu konsolidasyonun çözümünde, zemin özelliklerinin olasılık yoğunluk fonksiyonları ile belirlendiği Monte Carlo çözüm yöntemini kullanmıştır. Çalışma sonucunda giriş verilerinde bulunabilecek belirsizliklerin, çıkış verilerinde daha büyük belirsizliklere neden olduğu gösterilmiştir. Yine bu çalışmada, eşdeğer zemin tabakası tanımında ortalama zemin özelliklerinin belirlenmesi de araştırılmaktadır. Oluşturulan çözüm yönteminde her zaman adımında oturma zaman grafiğinin çizilebilmesi için toplam oturmanın hesaplanması mümkündür. Çalışmada homojen zemin tabakası durumunda üç zemin parametresine gereksinim duyulurken, heterojen zemin sisteminde dokuz parametreye gerek duyulmaktadır. Çalışma sonucundan giriş verilerindeki standart sapmaların heterojen zeminlerde çok önemli olduğu bulunmuştur. Heterojen zemin sistemlerinde bir boyutlu konsolidasyonun çözümü için eşdeğer homojen zemin tabakası tanımlamak kolay değildir.

Üniform zemin tabakasında bile derinlikle konsolidasyon katsayısının değiştiği bilinmektedir. Pratik amaçlar için uygun zemin parametresinin seçimi kolay değildir. Problemlerle ilgili olarak üst sınır ve alt sınır çözümler olmak üzere iki set çözüm mevcuttur. Çözümlerin değişimlerini büyük bir doğrulukla açıklamakta olasılık çözümü kullanılabilir. Ching ve Chang (1986) çalışmasında bir boyutlu konsolidasyon probleminde konsolidasyon katsayısı, ilave boşluk suyu basıncı,

konsolidasyon derecesi keyfi değişkenler olarak alınmaktadır. Çalışmada konsolidasyon katsayısı efektif gerilme ve derinlikten bağımsız olarak dikkate alınmıştır. Denklem ve çözüm yöntemi hem tek tabaka hem de birden çok tabaka için çözölüp tartışılmıştır. Çoklu tabaka durumunda konsolidasyon işlemini yönlendiren denklem ile dış sınır şartları bir tabaka koşulları ile aynıdır. Bir tabaka kendi içerisinde birden fazla tabakaya bölündüğünde tabakalar arası sınırlarda boşluk suyu basıncında değişimler oluşacak ve süreklilik şartı sağlanmayacaktır. Bununla beraber iki komşu sınır tabaka arasında kütlenin süreklilik şartı sağlanmalıdır. Bu nedenle olasılık çözümünün oluşturulmasında simölasyon veya Monte Carlo yöntemi kullanılmıştır. Yazarlara göre bu tip süreksizliği dikkate almakta en iyi yöntemin sonlu fark yöntemi olduğuna inanılmaktadır. Çoklu tabaka çözümlerinde tabaka sayısı bire indirildiğinde bir tabaka ile çözümden belirlenen sonuçların aynısı temin edilmiştir.

Monte Carlo yöntemi kullanılarak çok tabakalı çözümden ortalama zaman faktörü için konsolidasyon derecesi bir tabaka durumundan yaklaşık 5% büyük olarak belirlenmiştir. Ortalama zaman faktörünün fonksiyonu olarak hesaplanan ortalama ilave boşluk suyu basınçları çok tabakalı durumda bir tabakalı durumdan yine 5% dolaylarında daha büyüktür.

Genel olarak çok tabakalı çözümden belirlenen değerler bir tabakalı çözümden belirlenenlerle yaklaşık aynıdır. Değerlerde görölün küçük farklılıkların konsolidasyon katsayısının derinlikle ve tabaka sayısının artması ile değişiminden kaynaklandığına inanılmaktadır. Tabaka sayısı 5-20 dolaylarında olduğunda değerlerdeki değişimin (konsolidasyon katsayısı, ilave boşluk suyu basıncı, konsolidasyon derecesi) küçük olduğu bulunmuştur.

Bölgesel deformasyonların laboratuvar deneylerinde kullanılan numunelerde etkili olduğü bilinmektedir. Düzlem deformasyon ya da iki eksenli deneylerde oluşın kayma bantlarının geometrisini doğrudan tanımlamak mümkün olabilir. Asimetrik üç eksenli deneylerde oluşın bölgesel deformasyon yığılmalarının şeklini tanımlamak ve bu bölgeleri saptamak pek kolay değildir. Genel olarak numunede homojen boşluk oranı dağılımı ile belirlenen boşluk oranı, deformasyon yığılmalarının olduğü kayma bantlarındaki değeri ile aynı değildir. Kayma bantlarının şekli ve bu bölgelerdeki zemin yoğunluğunun belirlenmesinde tomografi yönteminin kullanımını kapsayan çalışma Desrues ve diğ. (1996) tarafından yapılmıştır. Çalışmada

numunenin hem genel durumu hem de deformasyonların yoğun olduğu bölgeler kolaylıkla fotoğraflanabilmektedir. Kaba daneli, rölatif sıklığın yüksek olduğu numunelerde hacimsel genişlemenin yalnızca kayma bantlarında olduğu bu bölge dışında oluşmadığı Roscoe (1970) tarafından gösterilmiştir. Sözü edilen çalışmada X ışın yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışma ve konu ile ilgili diğer araştırmacılar tarafından yapılan diğer çalışmalarda kullanılan X ışın yöntemi tomografi yönteminde kullanılan ile aynı değildir. Yöntemin, gözlenen yoğunluk değişimindeki veri yetersizliği ve düzlem deformasyon deneylerinde kullanılabilir olması gibi iki eksikliği bulunmaktadır. Konu ile ilgili kullanılan diğer bir yöntem gamma ışın yöntemidir. Yöntem diğer yöntemlere oranla bir miktar zordur. Bu nedenle kullanımı birkaç çalışma ile sınırlı kalmıştır.

Tomografi yönteminde X ışın demedi numuneye zarar vermeden dönerek ve ilerleyerek numunenin fotoğraf görüntülerini kayıt etmektedir. Numunenin eksenini ile tarayıcının eksenini aynıdır. Kayıt edilen görüntüler uygun bilgisayar programı ile yan yana dizilerek numunenin bütün görüntüsü belirlenir. Değişik rölatif sıklıklarda kum numunelere sabit aksinel deformasyon uygulanmıştır. Çevre basıncı numuneye uygulanan vakum ile temin edilip numune etrafında hücre kullanılmamıştır. Dane boyutu tarayıcının çözünürlüğünden küçük olmalıdır. Kayıt edilen görüntüler görüntü işleme programında çözümlenmiştir. Görüntülerden yoğunluk haritaları belirlenerek, yoğunluk değerlerinden de numunelerin boşluk oranları hesaplanmıştır. Rölatif sıklığın yüksek olduğu numunelerde kayma bandının başlaması, ilerlemesi, tamamlanması kolaylıkla yoğunluk haritalarında görülürken gevşek numunelerde zordur. Kayma bandının oluşumu deney koşullarına da bağlıdır. Narinliğin yüksek olduğu, aksinel deformasyonun uygulandığı üst başlığın yağlanmadığı numunelerde en büyük gerilme değerine daha küçük aksinel deformasyonlarda ($\epsilon=7\%$) gelirken, narinliğin yüksek olmadığı üst başlığın yağlandığı numunelerde ilgili değere daha büyük deformasyon değerlerinde ($\epsilon=16\%$) gelinmiştir. Oluşan kayma bandının düzlem olmadığı görülmüştür. Numunelerden ölçülen genel aksinel deformasyon, boşluk oranı eğrileri ile kayma bantlarında ölçülen deformasyon, boşluk oranı eğrileri birbirlerinden oldukça farklıdır. Kritik boşluk oranı değerine deformasyonların fazla olduğu kayma bantlarında erişilir. Kayma bantları dışarısında ilgili değere gelinmediği çalışmada gösterilmiştir.

Zemin tabakalarında zemin özelliklerinin, zemin yapı ve dokusunun farklılık göstermesi konsolidasyon oranlarının güvenilir biçimde belirlenebilmesini güçleştirmektedir (Rowe, 1972). Son yıllarda bu değişimleri dikkate alan pek çok çalışma yapılmaktadır. Freeze (1977) bir boyutlu konsolidasyon problemini hacimsel sıkışma sayısı ve permeabilite katsayısı arasında cross korelasyonlarını uygulayarak araştırmıştır. Chang (1985) ilgili katsayılar arasında gamma dağılımının konsolidasyonun bir boyutlu çözümünde konsolidasyon katsayısına etkisini araştırmıştır.

Hacimsel sıkışma sayısı ve permeabilite katsayısı heterojen zeminlerin konsolidasyon davranışında önemlidir. Bu katsayıları keyfi değişken olarak dikkate alan çalışma Muang ve diğ. (2010) tarafından yapılmıştır. Sözü edilen çalışmada Biot (1941) konsolidasyon denklemi iki boyutlu olarak kullanılmıştır. Heterojen zeminlerde oturma ile tanımlanan ortalama konsolidasyon derecesi, ilave boşluk suyu basıncı ile tanımlanan değerinden Lee ve diğ. (1992) makalesine dayalı olarak farklıdır. Bu farklılığın sonuçlara etkisi Muang ve diğ. (2010) çalışmasında incelenmektedir. Yine aynı çalışmada bir boyutlu ve iki boyutlu olasılık çözümleri yapılarak konsolidasyon davranışına boyut etkisi araştırılmıştır. Bir boyutlu Terzaghi ve iki boyutlu Biot denklemlerinde düzlem deformasyon durumu ile küçük deformasyonlar kabul edilmektedir. Boşluklarda bulunan suyun sıkışabilirliği çözümlerde dikkate alınmamıştır. Malzeme elastik, boşluklu katı olarak, sıkışma modülü ve Poisson oranı gibi iki elastik parametre ile tanımlanmaktadır. Çalışmalarında dört sıkışabilir tabakayı zemin profili olarak kullanmışlardır. Yüzeyde drenaja izin verilip tabanda drenaja izin verilmemektedir. Zemin yüzeyine üniform gerilme uygulanmıştır. Bir boyutlu Terzaghi çözümünde iki düğüm noktalı çubuk elemanlar, iki boyutlu çözümde kare elemanlar kullanılmıştır. Oturma ve ilave boşluk suyu basıncına dayalı iki boyutlu çözüm bir boyutlu çözüme oranla daha büyük konsolidasyon katsayısı değeri vermektedir.

Yazarlara göre zeminlerin permeabilite katsayıları hacimsel sıkışma sayılarına oranla daha fazla değişim göstermektedir. İlgili çalışmada her iki değer içinde aynı değişim katsayısı kullanılmıştır. Bir boyutlu çözümlerde ilave boşluk suyu basıncı ile tanımlanan ortalama eşdeğer konsolidasyon katsayıları bir değerinden küçük bulunmuştur. Oturma değeri ile tanımlanan ortalama eşdeğer konsolidasyon katsayıları bir değerinden büyüktür. Benzer sonuç iki boyutlu çözümlerden de

bulunmuştur. İki boyutlu çözümlerden belirlenen ortalama eşdeğer konsolidasyon katsayıları her zaman bir boyutlu çözümlerden belirlenen değerlerinden büyüktür. Sonlu eleman çözümlerinden ilave boşluk suyu basıncı ile ortalama konsolidasyon derecesi belirlenip bu değerler oturma hesaplarında kullanımının hatalı sonuçlara neden olacağı görülmüştür. Korelasyon uzunluğunun artması ortalama eşdeğer konsolidasyon katsayısının artmasına sebep olacaktır.

Kayma deformasyonları ve kayma deformasyonlarını takiben kayma yüzeyinin oluşumu toprak dolgu baraj, şev stabilitesi ve temel gibi pek çok geoteknik problemde önemlidir. Kayma yüzeyinin kalınlığı ile ilgili çalışmalar 1950 yıllarından günümüze kadar yapılmaktadır. Kumlu zeminler kullanılarak son yıllarda yapılan çalışmalar kayma yüzeyinin oluşumunun kumun rölatif sıklığından bağımsız olduğunu göstermektedir. Kumlu zemin kullanılarak yapılan üç eksenli çekme ve üç eksenli basınç deneylerinde iyi tanımlanan tek bir kayma yüzeyi Lade (1982), Sadrekarimi (2009) çalışmalarında görülmemektedir. İlgili çalışmalarda, bu tip numunelerde çoklu kayma yüzeyleri gözlenmiştir. Sözü edilen nedenden dolayı kayma yüzeyinin kalınlığı ile ilgili çalışmalarda düzlem deformasyon basınç deneyleri kullanılmıştır (PSC). Viggiani ve diğ. (2001) suya doygun kum zemin kullanarak kayma yüzeyinin kalınlığının ortalama efektif dane boyutu D_{50} ile doğrudan bağımlı olduğunu, kayma yüzeyinin yönünün ilgili değerden bağımsız olduğunu yaptıkları deney sonuçlarından bulmuşlar. Ayrıca konu edilen değerlerin numunenin rölatif sıklığından bağımsız olduğu görülmüştür.

Düzlem deformasyon basınç (PSC) deneylerine benzer olarak kayma yüzeyi halka kesme (RS) deneylerinde de oluşmaktadır. Halka kesme (RS) deneyinde kayma yüzeyi tanımlı olmasına karşın kayma deformasyonları istenilen değere kadar sürdürülebilir. Bu deneyde numune çevresinde bulunan ring nedeni ile kayma yüzeyinin oluşmaya başlaması, tam olarak oluşması ve kalınlığının fiziksel olarak görülebilmesi mümkün değildir. Konu edilen değerlerin iyi biçimde görülebilmesi amacı ile saydam ringli halka kesme aleti Illinois Üniversitesinde Sadrekarimi ve Olson (2009) tarafından yapılmıştır. Sadrekarimi ve Olson (2010) tarafından Ottawa (OT), Illinois nehri (IR) ve Mississippi nehri (MR) kumları kullanılarak sabit hacimde ve drenajlı deneyler yapılmıştır. Kayma yüzeyinin iyi görülebilmesi amacı ile kuru durumdaki numunelerin belirli bölgelerine düşey yönde renkli kum yerleştirilmiştir. Deney sonuçlarından yaklaşık 5,0- 5,5 mm yer değiştirmelerde

efektif kayma mukavemeti açısının oluştuğu bulunmuştur. Çok büyük olmayan konsolidasyon gerilmelerinde özellikle Ottawa ve Illinois kumlarında büyük kayma deformasyonlarında kayma yüzeyinde danelerin ciddi zarar gördüğü gözlemlenmiştir. Kayma yüzeyinin üst bölgelerinde daneler zarar görmemektedir.

Teorik ve deneysel çalışmalar kayma yüzeyinin kalınlığının ortalama efektif dane boyutu (D_{50}) gibi dane özellikleri ile ilgili olduğunu Alshibli ve Sture (2000) göstermektedir. Genel olarak Finno ve diğ. (1997) çalışmasına bağımlı olarak kayma yüzeyinin kalınlığı ortalama efektif dane boyutunun (D_{50}) 10~25 katı aralığında bulunmaktadır. Sadrekarimi ve Olson (2009) çalışmasında kullanılan üç ayrı kum numunede kayma yüzeyinin kalınlığı kayma deformasyonları ile değişim göstermektedir. Sabit hacimde ve drenajlı deney sonuçlarından Mississippi nehir kumunda küçük kayma deformasyonlarında kayma yüzeyinin kalınlığı sabit değere ulaşırken Ottawa kumunda daha büyük kayma deformasyonları gerekli olmaktadır. Ottawa kumunda dane boyutu aralığının küçük olmasının ilgili sonuca yol açtığı kabul edilmektedir. Drenajlı deneylerde sabit hacimli deneylere oranla kayma yüzeyinin kalınlığı daha küçük kayma deformasyonlarında sabit değerine ulaşmaktadır. Kayma yüzeyi sabit değerine ulaştıktan sonra Ottawa kumunda 5,0 mm, Illinois nehir kumunda 5,4 mm, Mississippi nehir kumunda 1,3 mm olarak ölçülmüştür. Sözü edilen sonuçlara ilave olarak kayma yüzeyi kalınlığının tüm numune kesiti boyunca aynı değerde olduğu deneysel çalışmada görülmüştür.

Dane boyutu dağılım aralığında Ottawa kumu ile Illinois kumu arasında fark bulunmasına karşın kayma yüzeyi kalınlığı her iki kum içinde $10 \times D_{50}$ kayma deformasyon değerinde sabit kalınlık değerine ulaşmaktadır. İnce daneli, dane boyutu dağılımı daha geniş aralıkta bulunan Mississippi nehir kumunda ise kayma yüzeyi kalınlığı sabit değerine $14 \times D_{50}$ kayma deformasyon değerinde ulaşmaktadır. Yapılan bütün deneylerde kayma yüzeyi oluştuktan sonra bütün deformasyonlar, danelerin yeniden düzenlenmesi, danelerin gördüğü zarar yalnızca bu düzlemde oluşmaktadır. Kayma yüzeyinin üzerinde bulunan zeminde herhangi bir deformasyon ve danelerde zarar görülmemektedir.

Düzlem deformasyon basınç deneylerinde (PSC) en büyük asal gerilme her zaman düşey yöndedir. Kayma yüzeyi herhangi bir pürüzlülük olmadan oluşabilmektedir. Halka kesme (RS) deneylerinde kayma yüzeyi yükleme plaklarına paralel yatay düzlemde oluşmaktadır. Bu deneyde numune ile ring arasında bulunan pürüzlülük en

büyük asal gerilmenin dönmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla halka kesme (RS) deneyinde asal gerilmenin büyüklüğü ile yönünün belirlenmesi mümkün olmamaktadır.

Ödometre deneylerinde yanal gerilmelerin deney sonuçlarının değerlendirilmesinde etkilerinin araştırılması ile ilgili çalışma Habib ve Puyo (1953) tarafından yapılmıştır. Yanal gerilmelerin tahmin edilebilmesi amacı ile iki plastik kil ile aynı boyutta ve aynı özelliklerde numunelerle yanal gerilmelerin bilindiği üç eksenli ve yanal gerilmelerin bilinmediği ödometre deneyleri ilgili çalışmada yapılmıştır. Çevre koşullarının deney sonuçlarına etkisinin olabileceği düşünülerek aynı deney iki defa yapıp gözlenen oturmalar karşılaştırılmıştır. Üç eksenli alet ile yapılan deneylerde farklı çevre gerilmeleri uygulanmış ve deney sonuçları yanal yönde şekil değiştirmeye izin verilmemiş gibi ödometre deneylerine benzer biçimde hesaplanmıştır. Yanal gerilmenin sıfır olduğu üç eksenli alet ile yapılan deneylere bağımlı çizilen oturma eğrisi eğiminin ödometre deney eğrisi eğiminden küçük miktar büyük olduğu her iki numune sonucunda da ilgili çalışmada görülmüştür. Sabit gerilme etkisinde uzun zaman içerisinde deformasyon davranışının da araştırıldığı çalışmada yanal gerilme düşey gerilmenin yarısı olduğunda sünmenin önemli olduğu bulunmuştur. Deformasyonun zaman ile değişiminin araştırılması, sabit gerilme etkisinde konsolidasyon devam ederken yanal gerilmenin değişiminin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Çalışma sonucundan ayrıca, ödometre deneyinde yanal gerilmeler uygulanan düşey gerilmelere eşit kabul edildiğinde ölçülecek oturmalara, üniform gerilme ile konsolide olan üç eksenli numunesinden ölçülen oturmalara yakın olacağı açıklanmaktadır. Bu sonuca ödometre deneyinde gerilme dağılımının üniform olduğu kabul edilerek ulaşılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda ayrıca, plastisitenin yüksek olduğu killi zeminlerde eksenel gerilme etkisinde konsolide edilen kesme kutusu deney sonuçlarının üniform gerilme ile konsolide edilen üç eksenli deney sonuçlarına benzer olacağı açıklanmaktadır.

Orta asal gerilmenin değişiminin zeminlerin kayma mukavemetine etkisinin araştırılması amacı ile ilgili diğer bir çalışma Habib (1953) tarafından yapılmıştır. Bilindiği üzere standart üç eksenli deney sonuçları Mohr diyagramında gösterildiğinde orta asal gerilmenin kayma mukavemetine herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Konu edilen çalışmada orta asal gerilmenin zeminlerin kayma

mukavemetine etkisinin daha iyi gösterilebilmesi amacı ile üç eksenli basınç, üç eksenli çekme ve burulma deneyleri kum, kil ve balçık türü zeminler ile yapılmıştır.

Kum numune kullanılarak yapılan deneylerde danelerin yuvarlak olduğu nehir kumu, dane dağılımının iyi derecelenmiş olduğu ve daneleri köşeli olan numunelerle ilgili deneyler yapılarak ilk numunede basınç durumunda kayma mukavemeti açısı 38° bulunurken aynı numunede çekme durumunda 30° olarak bulunmuştur. İkinci örnekte numune kritik yoğunlukta hazırlanarak ilgili deneyler yapılmış ve ilgili değerler sırasıyla 31° ve $24,5^\circ$ bulunmuştur. Aynı yoğunlukta hazırlanan aynı numunede kesme kutusu deneyinden ilgili değer çalışmada 31° olarak bulunmuştur. İlgili deneylerde hacim değişimleri ölçülerek yapılan bütün deneylerde deney başında hacimde küçük miktar azalma görülürken daha sonra kırılma durumuna yaklaşıldığında hacimde artma görülmüştür. Bu sonucun numune boyutundan bağımsız olduğu bulunmuştur.

Bilindiği üzere eksenel basınç deneylerinde numuneler eksenel gerilmenin arttırılması ile kırılmaktadır. Bu durumda orta asal gerilme en küçük asal gerilmeye eşit olmaktadır. Eksenel gerilmenin azaltılması veya yanal gerilmenin arttırılması ile kırılmaya ulaşıldığında orta asal gerilme en büyük asal gerilme değerine eşit olmaktadır. Bu iki sınır değer arasında orta gerilmenin etkisinin araştırılması amacı ile çalışmada burulma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler için numunelerde çok ince ve esnek membran kullanılmıştır. Ayrıca hidrostatik basınç uygulanarak numuneler hazırlanmıştır. Numune boyunun uzaması ile kırılmanın olduğu deneylerde yer değiştirme miktarı, numune başlarından ilave kırılmanın önlenmesi amacı ile sabit değere ayarlanmıştır. Bu deneylerde kuvvet çifti numune başlarından uygulanmış ve numune kırılana kadar arttırılmıştır. Bu deneylerde kullanılan membranların ince ve esnek olmalarına rağmen ilave mukavemet sağladıkları unutulmayıp düzeltme yapılmıştır. Yazarlara göre orta gerilme numune kırılana kadar değişmektedir. Membranın neden olduğu ilave gerilme de orta gerilmenin değerine bağımlı değişmektedir. Dolayısıyla bu değişimi deney esnasında ölçmek kolay değildir. Bu durumdan kaçınmak amacı ile membranın sağladığı ilave mukavemetin gerilme durumundan bağımsız olduğu kabul edilmektedir. Buna bağımlı olarak orta asal gerilmenin yerini sabitleyen λ parametresi tanımlanmaktadır. Deneylerden gözlenen sonuçlara ve λ katsayısına bağımlı kırılma durumundaki Mohr daireleri çizildiğinde, dairelerin zarfı yaklaşık doğrudur. Kırılma zarfının düşey ekseni kestiği nokta kırılma durumunda membranın sağladığı ilave gerilme olarak λ kabul edilmektedir.

Yapılan deneylerde kayma mukavemeti açısı ile λ değerinin değişimi bulunmuştur. λ sabiti üç asal gerilmeye bağımlı olarak tanımlanmakta ve eksenel basınçta 0, eksenel çekmede 1 olması dolayısıyla 0~1 aralığının da değişmektedir.

Deneysel çalışmada ayrıca kırılma düzleminin düşey eksenle $(\Pi/4)-(\phi/2)$ eğimde olduğu gösterilmek istenmiş ancak burulma deneylerinde kırılma yüzeyinin düzlem olmayıp asal gerilmelerin yönleri ile değişen spiral yüzeylerden oluşması dolayısıyla başaramamıştır. Deneylerde hacim değişimleri ölçülmüş ve üç eksenli deneylerden gözlenen davranışa uygun sonuç bulunmuştur. Yazarlara göre kırılma düzlemlerine yakın bölgelerde kumun kompasitesindeki değişimler dolayısıyla deneysel sonuçların yeterli olduğunu söylemek doğru değildir. Kayma mukavemeti açısı $\tan \phi = K/\epsilon$ formunda açıklanmalı ve bu değişimin numunenin belirli bölgesinde yoğunlaştığı gösterilebilmelidir. Bu durumun deneysel olarak gösterilmesi çok zordur. Benzer biçimde çalışmada bulunan sonuçların konu ile ilgili diğer çalışmalarda bulunanlara uygun olduğu açıklanmaktadır. Nadai (1931) kohezyonlu malzemeler kullanarak yaptığı deneylerde kırılma gerilme artımı ile oluştuğunda kayma mukavemeti 10% dolaylarında arttığında orta asal gerilmenin diğer iki asal gerilmenin aritmetik ortalaması olduğunu kanıtlamıştır.

Aynı deneysel çalışmada yukarıda konu edilen üç deney grubu plastisite indisi 50%, 90% gibi yüksek olan kil numuneler kullanılarak ta yapılmıştır. Suyu doygun numunelerin kullanıldığı deneylerde drenaja izin verilmeyip numuneler hızlı biçimde kesilmiştir. Aynı özellikte numunelerin kullanıldığı üç eksenli deney sonuçlarından toplam gerilmelere göre yaklaşık aynı Mohr daireleri bulunmuştur. Suyu doygun numuneler hızlı kesildiğinden kayma mukavemeti açısı sıfırdır. Burulma deneylerinde numuneler kohezyonlu olduğundan membran kullanılmayıp bunun yerine numuneler ince film kalınlığında yağ tabakası ile deneyler esnasında korunmuştur. Dolayısıyla membranın sağladığı ilave mukavemet parametresi bu deneylerde bulunmamaktadır. Farklı numune boyutlarında ve farklı yanal gerilmelerde burulma deneyleri yapılmıştır. Burulma deneylerinde de kesme esnasında drenaja izin verilmediğinde, üç eksenli deney sonuçlarına benzer biçimde kayma mukavemeti açısı sıfır olarak bulunmuştur. Bu deney grubunda da hem numune boyunun uzadığı hem de numune boyunun kısaldığı deneylerde kayma düzlemi araştırılmıştır. Toplam gerilmelere göre Mohr daireleri çizilmiştir. Bu grafikten yararlanarak orta gerilmenin değerinin fonksiyonu olarak Mohr dairelerinin

apının değişimini gösteren grafik çizilmiştir. Killi numunelerden bulunan sonuçlar hem ilk grafikte hem de ikincisinde kum numunelerden bulunanlardan tamamen farklıdır. Dolayısıyla Mohr daireleri yardımı ile bu grup deney sonuçlarının değerlendirilmesi geçerli değildir. Orta gerilme ile Mohr dairelerinin çapındaki değişimi gösteren grafikte $\lambda=0$ ve $\lambda=1$ doğruları üzerinde grafik noktalarının işaretlenmesi kolay değildir. Kullanılan numunenin serbest basınç mukavemeti konsolidasyon basıncının 7/10'u dolaylarındadır. Yapılan burulma deneylerinden kırılmaya neden olan kuvvetin uygulanan eksenel gerilme değerinden bağımsız olduğu bulunmuştur. Burulma deneylerinde kırılmaya neden olan kuvvet toplam gerilmelere göre Mohr dairelerinin düşey eksenini kestikleri nokta olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda da orta gerilme ya sıfırdır ya da atmosfer basıncına eşittir. Yazara göre orta gerilme kesme kutusu deneyinden veya uygulanan eksenel gerilme ile numune kesitinin azaldığı burulma deneyinden bulunan değere eşittir. Bu deney sonuçlarında da hem basınçta hem de eksenel gerilmenin azaltıldığı deney sonuçlarında en büyük çapı olan Mohr dairesinin ordinat değeridir. Deneylerde kullanılan numunede kırılma düzlemi en büyük asal gerilme ile 45° açı yapmaktadır. Deneyisel çalışmada kayma düzlemlerinin yatay eksene göre eğimlerinin uygulanan eksenel gerilme ile değiştiği açıklanmaktadır. Yanal gerilmenin uygulanmadığı burulma deneyinden kayma yüzeyinin düzlem olduğu ve numunenin eksenine dik olduğu grlmştir. Balçık türü numuneler ile yapılan deney sonuçları çalışmada açıklanmamıştır.

Killi zeminlerde kayma mukavemeti açısı ile kırılma düzleminin yeri ve şekli ile ilgili diğer bir alışma Habib (1953) tarafından yapılmıştır. Kırılma düzleminin en büyük asal gerilme ile yaptığı aının ölümü, kırılma düzlemlerinin nadiren düzlem şeklinde olması ve kırılma öncesi numunede oluşan deformasyonlar nedeni ile kolay değildir. Bu nedenle çalışmada deneyler öncesi numune yüzeyleri yatay ve düşey birbirine dik doğrular ile çizilmiştir. Bu çizgiler numuneye zarar vermeyecek biçimde çok incedir. Ayrıca numunede olması muhtemel kırılma düzleminin başlamasına neden olmayacak biçimde ve kırılma düzlemi oluştuğunda bu çizgilerin açıortayı olacak biçimde çizilmişlerdir. Çizilen bu doğrular yardımı ile deney sonunda kırılma düzleminin yatayla yaptığı açı llmştir. Paris dolaylarında plastisite indisi ortalama 90% olan kil ile yapılan deneylerde ilgili aı net olarak 45° llmştir. Normal konsolide ve numunede drenaja izin verilmeden yapılan hızlı

kesme deneylerinde kayma mukavemeti açısı 16° ~ 17° bulunurken, aşırı konsolide durumda aynı açı aynı koşullarda 7° ~ 10° olarak bulunmuştur. Daneler arası hareketleri düzenleyen, kırılma yüzeyinin oluşumuna neden olan yazar tarafından daneler arasında ve danelerin etrafında bulunan suyun sebep olduğu dikkate alınarak çalışmada en büyük dane boyutu 0,01mm olan toz durumuna getirilen kil numunede dane –dane hareketleri incelenmiştir. Bu nedenle kesme kutusu ve üç eksenli deney aletleri kullanılmıştır. Örselenmemiş numunelerdeki gibi ya arazide etkisinde kaldıkları konsolidasyon basınçlarında yada farklı basınçlarda kesme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının karşılaştırılmasında konsolidasyon basınçlarının aynı olmasından öte numunelerin aynı kuru birim hacim ağırlıkta olmalarına dikkat edilmiştir. Normal konsolide örselenmemiş numunede 4 kg/cm^2 basınç etkisinde $1,47 \text{ gr/cm}^3$ kuru birim hacim ağırlık temin edilirken, aynı birim hacim ağırlığı kuru numunede temin edebilmek için numuneye 25 kg/cm^2 basınç uygulanması gerekmektedir. Eksenel gerilme ile konsolide edilen kesme kutusu deney sonuçlarından kayma mukavemeti açısı 28° bulunurken üç eksenli deney sonuçlarından aynı değer 32° olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan kayma düzleminin düşey eksen ile yaptığı açı 30° olarak bulunmuştur. Kayma mukavemeti açısı arasındaki fark konsolidasyon koşullarına bağlanmaktadır. Kesme kutusu deneyinde eksenel gerilme uygulanırken üç eksenli deneylerde üniform gerilme uygulanmaktadır. Daha küçük eksenel konsolidasyon basıncı ile yapılan kesme kutusu deneylerinden ilgili açı 20° ~ 22° bulunurken üç eksenli deneylerden 25° dolaylarında bulunmuştur. Kohezyon değeride uygulanan konsolidasyon basıncı ile değişmektedir. Etüvde veya dondurularak kurutulan diğer numunelerden de benzer sonuçlar bulunmuştur. Daneler arasında bulunan suyun kırılma yüzeyinin oluşumunda ve yerinde önemli olduğu düşünülerek kuru durumdaki kil numunelerinin başka sıvı ile karıştırılması denenmiştir. Kuru ve toz durumunda bulunan kil numune benzin ile karıştırılarak aynı koşullarda kesme kutusunda konsolide edilerek deney yapılmıştır. Daha önceden konu edildiği üzere daneler arasında su bulunurken kayma mukavemeti açısı 16° bulunurken suyun yerine benzin kullanıldığında ilgili açı 36° bulunmuştur. Daha küçük konsolidasyon basınçlarında numunenin konsolide olmasına izin verilmeden yapılan deneylerden 20° dolaylarında açı ve küçük miktarda da olsa kohezyon değeri bulunmuştur. Daneler arasında su bulunurken serbest basınç deneylerinden suya doymun numunelerde kayma mukavemeti açısı bilindiği üzere 0° olarak bulunmaktadır. Numuneler ister su ister

benzin ile hazırlansınlar, hazırlama koşulları ile kuru birim hacim ağırlıklarının aynı olmasına çalışmada gereken özen gösterilmiştir. Kesme deneylerinde kullanılan numunelerde permeabilite katsayıları ölçülmüş ve benzin ile hazırlananlarda ilgili değer su ile hazırlananlardan 1000 defa daha büyük olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla benzin daneleri birbirine bağlamamaktadır. Daneler arasında sıvı bulunsu bile geçirimsizliğin büyük olması dolayısıyla hızlı kesme deneyleri belirli bir açı değeri vermektedir. Ancak kayma düzlemi bu grup deney sonuçlarından gözlenememiştir. Dolayısıyla numuneler su ve benzin karışımı kullanılarak hazırlanmıştır. İki sıvının kaynama noktalarının farklı olmasından yararlanarak numuneler sudan arıtılmıştır. Kaynatılarak numuneden atılan su miktarı ölçülmüştür. Deney sonuçlarından, yukarıda açıklananlara benzer sonuçlar bulunmuştur. Homojen suya doymun numunede görölene benzer biçimde net olmasu da 30°-45° arasında farklı küçük yüzeylerden oluşun kayma düzleminin oluştuğu görölmüştür. Çalışmada ayrıca kuru birim hacim ağırlık ve uygulanan gerilme arasında da olası bağıntının varlığı araştırılmıştır. Basınç arttıkça kuru birim hacim ağırlığın arttığı biçiminde bağıntı bulunmuştur. Suyu doymun killi zeminlerle yapılan hızlı kesme deneylerinden kayma mukavemeti açısının sıfır olup olmaması durumuna rağmen serbest basınç deneylerinden gözlenen mukavemet ile kuru birim hacim ağırlık arasında da bağıntının varlığı araştırılmıştır. Aynı kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış kuru kilin kohezyon değerinin normal konsolide kilin kohezyon değerine yakın hatta büyük olduğu görölmüştür. Beklenmedik bu sonucun büyük bölümünün daneler arasındaki moleküler bağlardan kaynaklandığına inanılmaktadır. Kuru birim hacim ağırlık arttıkça kohezyon değerinin arttığı biçiminde bağıntı bulunmuştur.

İki örselenmemiş kil ile yapılan kesme deneyleri esnasında boşluk suyu basınçlarındaki değişimler ile ilgili çalışma Bishop ve Henkel (1953) tarafından yapılmıştır. Numunenin durumuna göre, kayma gerilmelerinin uygulanması boşluklarda bulunan suda negatif basıncın oluşumuna neden olacaktır. Uygulanan gerilmenin geri alınması durumunda dahi negatif boşluk suyu basıncı bulunacaktır. Uygulanan gerilmenin sıfır olmasına rağmen negatif boşluk suyu basıncının bulunması, kayma gerilmeleri etkisi ile drenajsız biçimde kesilen numunede zemin yapısının hacminin büyüme eğilimi ve deformasyonların tamamen geri dönmemesi ile ilgilidir. Aşırı konsolidasyon oranı büyük olan killi zeminler demir yolu, otoyol gibi yapıların tabanlarında kullanıldıklarında başlangıçta çok sert yapıya sahip

olmalarına rağmen, hareketli gerilmelere maruz kaldıktan sonra dolguda görülen yumuşamanın nedeni bu biçimde açıklanabilmektedir. Açıklanmaya çalışılan bu konu ödometre deneyleri ile belirlenmeye çalışılan zeminlerin kabarma özellikleri ile ilgili değildir. Dolayısıyla çalışmada yapılan üç eksenli deneylerde hareketli yük esnasında hacim değişimleri, drenajsız deneylerde boşluk suyu basınçları ve bunlara bağımlı olarak su muhtevalarındaki değişimler ölçülmüştür. Deney başı su muhtevası 16,1% olan numune arazide etkisinde kaldığı eksenel gerilme değerinde drenaja izin verilmeden kesilmiştir. Mukavemet değerinin 2/3'ü değerindeki deviatör gerilme numuneye uygulanıp geri alınmıştır. Bu esnada boşluk suyu basınçları ölçülmüştür. Deviatör gerilmenin küçük değerlerinde küçük miktarda pozitif boşluk suyu basınçları görülüp daha sonra azalarak negatif boşluk suyu basınçlarının bulunduğu görülmüştür. Uygulanan gerilmelerin geri alınması durumunda negatif boşluk suyu basınçlarında önemli değişim görülmemiştir. Yeniden deviatör gerilme uygulanması aşamasında, boşluk suyu basınçlarında deney başında küçük miktar artım görülmüş daha sonra numune kırılana kadar boşluk suyu basınçları azalmaya devam etmiştir. İkinci tip deneyde numunenin su almasına izin verilmiş ve zemindeki yumuşama doğrudan ölçülmüştür. Numune arazide etkisinde kaldığı gerilme değerinde üniform olarak konsolide edilip, daha sonra deviatör gerilme uygulanıp geri alınmıştır. Bu esnada su muhtevasında olabilecek değişimler deney esnasında hacim değişimlerinin ölçülmesi ile belirlenmiştir. Benzer biçimde uygulanan deviatör gerilme mukavemet değerinin 2/3'ü değerindedir ve 1 dakikadan daha az süre içerisinde uygulanıp geri alınmıştır. Numunenin su muhtevası denge durumuna ulaştıktan sonra ilk uygulanan gerilmenin değerinden daha küçük deviatör gerilme tekrar numuneye uygulanıp geri alınmıştır. Yine numunenin su almasına izin verilmiştir. Üçüncü çevrimde numunenin kırılmasına drenajsız olarak izin verilmiştir. Deney başında su muhtevası 17,5% iken deney sonunda 20,3% olarak bulunmuştur. Deney başı su muhtevasında bulunan mukavemet değerinin 1/3'ü bu deneyin sonucunda bulunmuştur. Konu edilen bu deneyler tekerlek yüküne maruz dolgularda başlangıç su muhtevalarında herhangi bir kırılma söz konusu değilken daha sonra hareketli gerilmeler etkisi ile su muhtevalarında olabilecek artımlar ile kırılmaların olabileceğini göstermektedir. Normal konsolide killi zeminlerde aynı davranış görülmemiştir. Uygulanan gerilmenin geri alınması durumunda da pozitif boşluk suyu basınçlarının bulunması zeminin konsolide olmasına sebep olmaktadır. Normal konsolide killi zeminlerde uygulanan gerilmeler kayma mukavemetinden küçük olduğu sürece hareketli yükler

zeminin konsolide olarak mukavemet kazanmasına neden olacaktır. Bu sonuçta mukavemetin artması ve zeminin yük taşıma kapasitesinin artması demektir.

Deneyisel çalışmada ayrıca anizotropik konsolidasyonun etkisi de araştırılmıştır. Belirli bir derinlikten alınan numune yanal deformasyon olmayacak biçimde hem eksenel gerilme hem de yanal gerilme arttırılarak konsolide edilmiştir. Ortalama olarak sükûnetteki toprak basıncı katsayısı 0,43 olarak bulunmuştur. Suyu doymun numunede ideal numune alınması esnasında efektif gerilmelerdeki değişim, arazide etkisinde kaldığı deviatör gerilmenin kaldırılması nedeniyledir. Deneyisel çalışmaya göre herhangi bir numune arazide 25,4 kg/cm² düşey efektif gerilme, 10,6 kg/cm² yanal gerilme etkisinde iken numune alıcıdan çıkarıldıktan sonra 8,9 kg/cm² izotropik efektif gerilmeye maruz kalmaktadır. Numune araziye uygun düşey yönde drenaja izin verilmeden kesildiğinde, uygulanan gerilme ile boşluk suyu basıncındaki artımın izotropik olarak konsolide edilen normal konsolide kil numunede oluşan boşluk suyu basıncından oldukça küçük olduğu görülmüştür. İzotropik olarak konsolide edilen numunede c/p değeri 0,57 olarak bulunurken bu deneyden ilgili oran 0,40 olarak bulunmuştur. Bu değerde arazideki zeminin drenajsız mukavemeti ile efektif jeolojik gerilme değeri arasındaki orana uygundur. Çalışmada laboratuarda, arazide numune alınması esnasındaki gerilme değişimleri anizotropik konsolidasyon ile numuneye uygulanabilirse laboratuvar deney sonuçlarının arazideki zeminin değerlerine daha uygun olabileceği açıklanmaktadır.

3. NUMUNE HAZIRLAMA VE SINIFLANDIRMA

Çalışma raporlarında söz edildiği üzere, ince daneli zeminlerin oturma davranışlarının araştırıldığı çalışmada numuneler; ilk olarak etüvde yeterli zaman süresince kurutulup, daha sonra dövülerek danelerine ayrılıp 40 numaralı elekten elenerek, elek altına geçen malzemeden yeterli miktar alınmıştır. Likit limitlerinin yaklaşık iki katı su muhtevasında, havası alınan su ile iyice karıştırılarak laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanmıştır. Numune hazırlamakta kullanılan çamur konsolidasyon aletinin boyutları, çapı $d=19$ cm, yüksekliği $h=81$ cm dir. Numuneler çamur konsolidasyon aletine alınmadan en az üç gün karışım kabında bekletilip, karıştırılarak danelerin tabana çökmesine izin verilmemektedir. Böyle bir işlemde beklenen, homojen ve tamamen suya doymuş karışımın temin edilebilmesidir. Daha sonra çamur konsolidasyon aletine alınıp eksenel gerilme uygulanmasına olanak sağlayan askı ve piston yardımı ile (pistonun ağırlığı 9270 gr, kolun ağırlığı 9600 gr) yaklaşık 125 kPa eksenel basınç ile konsolide edilmişlerdir. Sözü edilen basınç kademesine, olası numune kaybını önlemek amacı ile ortalama beş veya altı kademede ulaşılmaktadır. Yaklaşık olarak en az üç ay eksenel basınç ile konsolide edildikten sonra, bu aletten alınarak, üç boyutlu konsolidasyon ve ödometre deneylerinin yapımında kullanılmışlardır. Çamur konsolidasyon aletinin alt ve üst başlıklarında bulunan geçirimli taşlar, numunenin her iki yönden drenajına olanak sağlamaktadır. Çamur konsolidasyon aletindeki konsolidasyon süreleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Numunelerin Çamur Konsolidasyon Aletinde Konsolidasyon Süreleri.

Numune N	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
Süre (ay)	3.0	3.6	3.2	3.0	7.0	6.0	12.0	5.5	5.0	6.0
Süre (ay)	3.5	5.2	8.0	-	-	-	-	-	-	-

Yukarıda açıklanan işlemten önce, çalışmada kullanılan her numune ile en az beş adet olmak üzere hidrometre deneyi, likit limit, plastik limit ve piknometre deneyleri yapıp, numuneler birleşik zemin sınıflandırma yöntemine göre sınıflandırılmıştır. En az beş adet yapılmasının nedeni, deneysel sonuçların herhangi yanılığa neden olmamasıdır. Bu güne kadar gerek üç boyutlu gerekse ödometre deneyi yapılan numunelerin sınıflandırma özellikleri Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2’de gösterilen değerler deney sonuçlarının ortalaması biçimindedir. Ayrıca su muhtevaları, her deney öncesi belirlenen dört ayrı değer ortalaması ile hem üç boyutlu konsolidasyon hem de ödometre deneyleri öncesi belirlenen su muhtevalarının ortalaması biçiminde Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2 : Numunelerin Sınıflandırma Özellikleri.

Numune No	W _n (%)	γ _s (kN/m ³)	W _L (%)	W _P (%)	I _p (%)	I _L -	I _c -	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	Zemin Grubu
N1	51.8	27.6	71.6	35.3	36.3	0.46	0.55	6.0	75.2	18.8	MH
N2	57.3	27.6	90.5	36.1	54.4	0.39	0.61	11.0	49.0	40.0	CH
N3	19.0	28.1	20.0	15.0	5.0	0.80	0.20	19.5	69.3	11.2	CL-ML
N4	27.2	27.5	31.8	18.3	13.5	0.66	0.34	16.5	72.0	11.5	CL
NÖ4	14.0	27.5	30.0	18.0	12.0	-0.3	1.35	16.5	72.0	11.5	CL
N5	30.2	28.1	36.2	18.3	17.9	0.66	0.34	19.0	71.0	10.0	CL
NÖ5	18.5	28.1	40.0	20.0	20.0	-0.1	1.07	19.0	71.0	10.0	CL
N6	51.8	27.4	71.4	35.3	36.1	0.46	0.54	10.2	77.6	12.2	MH
N7	19.0	28.0	22.0	15.0	7.0	0.81	0.19	4.8	80.2	15.0	CL-ML
N8	34.2	26.7	46.7	22.0	24.7	0.49	0.51	9.3	75.8	14.9	CL
N9	35.8	27.7	54.5	23.0	31.5	0.41	0.59	1.0	74.0	25.0	CH
N10	53.4	27.3	76.7	35.6	41.1	0.43	0.57	12.5	77.5	10.0	MH

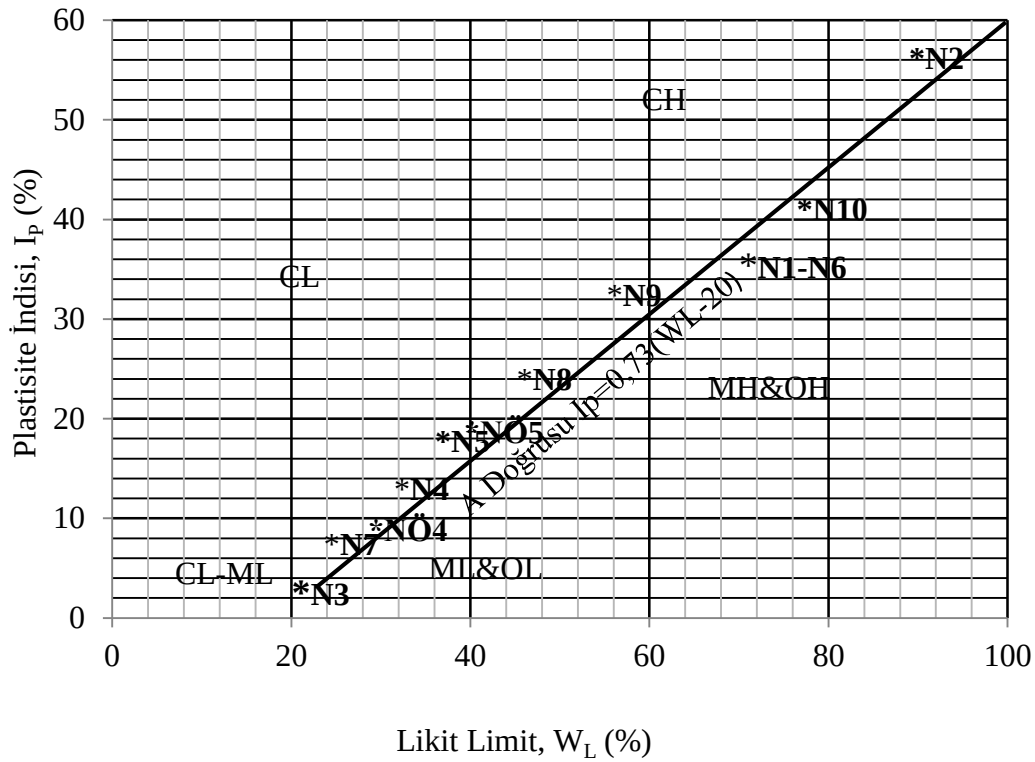
Çizelge 3.2’de, W_n: Su muhtevası, γ_s: Dane birim hacim ağırlığı, W_L: Likit limit, W_P: Plastik limit, I_p: Plastisite indisi, I_L: Likitlik indisi, I_c: Kıvam indisi, NÖ: Örselenmemiş numune.

Çizelge 3.2’den görülebileceği üzere plastisite indisleri farklı 10 numune ile konsolidasyon deneyleri çalışmada yapılmıştır. Kullanılan numunelerin kıvamlarına dair genel fikir verebileceği düşünülerek likitlik indisleri ile kıvam indisleri de Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Bir numaralı numunede deneyler öncesi yapılan kıvam limitleri sayısı 7 adettir. Üç boyutlu deneylerden sonra yapılan deney sayısı 12 adettir. Toplam 19 deney sonucunda aynı değer elde edilmeyip, likit limit değerleri $W_L=71,6\pm7$ plastik limit değerleri $W_p=35,3\pm2$ ve ortalama su muhtevası $W_n=51,8\pm5$ aralığında bulunmaktadır. İki numaralı numunede deneylerden önce 5 adet likit limit, plastik limit deneyleri yapıp, deneylerden sonra 6 adet yapılmıştır. Toplam 11 adet deney sonucunda $W_L=90,5\pm5$, $W_p=36,1\pm2$, $W_n=57,3\pm5$ değerleri bulunmuştur. 3 numaralı numunede ise 15 adet deney den $W_L=20,0\pm1$, $W_p=15,0\pm0$, $W_n=19\pm2$ olarak bulunmuştur. 4 numaralı numunede ise deneyler öncesi 6 adet, deneylerden sonra 6 adet olmak üzere toplam 12 adet deney sonucunda ilgili değerler $W_L=31,8\pm4$, $W_p=18,3\pm2$, $W_n=27,2\pm2$ olarak bulunmuştur. Beş numaralı numunede $W_L=36,2\pm2$, $W_p=18,3\pm1$, $W_n=30,2\pm2$ olarak hesaplanmıştır. Altı numaralı numunede ise deneylerden önce 5 adet deneylerden sonra 8 adet olmak üzere toplam 13 deney sonucunda $W_L=71,4\pm5$, $W_p=35,3\pm2$, $W_n=51,8\pm3$ olarak bulunmuştur. Yedi numaralı numunede konsolidasyon deneyleri öncesi 5 adet, konsolidasyon deneylerinde 7 adet, toplam 12 adet deney sonucundan $W_L=22,0\pm2$, $W_p=15\pm1$, $W_n=19,0\pm3$ olarak belirlenmiştir. Çalışmada bir likit limit deneyi ortalama olarak 7~8 nokta ile, plastik limit ise en az 3 ayrı deney biçiminde yapılmıştır. Sonuçlarda görülen farklılıklara neden olarak, 40 numaralı elek altına geçen malzeme ile deneylerin yapılmış olması düşünülmektedir. Numune 8 ile konsolidasyon deneylerinden önce 5 adet konsolidasyon deneylerinden sonra 6 adet olmak üzere toplam 11 deney sonucundan $W_L=46,7\pm3$, $W_p=22\pm1$ ve $W_n=34,2\pm2$ olarak hata sınırları ile belirlenmiştir. 9 numaralı numunede konsolidasyon deneylerinden önce 5 adet deneylerden sonra 5 adet olmak üzere toplam 10 deney sonucundan $W_L=54,5\pm3$, $W_p=23,0\pm2$ ve $W_n=35,8\pm4$ olarak bulunmuştur. Benzer biçimde numune 10'da ilgili değerler, 10 deney sonucundan $W_L=76,7\pm3$, $W_p=35,6\pm2$ ve $W_n=53,4\pm2$ hata miktarları ile bulunmuştur.

Ayrıca kullanılan numunelerin birleşik zemin sınıflandırma sistemine dair plastisite kartındaki yerleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Şekil 3.1'den görüleceği üzere numuneler A doğrusuna yakın bulunmaktadır. Ayrıca N1 ile N6'nın ortalama sınıflandırma değerleri birbirine oldukça yakındır.

Laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler arazideki gerçek zeminlerden pek çok özellik yönünden farklılık göstermektedir.



Şekil 3.1 : Numunelerin Plastisite Kartında Yerleri.

Arazideki ortam ile karşılaştırıldığında laboratuarda daha küçük eksenel gerilme ile konsolide edilmektedirler. Konsolidasyon gerilmesinin küçük olması dolayısıyla daneler arası bağ kuvvetleri küçüktür. Daneler arası yüzey kuvvetleri ile oluşan zemin dokusu ve buna bağlı olarak oluşan zemin yapısı laboratuarda hazırlanan numunelerde bulunmamaktadır. Numuneler konsolide edildikten hemen sonra deney yapımında kullanılmaktadır. Laboratuarda konsolide edilerek hazırlanan numuneler ile belirlenen zemin özellikleri yalnızca danelerin yapısına bağlıdır. Arazideki zeminin doku ve yapısını temsil etmemektedirler. Doğal zeminlerdeki daneler arası bağ kuvvetleri ve zemin dokusu jeolojik yaşlanma ve zeminlerin oluşumu esnasında oluşmaktadır. Arazide zeminler hem tabakalar durumundadır hem de bölgeden bölgeye farklılık göstermektedirler. Zeminlerin jeolojik yaşları bulunmaktadır. Bu yaşlanma daneler arası bağ kuvvetlerinin artmasına, diğer fiziksel ve kimyasal değişimlere sebep olmaktadır. Sabit gerilme etkisinde deformasyonlar devam edebilir. Yer altı suyunun kimyasal özelliklerinde değişimler olabilir.

Zeminlerin büyük bir çoğunluğu ya havada ya da su içerisinde çökerek oluşmuştur. Zemin tabakalarındaki boşluk oranları karışımın yoğunluğuna, karışım içerisindeki

danelerin çökelme yüksekliğine, çökelme hızına bağımlı olarak değişim göstermektedir. Danelerin çökelme hızı küçük olduğunda zeminin porozitesi büyük olacaktır. Bu durumda daneler arası bağ kuvvetleri yeterli enerji olmadığından zayıf olacaktır. Çökelme hızı büyük olduğunda porozite küçük olacaktır. Bütün bu etkenler arazideki zemin özelliklerinin laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminlerden farklı olacağını göstermektedir.

Deneyisel çalışmada 4 ve 5 numaralı numunelerin örselenmemiş örnekleri bulunmaktadır. Sözü edilen numuneler 7 cm çapında tüp yöntemi ile araziden alınmıştır. Bu örselenmemiş numunelerde 1,3~2,0 m derinlikten alınanlar yeşil renkli, düşük plastisiteli killi zemindir (NÖ5). Aynı bölgeden 3,0~3,4 m derinlikten alınan numuneler kırmızı renkli ortalama su muhtevası $W_n=14\%$ olan düşük plastisiteli killi zemindir (NÖ4). Bu numuneler kullanılarak yapılan deneylerde de diğer deney sonuçları ile karşılaştırılabilirsin diye aynı numune çapı ($d=50$ mm) ve aynı numune yüksekliği ($h=20$ mm) kullanılmıştır.

Örselenmemiş numuneler ile bir boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmış, bulunan deney sonuçları aynı numunelerin laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan örneklerinden bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



4. BİR VE ÜÇ BOYUTLU KONSOLİDASYON

Standart ödometre deneyinde yanal yönde yer değiştirmesi engellenen numuneye eksenel yönde gerilme artımı uygulanmaktadır. Uygulanan gerilmenin numunede oluşturacağı yer değiştirmeler yine aynı yönden kaydedilmektedir. Düşey yönde uygulanan basınç gerilmesi yanal yönlerde de ilave gerilme artımlarına neden olacaktır. Yanal yönlerde oluşacak ilave gerilmelerin yönleri çekme yönündedir. Üç boyut dikkate alındığında ve üst başlık ile numune, ring yüzeyi ile numune arasında pürüzlülük olmadığı kabul edildiğinde bu yönlerde etkiyen gerilmeler asal gerilmeler olup, oluşacak deformasyonlarda asal deformasyonlardır. Ödometre numunesine herhangi bir P_1 ilave gerilmesi uygulandığında bu ilave gerilmeden dolayı yanal yönlerde oluşacak gerilme değerleri KP_1 olup çekme yönünde etkiyecektir (Şekil4.1).

K değeri aktif toprak basıncı katsayısı K_A ile pasif toprak basıncı katsayısı K_P arasında bir değere sahiptir. Dolayısıyla düşey yönde oluşacak toplam deformasyon üç asal gerilmenin bu yönde oluşturacağı deformasyonların toplamı olacaktır. Denklem (4,1) ile gösterildiği biçimde,

$$\left(\frac{P_1}{E}\right) - \left(\frac{2KP_1}{E}\right)v = \left(\frac{P_1}{E}\right)(1 - 2Kv) \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de,

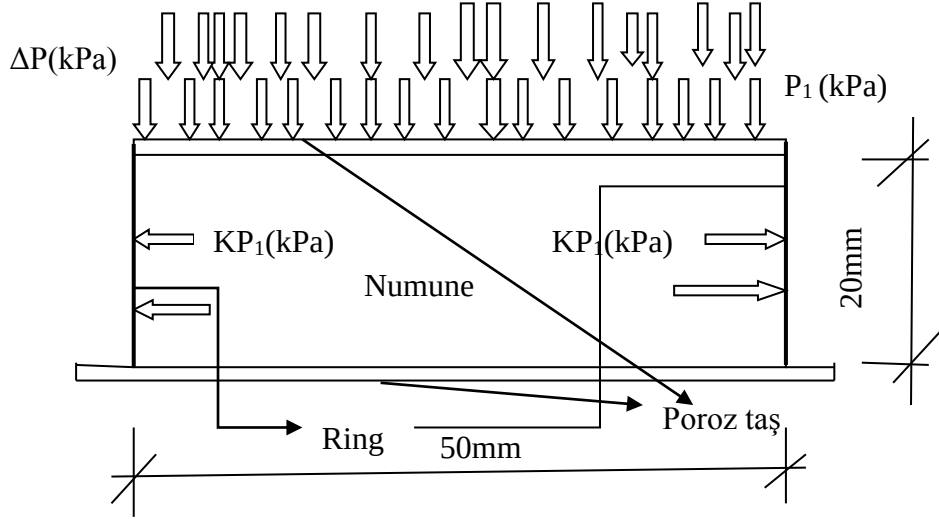
v : Poisson oranı,

P_1 : Düşey yönde etkiyen asal gerilme,

KP_1 : Yanal yönde etkiyen asal gerilme,

E : Elastik sıkışma modülüdür.

Uygulanan gerilme değeri küçük olduğunda oluşacak deformasyonlar geriye dönebilir biçimde elastik olarak olacaktır.



Şekil 4.1 : Bir Boyutlu Konsolidasyon Deneyinde Gerilme Durumu.

Yanal yönde ödometre ringine etkiyen KP_1 gerilmelerinin her biri, etkidiği yönde KP_1/E deformasyonu oluşturacaktır. Ödometre deneyinde bilindiği üzere yanal yönde yer değiştirmeye izin verilmemektedir. Yanal yönde etkiyen KP_1 basıncının her biri için ilgili yöndeki deformasyon denklemi yazıldığında aşağıdaki denklem bulunur.

$$\left(\frac{KP_1}{E}\right) - \left(\frac{KP_1}{E}\right)v - \left(\frac{P_1}{E}\right)v = \quad (4.2)$$

Denklem (4.2) de P_1/E parantezine alındığında, denklem (4.3) bulunur.

$$\left(\frac{P_1}{E}\right) (K - Kv - v) = 0 \quad (4.3)$$

Denklem 4,3 yardımı ile Poisson oranı için denklem 4.4 ile tanımlanan değeri bulunur.

$$v = \frac{K}{(1 + K)} \quad (4.4)$$

Denklem (4.1)'de Poisson oranının değeri yerine konulduğunda deformasyon denklemi (4.5) numaralı şeklini almaktadır.

$$\left(\frac{P_1}{E^*}\right) = \left(\frac{P_1}{E}\right) \left(\frac{1 - 2K^2}{1 + k}\right) \quad (4.5)$$

$$E = E^* \left(1 - \frac{2K^2}{(1 + K)}\right) \quad (4.6)$$

Denklem (4,6) da,

E^* : ödometre deneyinden belirlenen sıkışma modülü,

E: üç boyutlu sıkışma modülüdür.

K'nın değeri rölatif hata miktarına bağlıdır. Bu hata miktarı da yüksek basınç değerlerinde önemli olmaktadır. Konu ile ilgili olarak Tschebotarioff, (1948) tarafından büyük boyutta ödometre deneyleri ince daneli kırmızı kil kullanılarak yapılmıştır. Ödometre ringine tutturulan deformasyon ölçerler ile deney esnasında yanal yöndeki kuvvetler ölçülmüştür. İlgili çalışmada K'nın değeri 0,5 dolaylarında bulunmuştur. K sıfır olduğunda ödometre deneyinden bulunan modül değerinin arazi modül değerine eşit olduğu denklem (4.6)'dan görülebilmektedir.

Çalışmada üç boyutlu konsolidasyon deneyleri, Prof. Dr. Hüseyin Yıldırım tarafından tasarlanan üç boyutlu konsolidasyon deney aleti kullanılarak yapılmıştır. Deney aleti hakkında detaylı bilgi Yıldırım ve Sezen (2010), Baydoğan (2007) Adıyaman (2005), ilgili yayınlarda bulunmaktadır. Deney sistemi Şekil 4.2'de görüldüğü üzere konsolidasyon hücresi, yükleme sistemi ve ölçme-veri toplama birimi olmak üzere üç birimden oluşmaktadır. Konsolidasyon hücresi ödometre deneyinde kullanılabenzer olarak kaidenin üzerine oturtulmuştur. Dairesel kesite sahip, saydam ve 126 mm yüksekliğindedir. Deneyler esnasında ödometre deneylerine benzer biçimde, içerisi su ile doldurularak, numunenin laboratuvar koşullarından etkilenmesi önlenmektedir. 120 mm çapındaki numune 20, 30,40, 50, 60 mm yüksekliklerde olmak üzere beş farklı yükseklikte hazırlanabilmektedir. Bunun için uygun ringler bulunmaktadır. Hazırlanan numunenin orta bölgesi Şekil 4,3'ten görüldüğü üzere istenen yüksekliğe uygun olarak 20, 30, 40, 50, 60 mm çapındaki alanlarda üst başlıklarda bulunan pistonlar yardımıyla, ilave olarak yüklenebilmektedir. Yüklenen bölgenin etrafında şekil değiştirmeyi engelleyen ring olmadığından yanal yönde de şekil değiştirmeye izin verilmektedir. Dolayısıyla üç boyutlu konsolidasyon deneyi olarak isimlendirilmektedir.

Bu çalışmada önceden söz edildiği üzere, bütün deneylerde numune yüksekliği 20 mm ve merkez bölge çapı olarak 50 mm kullanılmıştır.



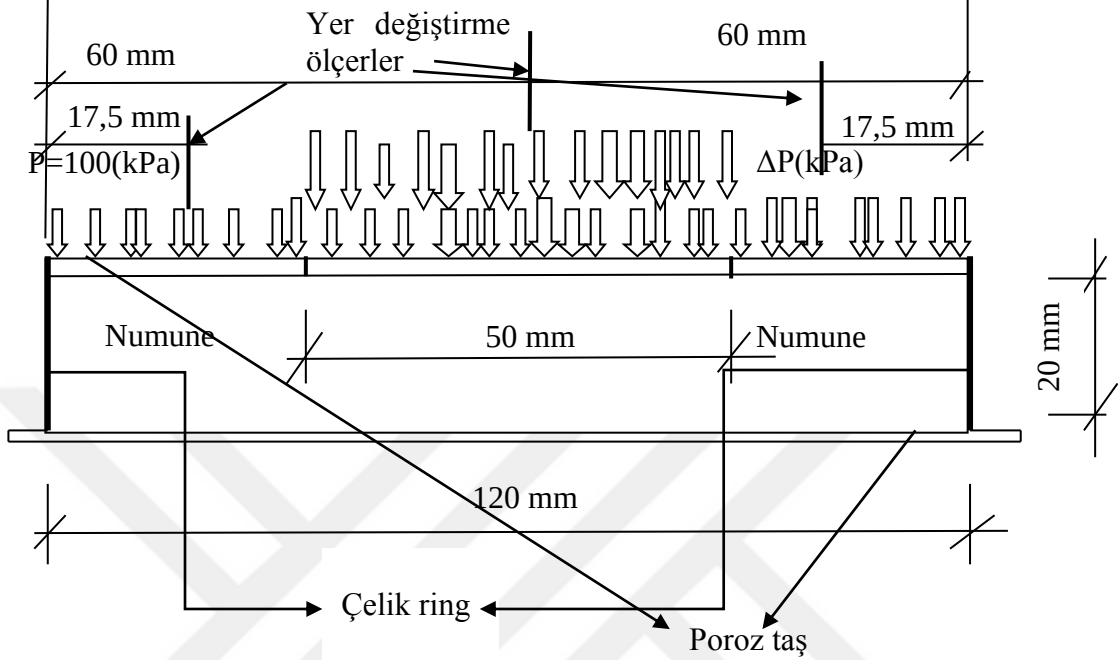
Şekil 4.2 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deney Aleti.

Üç boyutlu konsolidasyon deney aleti iki moment kolu yardımı ile numuneye eksenel gerilme uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Deney başlangıcında hem çevre bölgeye hem de merkez bölgeye ilk olarak aynı anda 100 kPa eksenel basınç uygulanmaktadır. Moment kollarından biri merkez bölgeye piston yardımı ile ilgili gerilme uygulanmasına izin verirken diğeri çevre bölgeye gerilme uygulamasında kullanılmaktadır. Numune ilk olarak 100 kPa basınç etkisinde 24 saat konsolide edildikten sonra merkez bölgeye standart gerilme artımı uygulanmıştır. Deney sonuçlarını karşılaştırabilmek amacı ile aynı gerilme artımları bir boyutlu deneylerde de kullanılmıştır. Standart zaman aralıklarında oturma miktarları hem çevre bölgede hem de merkez bölgede kaydedilmektedir. Üç boyutlu deney sisteminde uygulanan gerilme durumu Şekil 4,4’ de görülebilmektedir.



Şekil 4.3 : Üst Başlıklar ile 20, 30, 40, 50, 60 mm çapında Pistonlar.

Şekil 4.4'den görüldüğü üzere 50 mm çapındaki bölgenin etrafında 100 kPa eksenel gerilme etkisinde bulunan numune bulunmaktadır. Yine aynı şekilden görüldüğü üzere 120 mm çapındaki üç boyutlu konsolidasyon numunesinin etrafında yanal yönde şekil değiştirmeyi engelleyen çelik ring bulunmaktadır.



Şekil 4.4 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Eksenel Gerilme Durumu.

Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde uygulanan gerilme durumunun arazideki koşulları daha iyi yansıttığına inanılmaktadır. 20 mm yükseklikteki numunelerin her iki yönden drenaja açık olduğu Şekil 4.1 ve Şekil 4.4 yardımı ile görülmektedir. Deneylerde kullanılan numune yüksekliği arazideki kil tabakası kalınlığı ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür. Yüzde yüz suya doymun olduğu kabul edilen numunelerde ilave boşluk suyunun izleyeceği yol için arazideki durumu daha iyi temsil ettiğini söyleyebilmek uygun değildir.

Bilindiği üzere standart ödometre deneylerinde herhangi eksenel gerilme artımı numuneye uygulandığında standart zaman aralıklarında düşey yer değiştirmeler numune ekseninden ölçülmektedir. Benzer biçimde üç boyutlu konsolidasyon deney aletinde de Şekil 4.4'den görüldüğü üzere ilave gerilme artımı numunenin merkez bölgesine uygulandığında standart zaman aralıklarında yer değiştirme miktarları hem merkez bölge ekseninde hem de çevre bölgenin orta noktalarında simetrik iki noktada alınmaktadır.



5. BİR VE ÜÇ BOYUTLU KONSOLİDASYON DENEYLERİ

Laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin yanı sıra örselenmemiş numuneler ile de bir boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Aynı numune kullanılarak fazla sayıda deney yapılmasının nedeni gerçeğe daha yakın oturma davranışının belirlenebilmesidir. Deneysel çalışmada yapılan bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sayıları Çizelge 5.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deney Sayıları.

Numune Numarası	Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sayısı	Üç Boyutlu Deney Aleti ile Ödometre Deneyi Sayısı	Standart Ödometre Deneyi Sayısı	Örselenmemiş Numune ile Standart Ödometre Deneyi Sayısı
N1	12	-	19	-
N2	6	2	11	-
N3	10	8	22	-
N4	6	6	12	4
N5	10	10	20	8
N6	8	8	16	-
N7	7	7	14	-
N8	6	5	11	-
N9	5	5	10	-
N10	6	6	12	-

Çizelge 5.1’den görülebileceği üzere plastisite indisleri farklı yeniden konsolide edilerek hazırlanan 10 numune ile konu edilen deneyler çalışmada yapılmıştır. Numunelere uygulanan her gerilme 24 saat bekletilerek bu zaman sonundaki oturma miktarları konsolidasyon eğrilerinin çiziminde kullanılmıştır. Bilindiği üzere 24 saat sonunda kaydedilen oturma miktarı ne konsolidasyon oturmasının son değeri ne de

ikincil oturmanın başlangıç değeridir. Yine ödometre deneylerinde olduğu gibi üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde de standart zamanlarda (0,25dk,0,50dk, 1dk, 2dk, 4dk, 8dk, 15dk,30dk,1h,2h,4h,8h,24h) oturma miktarları hem çevre bölgede hem de merkez bölgede okunmaktadır. Çevre bölgede simetrik iki noktada ölçüm yapılmaktadır.

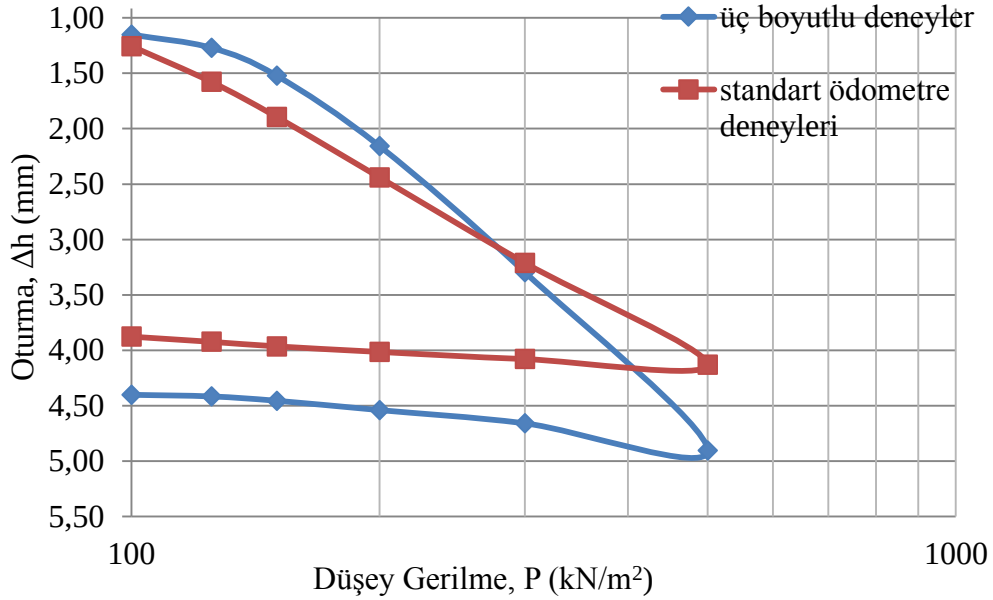
Deney aletlerinin deney sonuçlarını etkileyebileceği dikkate alınarak bir boyutlu deneylerin yapımında üç boyutlu deney aleti de kullanılmıştır. Her numuneye ait oturma eğrileri ilgili numune ile yapılan konsolidasyon deneyi sonuçlarının ortalaması biçiminde grafiklerde gösterilmektedir

Deneyisel çalışma süresi içerisinde, sınıflandırma özellikleri detaylı olarak raporlarda verilen N1 ile 12 adet üç boyutlu konsolidasyon ve 19 adet standart ödometre deneyleri yapılmıştır. Her deneyin oturma eğrisi ayrı biçimde Ek A.1 ve A.2’de görülebilmektedir. N1 çamur konsolidasyon aletinde 2 defa hazırlanarak konsolidasyon deneyleri yapımında kullanılmıştır. Deneylerin ortalaması biçiminde oturma eğrileri Şekil 5.1’de çizilmiştir. Deneyisel sonuçların daha iyi karşılaştırılabilmesi için böyle bir çizim yöntemi tercih edilmiştir. Grafikteki üç boyutlu oturma miktarları merkez bölgesi düşey yer değiştirme miktarlarıdır. Sonuçlardan görüldüğü üzere, üç boyutlu deneylerden belirlenen oturma miktarı yaklaşık 300 kPa basınç değerinden sonraki basınç değerlerinde ödometre deneylerinden belirlenen oturma miktarlarından daha büyüktür. Ancak üç boyutlu oturma eğrisinin eğimi yaklaşık 150 kPa basınç değerinden sonra ödometre oturma eğrisinin eğiminden daha büyüktür. Bu da daha fazla oturma anlamındadır.

Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde daha önceden söz edildiği üzere çevre bölge merkez bölge ile birlikte ilk olarak 100 kPa eksenel gerilme ile konsolide edilmektedir. Daha sonra merkez bölgeye uygulanan standart ilave gerilme artımları esnasında çevre bölgedeki düşey yer değiştirmeler simetrik iki noktadan kaydedilmektedir. N1 ile yapılan üç boyutlu konsolidasyon deneylerinin ortalaması alındığında gözlenen çevre bölge davranışı Şekil 5.2’ de görülebilmektedir.

Şekil 5.2’den görülebileceği üzere merkez bölgeye uygulanan ilave gerilme artımları esnasında çevre bölgede de küçük miktarlarda ilave gerilme artımlarının olduğu tahmin edilmektedir. Bu küçük ilave gerilmeler çevre bölgede küçük miktarlarda oturmalara neden olmaktadır. İlgili sonuç elastisite teorisine dayalı derinlikle ilave gerilme artımlarının dağılımına uyum göstermektedir. Merkez bölgeye uygulanan

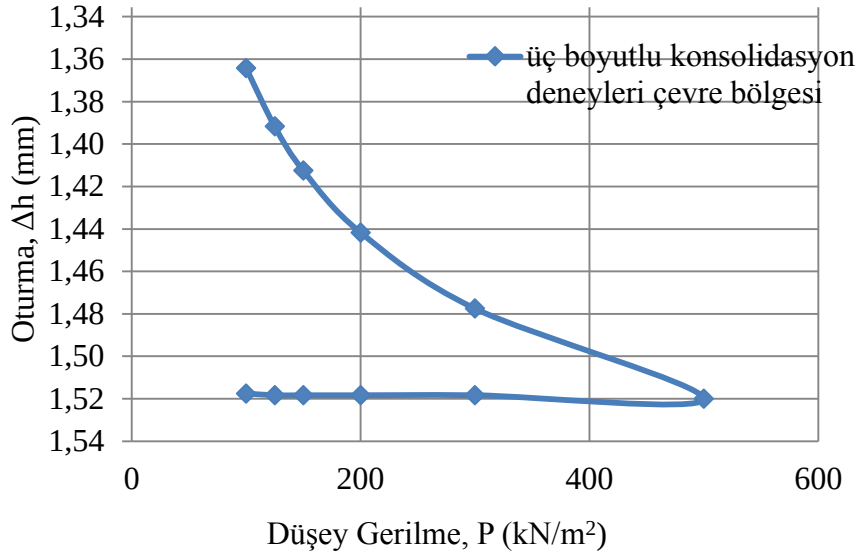
ilave gerilme artımlarının geri alınması aşamasında ise çevre bölgedeki oturma miktarları yaklaşık sabit kalmaktadır. Uygulanan gerilmelerin geri alınması aşamasında da 24 saat sonundaki yer değiştirme miktarları oturma eğrilerinin çiziminde kullanılmıştır.



Şekil 5.1 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N1 (MH).

Yüksek plastisiteli kil olarak isimlendirilen N2 ile 6 adet üç boyutlu konsolidasyon, 11 adet standart ödometre standart deney aletleri kullanılarak, 2 adet ödometre deneyi üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılmıştır. Üç boyutlu deney aleti ile yapılan konsolidasyon deneyi sonuçlarından bulunan oturma miktarlarının her gerilme aşamasında ödometre deneylerinden bulunan oturma miktarlarından daha büyük olduğu Şekil 5.3'den görülebilmektedir. Yine oturma eğrisinin eğimi yaklaşık 200 kPa gerilme değerinden sonraki basınç değerlerinde ödometre oturma eğrilerinin eğimine oranla daha büyüktür. İlgili sonuç da daha fazla oturma miktarı anlamındadır.

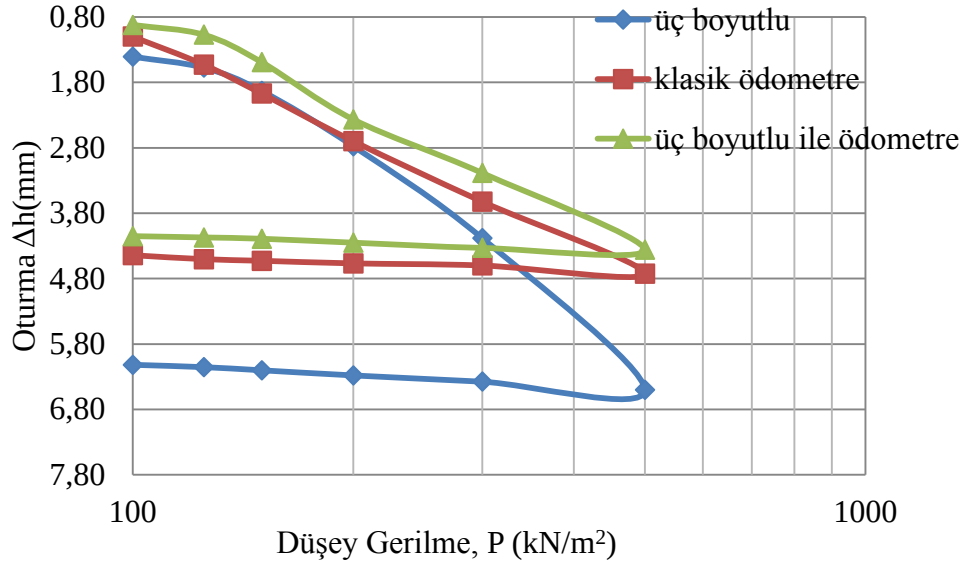
Çalışmada kullanılan numuneler çoğunlukla, laboratuara başka çalışmalar için getirilen malzemelerden temin edilmiştir. Dolayısıyla bazı numunelerin miktarları çok sayıda deney yapmaya yeterli olmamaktadır. Bu durumda ilgili numune tekrar çamur konsolidasyon aletinde hazırlanmaktadır.



Şekil 5.2 : Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N1 (MH).

Çevre bölge eksenel yer değiştirme miktarları N1'den gözlenen sonuçlara benzer biçimde, merkez bölge ilave gerilme artımları esnasında küçük miktarlarda oturmalar görülüp, merkez bölgeye uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması aşamasında değerler genel olarak sabit kalmaktadır. N2'nin çevre bölge deney sonuçları detaylı biçimde tablo olarak çalışma raporlarında verilmiştir. Burada ilgili numune ile yapılan üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarının ortalaması Şekil 5.4'de çizilmiştir. Benzer biçimde N2 ile yapılan bütün konsolidasyon deneylerinin eğrileri Ek A.4, A.5, A.6 ve A.7'de görülebilmektedir.

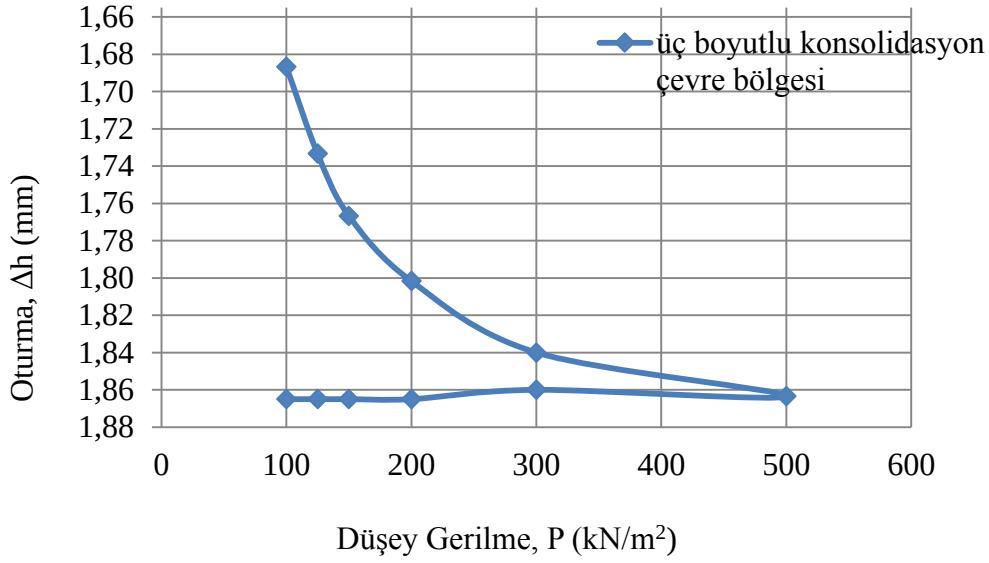
Gerek bir gerekse üç boyutlu deney sistemlerinde numuneler çevre ortamından etkilenmemeleri dolayısıyla su dolu kap içerisinde bulunmaktadır. Dolayısıyla üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde merkez bölgeye uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması aşamasında merkez bölgede küçük miktarlarda kabarmalar görülürken, çevre bölgede 0,01mm miktarlarında kabarma bazı deney sonuçlarında görülebilmektedir. Konu edilen kabarma miktarları numunelerin içerdiği kil miktarına ve kil minerallerinin türüne (kaolin, montmorillonit, vs) bağlıdır.



Şekil 5.3 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N2 (CH).

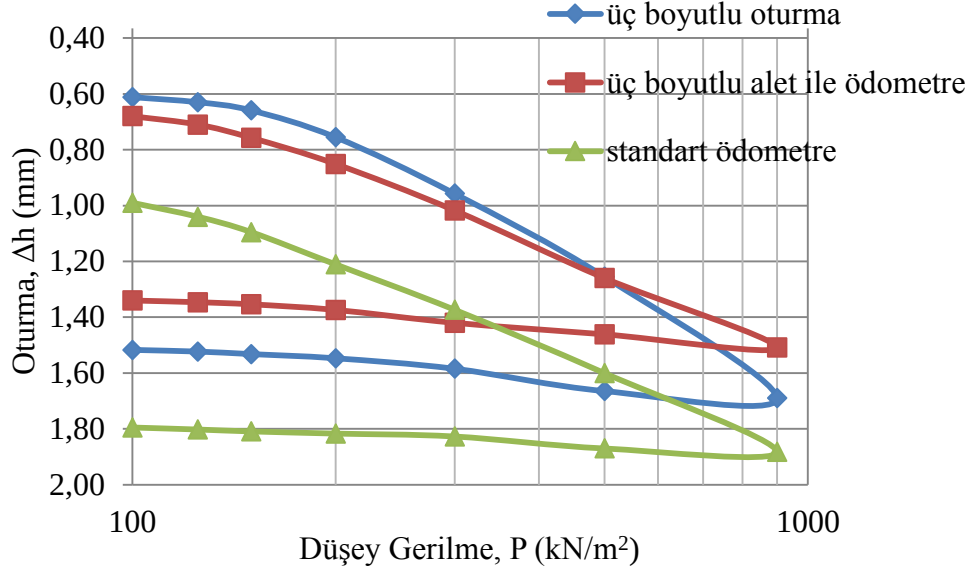
N2 ile üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde çevre bölgeye herhangi gerilme artımı uygulanmadan, yalnızca merkez bölgeye gerilme artımı uygulanarak deney yapımı denenmiş, ancak uygulanan eksenel gerilmelerin belirli bir değerinden sonra merkez bölgede oluşan deformasyonların üniform olmaması ve çevre bölgede bulunan numunenin su alması dolayısıyla deney devam ettirilememiştir. Bu nedenle çalışmada yapılan bütün üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde ilk olarak hem çevre bölgeye hem de merkez bölgeye aynı anda 100 kPa eksenel basınç uygulanmıştır. Numuneler bu basınç değerinde 24 saat konsolide edildikten sonra merkez bölgeye standart gerilme artımı uygulanarak deneyler yapılmıştır. Üç grup deney sonucuna bağlı çizilen oturma eğrilerinin daha iyi değerlendirilebilmesi dolayısıyla yatay eksen logaritma olarak dikkate alınmış ve 100 kPa basınç değerinden başlatılmıştır.

Şekil 5.4'te N2'nin çevre bölge oturma eğrisinde merkez bölgeye uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması esnasında görülen 0,01 mm değerindeki düzensiz davranış çok sayıda deney sonucunun ortalamasının kullanımından kaynaklanmaktadır. Ek A.5'de her deneyin sonucu ayrı biçimde çizilmiştir.



Şekil 5.4 : Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N2(CH).

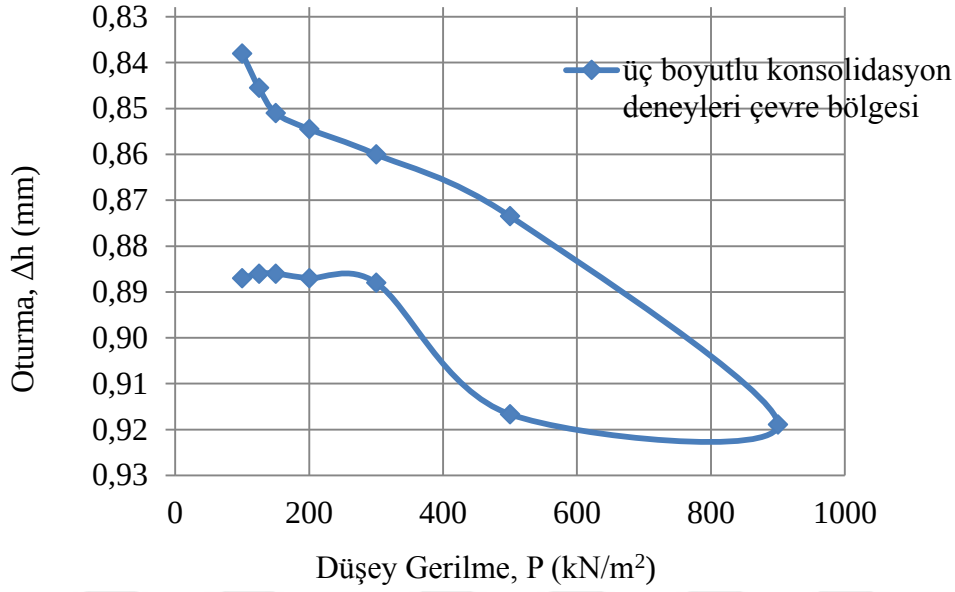
N3 çamur konsolidasyon aletinde iki defa konsolide edilerek hazırlanıp, konsolidasyon deneyleri yapımında kullanılmıştır. Bu numune ile 10 adet üç boyutlu konsolidasyon, 8 adet ödometre üç boyutlu deney aleti kullanılarak, 22 adet ödometre standart deney aletleri kullanılarak yapılmıştır. N3, N1 ve N2'den farklı olarak düşük plastisiteye sahiptir. Bilindiği üzere yüksek plastisiteli killi zeminlerde konsolidasyon oturması, gerilme seviyesine bağımlı olarak büyük miktarlarda oluşmakta ve zamana bağımlı olmaktadır. Düşük plastisiteli CL-ML olarak tanımlanan bu numunede oturma miktarları fazla olmamakla birlikte, oluşan oturmalar daha kısa süre içerisinde tamamlanmaktadır. Diğer yüksek plastisiteli numunelerin oturma davranışı ile N3'ün oturma davranışı karşılaştırıldığında düşük plastisiteye sahip numunelerde oturma miktarları daha küçüktür. Dolayısıyla bu tip numunelerde deneysel çalışmada numunelere 900 kPa konsolidasyon basıncı uygulanmıştır. N3 kullanılarak yapılan konsolidasyon deneylerinin ortalaması biçimindeki oturma grafiği Şekil 5.5'de görülebilmektedir. N3 ile yapılan her deneyin sonucu ayrı biçimde Ek A.8'de görülebilmektedir.



Şekil 5.5 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N3 (CL-ML).

Şekil 5.5'den görüldüğü üzere oturma miktarları diğer numunelerden bulunan sonuçlara benzememektedir. Böyle bir sonuca neden, numune hazırlanması esnasında oluşan örselenmeler ve zeminin düşük plastisiteli olması kabul edilmektedir. Üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan ödometre eğrisi ile standart ödometre eğrisi birbirinin ötelenmesi biçimindedir. Numunenin deney başı su muhtevası likit limit değeri dolaylarında bulunmaktadır. İlk deney grubundan da benzer sonuç gözlenmiştir. Dolayısıyla deneysel sonuçların geçerliliği ile numune, 2 defa çamur konsolidasyon aletinde hazırlanıp deneyler tekrar edilmiştir. İkinci grup deney sonuçlarından da benzer oturma davranışı görülmüştür.

Benzer biçimde üç boyutlu deney sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrisi de standart ödometre deney sonuçlarına bağımlı çizilen eğrinin yaklaşık paraleli biçiminde olsa da 150 kPa basınç değerinden sonra üç boyutlu oturma eğrisinin eğiminin bir boyutlu oturma eğrisi eğiminden daha büyük olduğu ilgili şekilden görülmektedir. Yine aynı grafikte üç boyutlu oturma miktarları, üç boyutlu alet ile yapılan bir boyutlu oturma miktarlarından 500 kPa basınç değerinden sonra daha büyüktür. Ayrıca ilgili grafikte dikkat edildiğinde ön konsolidasyon basıncından sonra üç boyutlu oturma eğrisinin eğimi bir boyutlu oturma eğrisinin eğiminden daha büyüktür. Üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan bir boyutlu deney eğrisi standart aletler kullanılarak yapılan oturma eğrisi ile aynı olmayıp genel şekil olarak benzerdirler. Efektif gerilme seviyesine bağımlı olarak üç boyutlu oturma miktarları bir boyutlu değerlerden daha büyük olacaktır.

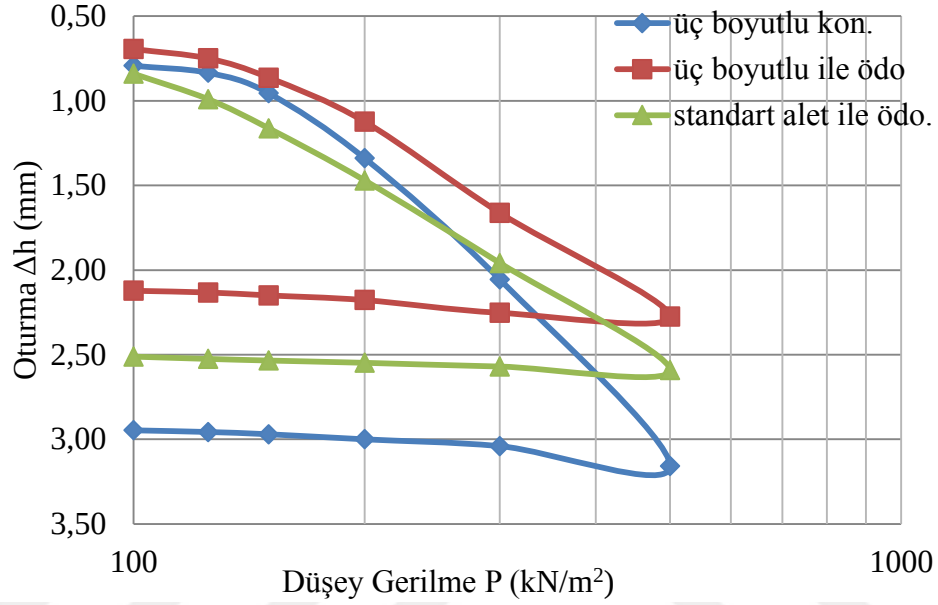


Şekil 5.6 : Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N3(CL-ML).

N3'ün çevre bölge oturma miktarları diğer numunelerden gözlenen deneysel sonuçlara benzer olarak merkez bölgeye uygulanan ilave gerilme artımları esnasında küçük miktarlarda oturmalar görülüp daha sonra merkez bölgeye uygulanan gerilmelerin geri alınması aşamasında bir miktar kabarma görülmektedir. İlgili oturma grafiği Şekil 5.6'da çizilmiştir. Şekilden görüleceği üzere genel olarak diğer numunelerden bulunan deney sonuçlarından gözlenen davranıştan daha düzensiz davranış bulunmuştur. Üç boyutlu konsolidasyon deneyleri çevre bölge oturma eğrilerinden görüldüğü üzere bu eğrilerin çiziminde aritmetik eksenler kullanılmıştır. N3 ile ilgili her deneyin sonucu ayrı biçimde Ek A.8, A.9, A.10 A.11 ve A.12'de görülebilmektedir.

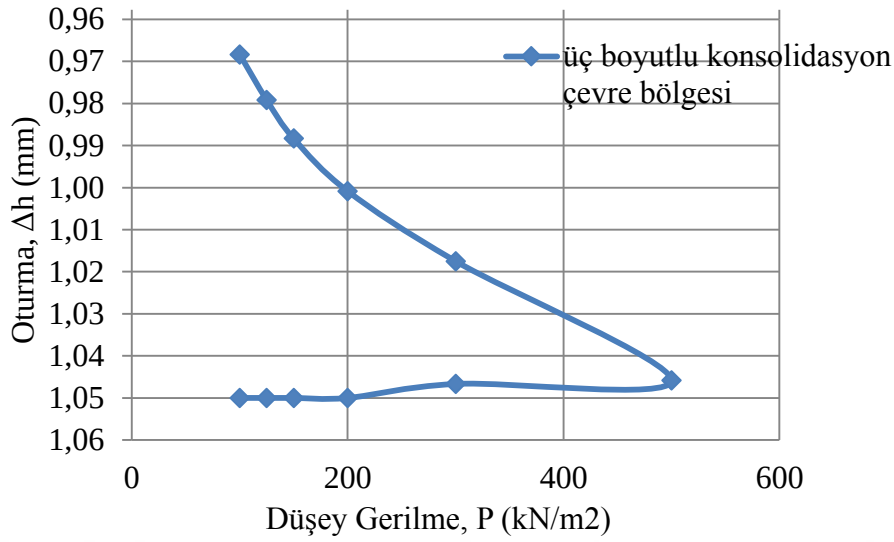
Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre düşük plastisiteli kil olarak tanımlanan N4 (CL) kullanılarak 6 adet üç boyutlu konsolidasyon deneyi, 6 adet ödometre üç boyutlu deney aleti kullanılarak, 12 adet ödometre deneyi standart deney aletleri ile ayrıca 4 adet ödometre deneyi örselenmemiş numune kullanılarak yapılmıştır. N4 ile ilgili deney sonuçları Ek A.12, A.13, A.14 ve A.15'de detaylı biçimde gösterilmiştir. Yapılan deneylerin ortalaması biçiminde oturma eğrileri Şekil 5.7'de görülebilmektedir. Şekil 5.7'den görülebileceği üzere oturma eğrileri, N1 ve N2 deney sonuçlarına dayalı çizilen grafiklere benzerdir. Üç boyutlu oturma miktarları her gerilme kademesinde üç boyutlu deney aleti ile yapılan ödometre oturma miktarlarından büyük olmasına karşın, aynı deneysel sonuç standart ödometre deney

sonuçları için geçerli değildir. Yine diğer numunelerden gözlenen deney sonuçlarına benzer biçimde, yaklaşık 300 kPa eksenel basınç ve daha büyük eksenel basınç değerleri için üç boyutlu konsolidasyon oturma miktarları ödometre oturma miktarlarından daha büyüktür. Yine üç boyutlu oturma eğrisinin eğimi 150 kPa basınç kademesinden sonra ödometre oturma eğrisi eğimine oranla daha büyüktür. İlgili sonuç ise daha fazla oturma miktarı anlamındadır.



Şekil 5.7 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N4 (CL).

Çevre bölge oturma miktarları diğer numunelerden gözlenen deney sonuçlarına benzer biçimde, merkez bölgeye uygulanan ilave gerilme artımları aşamasında küçük miktarlarda oturmalar görülüp, merkez bölgeye uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması halinde çevre bölge oturma miktarlarının yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir. Deney sonuçları her deneyin ayrı eğrisi biçiminde Ek A.13'te çizilmiştir. Genel olarak ister yüksek plastisiteli ister düşük plastisiteli olsun killi numunelerin oturma davranışları siltli numunelere oranla daha düzenlidir.

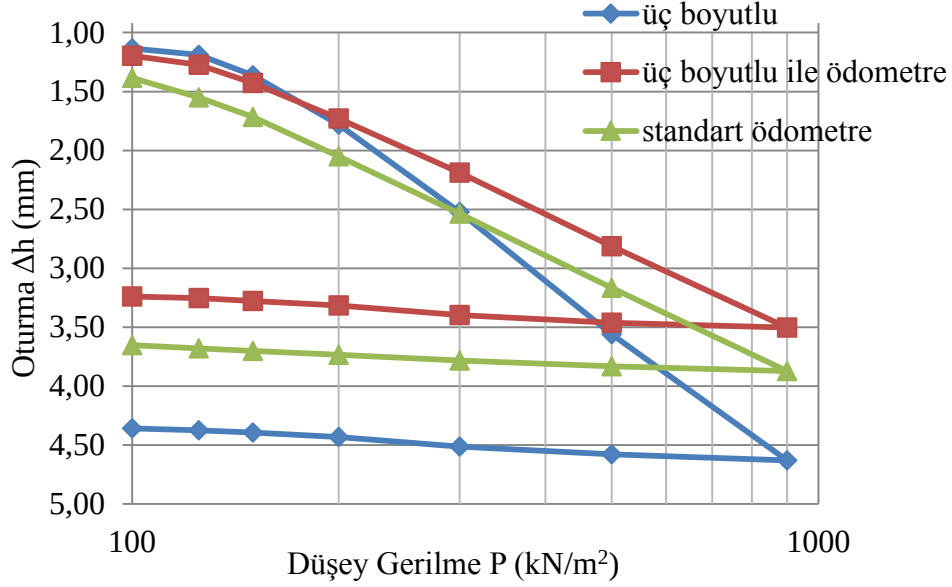


Şekil 5.8 : Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N4 (CL).

N4'e ait örselenmemiş numuneler ve laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin bir boyutlu oturma davranışlarının karşılaştırması takip eden bölümde ayrıca açıklanacaktır. Daha önceden konu edildiği üzere laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerde daneler arası bağ kuvvetlerinin ve benzeri yapısal özelliklerin yeterli oluşmaması nedeniyle dış kuvvetlere bu tip numunelerin göstereceği direnç daha az olacaktır.

Çalışma süresince örselenmemiş örneği bulunan iki numune ile bir boyutlu deneyler yapılmış ve oturma davranışları karşılaştırılmıştır. Numune çapının yeterli olmaması dolayısıyla üç boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılamamıştır.

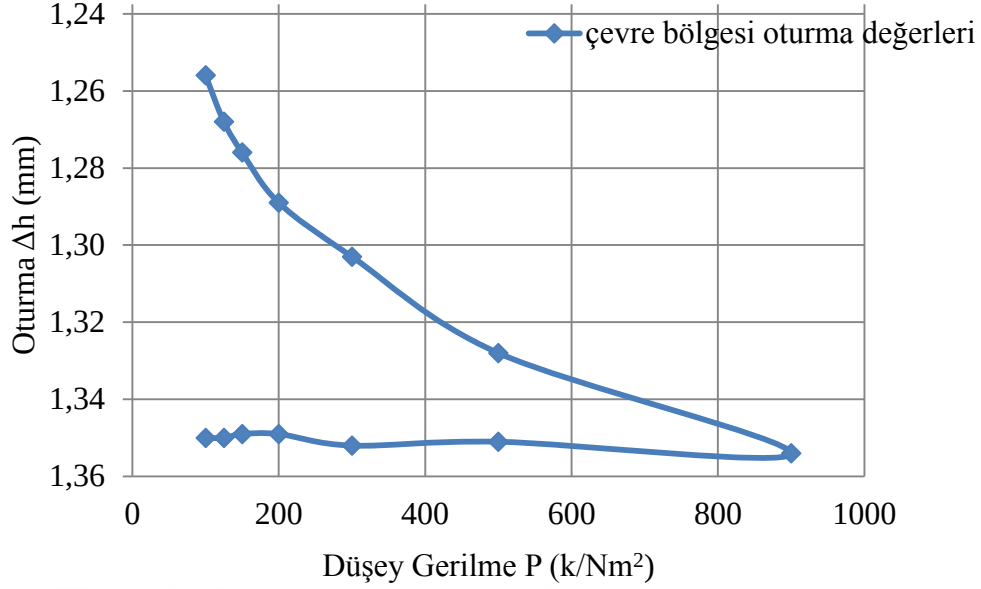
N5 ile yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin yanı sıra, örselenmemiş örnekler kullanılarak ta bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu numune kullanılarak yapılan üç boyutlu konsolidasyon deneyi sayısı 10, üç boyutlu alet kullanılarak yapılan ödometre deneyi sayısı 10 ve standart ödometre deneyi sayısı 20'dir. Örselenmemiş numunelerin çaplarının 7 cm olması nedeni ile bu numunelerle 8 adet standart ödometre deneyi yapılmıştır. İlgili zeminde deney sonuçlarına bağlı çizilen oturma eğrilerinden gözlenen davranış Şekil 5,9'dan görüleceği üzere diğer numunelerden belirlenen sonuçlara benzerdir. Üç boyutlu oturma eğrilerinde 300 kPa ve daha büyük basınç değerlerinde ödometre oturma eğrilerine oranla daha büyük oturma miktarları görülmesine rağmen grafiklerin eğimi 150 kPa basınç değerinden sonra ödometre eğrisindeki eğimden daha büyüktür.



Şekil 5.9: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N5 (CL).

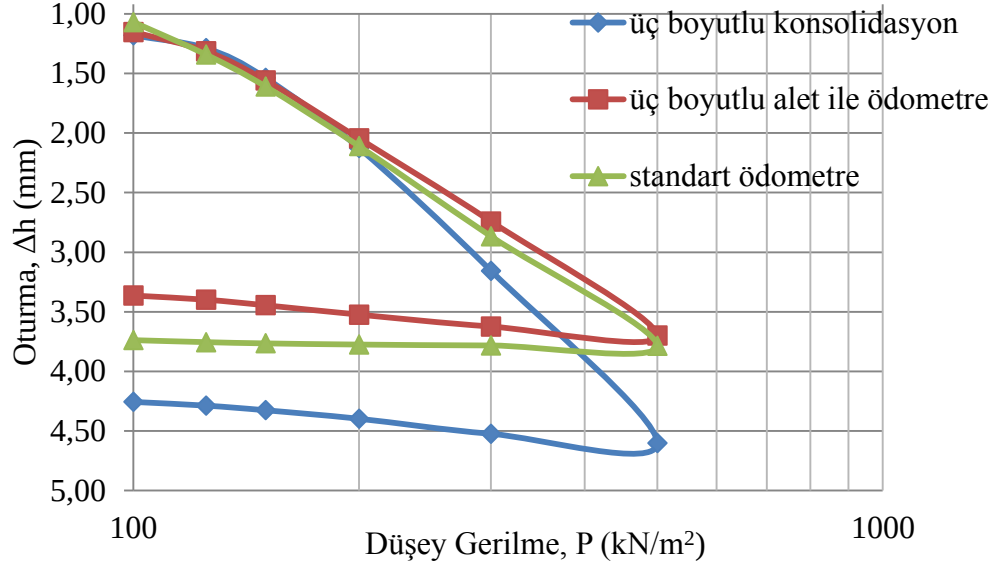
Genel olarak bütün numunelerde gözlenen böyle bir davranışa, deney başlangıcında uygulanan 100 kPa eksenel gerilme değerinde numunelerde gözlenen oturmaların neden olabileceğine inanılmaktadır. Şekillerden görüldüğü üzere üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan ödometre deney sonuçları da standart deney aleti kullanılarak yapılan deney sonuçları ile aynı değildir. Şekilleri genel olarak benzer olmakla birlikte eğriler yaklaşık birbirlerinin ötelenmesi biçimindedirler.

N5 ile ilgili oturma eğrilerinden görüldüğü üzere düşük plastisiteli bu numunenin deney sonuçlarından da diğer numunelerden gözlenen deney sonuçlarına benzer davranış gözlenmiştir. Çevre oturma davranışı, merkez bölgeye uygulanan gerilme artımları esnasında küçük miktarlarda oturmalar görülürken, merkez bölgeye uygulanan gerilmelerin geri alınması halinde gözlenen oturma miktarları genel olarak sabit kalmaktadır. Bu numuneye ait, üç boyutlu, üç boyutlu alet ile ödometre ve standart ödometre deney sonuçlarının ortalaması biçiminde oturma grafiği Şekil 5.9'da görülebilmektedir. Şekil 5.10'da ise çevre oturma miktarları yine ilgili numune ile yapılan bütün deney sonuçlarının ortalaması alınarak çizilmiştir. Her deney sonucunun ayrı biçimde oturma eğrisi sırasıyla Ek.A.17, A.18, A.19 ve A.20'de görülebilmektedir.



Şekil 5.10 : Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N5 (CL).

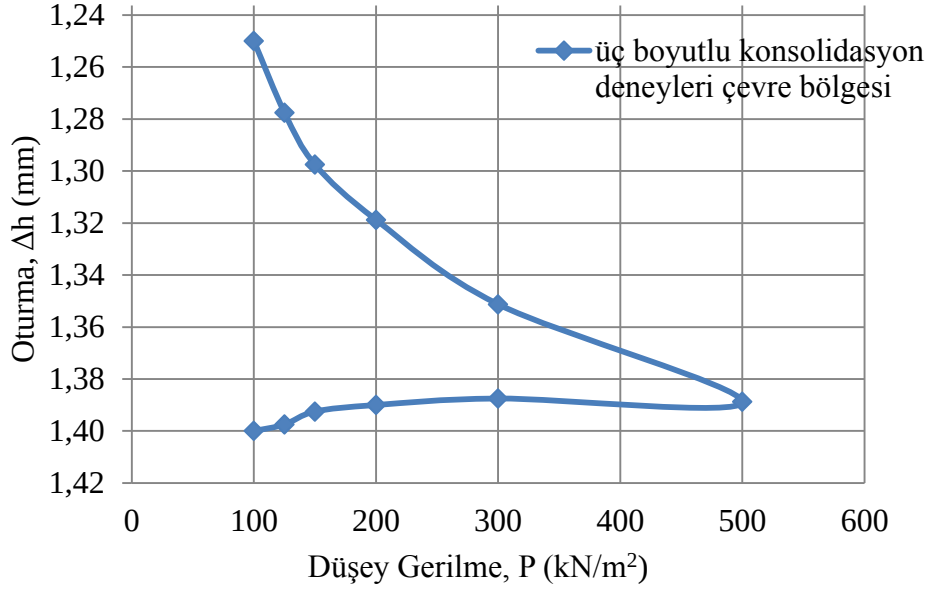
Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli silt olarak tanımlanan N6 (MH) ile 8 adet üç boyutlu konsolidasyon deneyi, 8 adet üç boyutlu deney aleti kullanılarak ödometre deneyi ve 16 adet standart ödometre deneyi standart aletler ile yapılmıştır. Zemin sınıflandırma deneylerinin ortalaması, N1'in ilgili değerlerine oldukça yakındır. Üç boyutlu ve ödometre deneylerinin ortalaması biçiminde oturma eğrileri Şekil 5.11'de görülebilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere bu numune ile ödometre deneyi ve üç boyutlu alet kullanılarak yapılan ödometre deneyi sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrileri yaklaşık olarak aynıdır. Uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması aşamasında ise iki eğri arasında küçük miktarda fark bulunmaktadır. Yine üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarının ortalaması kullanılarak çizilen oturma eğrisi yaklaşık 200 kPa gerilme seviyesine kadar, ödometre deneyi sonuçlarına dayalı çizilen oturma eğrileri ile aynıdır. Bu değerden sonra oturma miktarları ödometre oturma miktarlarından daha büyüktür. Oturma eğrisinin eğimi yine bu basınç kademesinden sonra daha büyüktür. İlgili sonuçsa daha büyük oturma miktarları anlamındadır.



Şekil 5.11: Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N6 (MH).

N6'nın çevre bölge oturma davranışı deneysel çalışmada yapılan diğer deney sonuçlarına benzer davranış göstermektedir. Ancak merkez bölgeye uygulanan gerilmelerin geri alınması aşamasında, değerler sabit kalmayıp küçük miktarlarda da olsa oturmanın olduğu Şekil 5.12'de görülmektedir. Son iki değerde 0.01 mm oturma miktarının görülmesi çok sayıda deneyin ortalamasına bağlanmaktadır. Her deney sonucunun ayrı biçimdeki çizimi Ek A.22, A.23, A.24 ve A.25'de görülmektedir.

Genel olarak merkez bölgeye uygulanan ilave gerilme artımları esnasında çevre bölgede gözlenen küçük miktarlardaki oturmalar, zemin tabakaları herhangi yapı ile dairesel biçimde üniform gerilme ile yüklendiğinde, zemin içerisinde eksenel ve yatay yönlerde, temel tabanına ilave edilen bu gerilmenden dolayı oluşan gerilme artımı dağılımlarına uyum göstermektedir. Zemin yüzeyine (temel tabanına) ilave edilen üniform gerilmenden dolayı zemin içerisinde oluşacak ilave gerilmeler yüklü alanın boyutlarından daha büyük alanları etkileyecektir. Ancak zemin içerisinde üç boyutta (x,y,z eksenlerinde) belirli bir mesafeden sonra etkileri sıfır olacaktır. Bu açıklamaya bağlı olarak deneylerden gözlenen sonuçlar elastisite teorisine dayalı zemin içerisinde gerilme dağılımları ile uyumludur. Deneysel çalışmada da çevre bölge yer değiştirme miktarları çevre bölge orta noktasından kaydedilmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 5.12: Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N6 (MH).

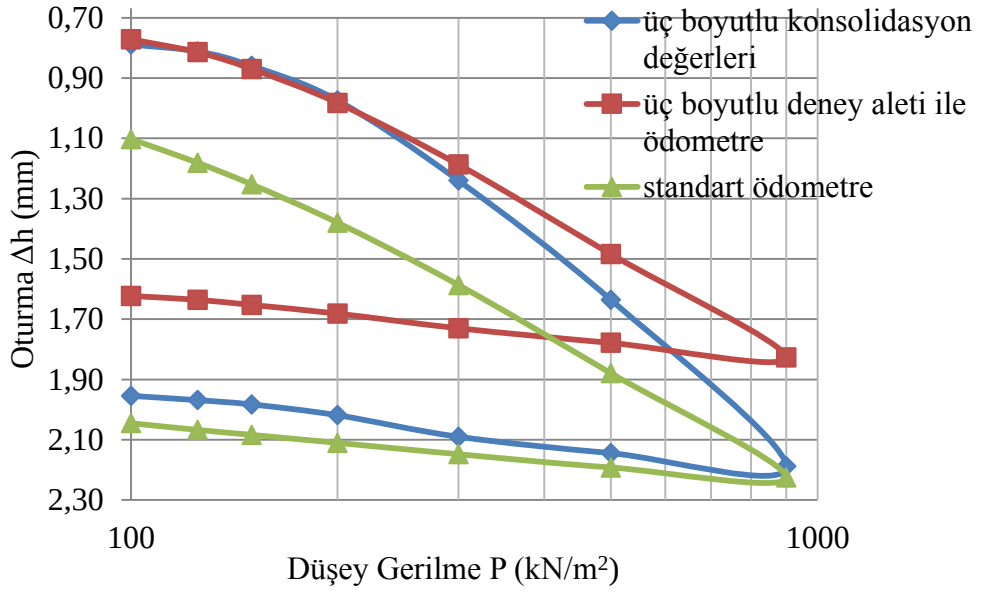
Üç boyutlu deney sisteminde de merkez bölgeye uygulanan gerilme artımları esnasında çevre bölgede de küçük miktarlarda ilave gerilmelerin olduğu tahmin edilmektedir. Bu ilave gerilme artımları bu bölgede küçük miktarlarda oturmalarla neden olmaktadır. Açıklanan davranış bütün deney sonuçlarında görülmektedir. Merkez bölgeye uygulanan gerilmelerin geri alınması aşamasında ise çevre bölge oturma miktarları yaklaşık sabit kalmaktadır. Konu eğrilerde görülen 0,01 mm değerindeki düzensiz davranış çok sayıda deney sonucunun ortalamasının oturma grafiğinin çiziminde kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Düşük plastisiteli kil-silt olan N7 ile (CL-ML) bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyleri çalışmada yapılmıştır. İlave eksenel gerilme uygulanması durumunda olması beklenen oturma miktarlarının küçük olacağı bilinmesine rağmen bu numunenin kullanımı tercih edilmiştir. Böylelikle N3'den gözlenen deney sonuçları ile bu grup deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

N7 ile 7 adet üç boyutlu konsolidasyon, 7 adet ödometre üç boyutlu deney aleti kullanılarak, 14 adet ödometre standart deney aletleri kullanılarak yapılmıştır.

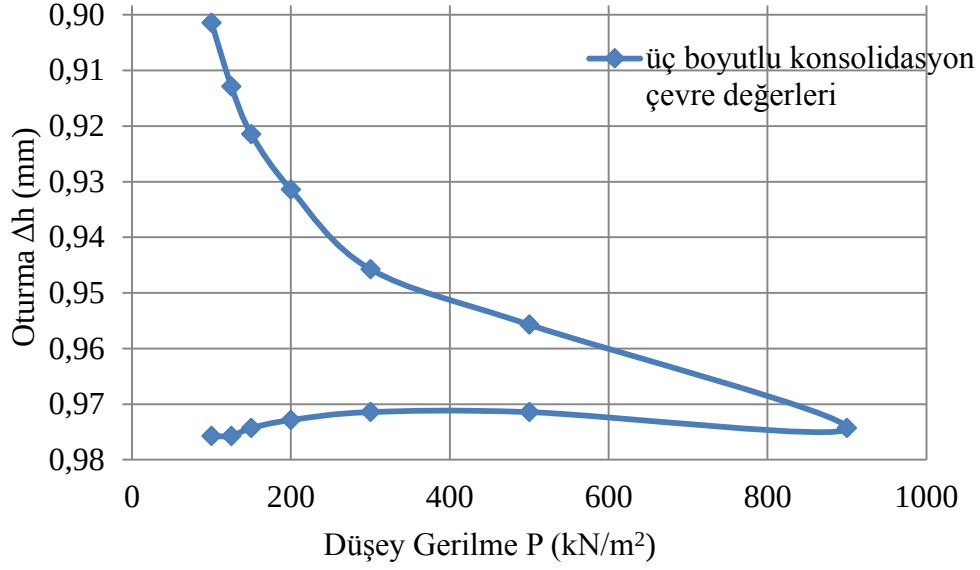
Yapılan konsolidasyon deneylerinin ortalaması alınarak çizilen grafikler sırasıyla Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te görülebilmektedir. Üç boyutlu deney aleti ve standart deney aleti ile yapılan bir boyutlu deney sonuçları genel şekil olarak birbirine benzerdir. İki eğri birbirinin ötelenmesi biçimindedir. N7'nin sınıflandırma özellikleri N3 ile benzer olmakla birlikte konsolidasyon davranışları farklılık

göstermektedir. Üç boyutlu konsolidasyon grafiğinin eğimi 200 kPa basınç değerinden sonra standart ödometre oturma grafiğinin eğiminden daha büyüktür. İlgili değer N3'te 500 kPa'dır. Üç boyutlu konsolidasyon grafiğinden gözlenen oturma miktarları 200 kPa basınç değerinden sonra bir boyutlu grafikten bulunan değerlerinden daha büyüktür. N3'te sözü edilen değer 500 kPa basınç değeridir. Üç boyutlu deney aleti ile yapılan deneylerden üç boyutlu ve bir boyutlu oturma miktarlarının yine 200 kPa basınç değerine kadar aynı olduğu ilgili grafikten görülmektedir.



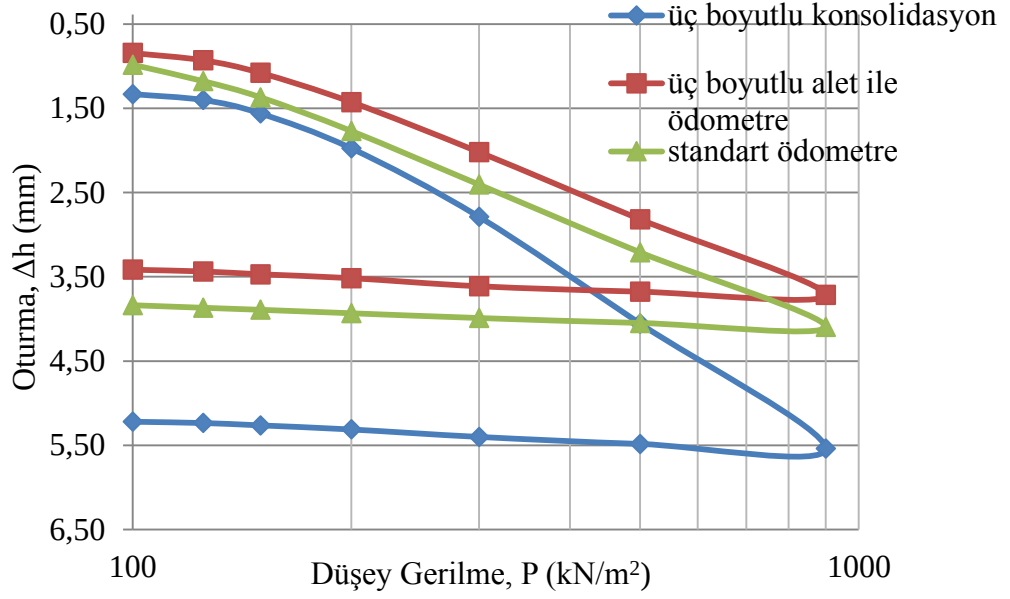
Şekil 5.13 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N7 (CL-ML).

Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde N7'de çevre bölgede gözlenen oturma davranışı genel olarak diğer numunelerde görülen davranış ile uyumludur. Merkez bölgeye uygulanan ilave gerilme artımları esnasında küçük miktarlarda oturmalar görülüp, gerilmelerin geri alınması halinde küçük miktarda kabarma görülmektedir. N3 ile birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre aynı grupta bulunmasına rağmen çevre bölgesi oturma miktarları daha düzenli davranış göstermektedir. N7 kullanılarak yapılan konsolidasyon deneylerinin sonuçları ayrı biçimde Ek A.26, A.27, A.28 ve A.29'da gösterilmiştir.



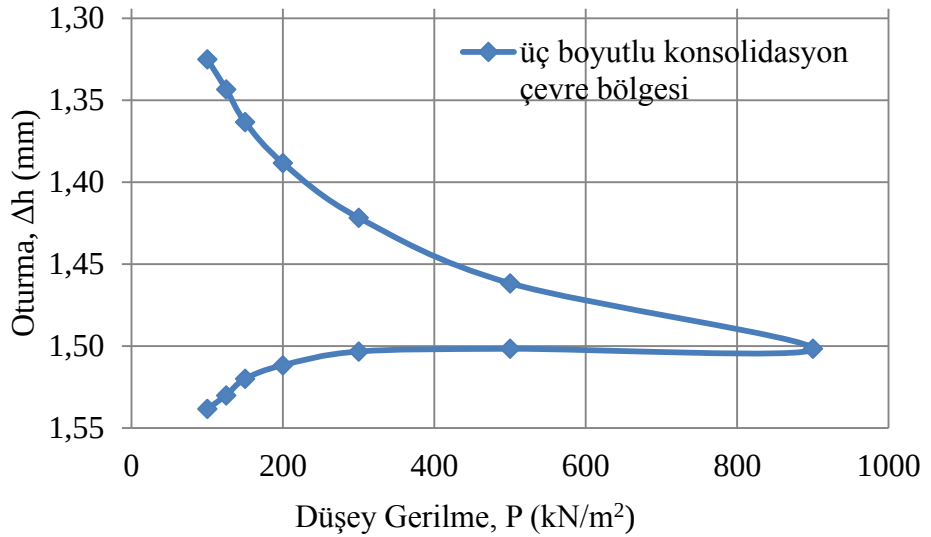
Şekil 5.14 : Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N7(CL-ML).

Düşük plastisiteli kil olarak isimlendirilen N8 ile yapılan konsolidasyon deneyi sonuçlarına dayalı çizilen oturma grafiği Şekil 5.15'te görülmektedir. Zeminlerin oturma davranışları bilindiği üzere deney başı su muhtevalarına da bağlıdır. Çamur konsolidasyon aletinde yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerde 40 numaralı elek altına geçen malzeme kullanılması dolayısıyla derecelenme görülmektedir. Dolayısıyla bu numuneden gözlenen oturma davranışı diğer numunelerden bulunan deney sonuçlarından bir miktar farklıdır. Üç boyutlu deney aleti ve standart deney aleti kullanılarak yapılan bir boyutlu oturma davranışı bir birinin ötelenmesi biçimindedir. Ancak şekilden görüldüğü üzere üç boyutlu merkez bölge oturma miktarları her basınç kademesinde bir boyutlu oturma miktarlarından daha büyüktür. Her deney sonucunun ayrı biçimdeki oturma eğrileri Ek A.30, A.31, A.32 ve A.33'de görülebilmektedir. Sözü edilen sonuç üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan 6 deneyin ortalaması alındığında bulunmuştur. Üç boyutlu deney sonuçlarında 5 ve daha az sayıda deneyin sonucu dikkate alındığında görülen sonuç diğer numunelerden gözlenen sonuç ile aynıdır. Yine 200 kPa basınç değerinden sonra üç boyutlu oturma miktarları bir boyutlu oturma miktarlarından daha büyüktür. Yine bu basınç değerinden sonra üç boyutlu oturma eğrisinin eğimi bir boyutlu oturma eğrisinin eğiminden daha büyüktür.



Şekil 5.15 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N8 (CL).

Bu numune ile yapılan üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında da çevre bölge oturma miktarları diğer numunelerden bulunan sonuçlara uyum göstermektedir. Benzer biçimde merkez bölgeye uygulanan ilave gerilme artımları esnasında çevre bölgede oturmalar görülüp, merkez bölgeye uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması esnasında oturma miktarlarının genel olarak yaklaşık sabit kaldığı Şekil 5,16'da görülmektedir.

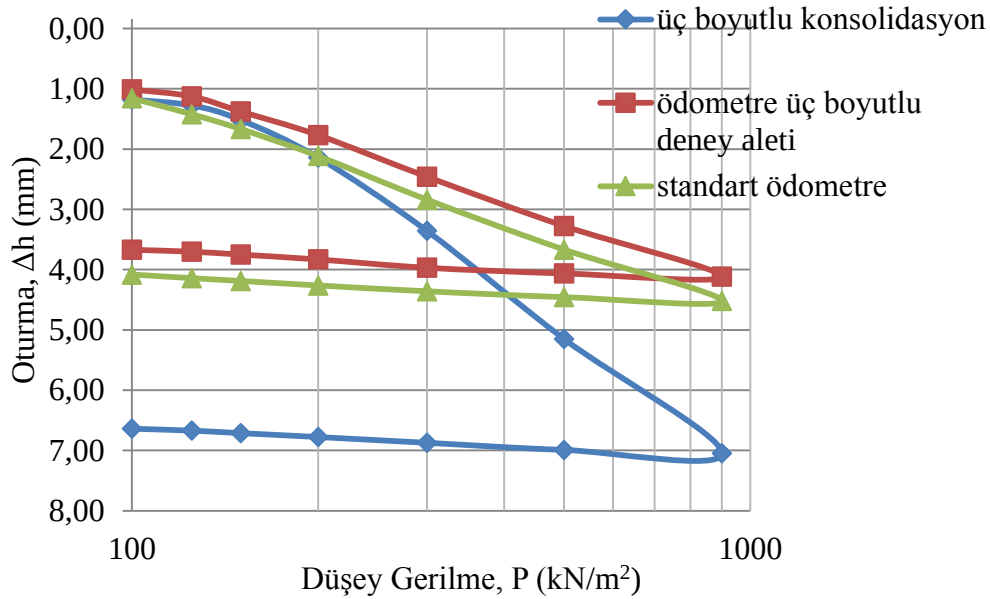


Şekil 5.16 : Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N8 (CL).

Her deney sonucunun ayrı biçimdeki oturma eğrisi Ek A.31'de görülebilmektedir. Şekil 5.16'da da görüldüğü üzere merkez bölgeye uygulanan gerilmelerin geri alınması aşamasında çevre bölgedeki oturmalar 200 kPa aksenal gerilme değerine

kadar yaklaşık sabit kalmaktadır. 200~100 kPa arasında ise 0.02 mm dolaylarında ilave oturmalar görülmektedir. Birçok numunenin deney sonucunda görülen bu davranışın nedeni, eksenel gerilmelerdeki azalma dolayısıyla numunenin çevre bölgesinin su muhtevası artmakta ve etkisinde kaldığı gerilmelere direnç gösteremeyip, küçük miktarlarda oturmaların görülmesi biçiminde açıklanabilir.

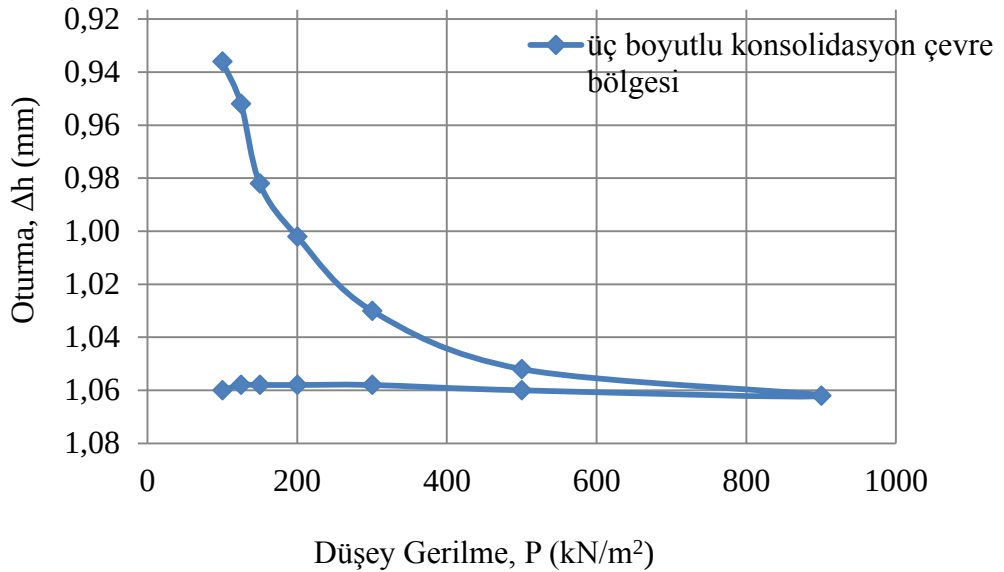
Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli kil olarak isimlendirilen N9 ile 5 adet üç boyutlu konsolidasyon, 5 adet üç boyutlu deney aleti kullanılarak bir boyutlu konsolidasyon ve 10 adet standart ödometre deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin ortalaması kullanılarak çizilen oturma eğrileri Şekil 5.17’de görülebilmektedir. Şekil 5.17’den görüldüğü üzere diğer numunelerden gözlenen oturma davranışlarına benzer davranış bulunmuştur. Yaklaşık 200 kPa eksenel basınç değerinden daha büyük basınç değerlerinde üç boyutlu oturma miktarları bir boyutlu oturma miktarlarından daha büyüktür. Eksenel gerilmenin 150 kPa ve daha büyük değerlerinde üç boyutlu oturma eğrisinin eğimi bir boyutlu oturma eğrisinin eğiminden daha büyüktür.



Şekil 5.17 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N9 (CH).

Yine diğer numunelerden gözlenen oturma davranışına benzer biçimde üç boyutlu deney aletinden bulunan bir boyutlu oturma eğrisi, standart ödometre deney aletinden bulunan oturma eğrisinin yaklaşık paraleli biçimindedir. Her iki oturma eğrisi de şekil olarak bir birinin benzeridir. Deney sonuçları, her deney sonucunun ayrı eğrisi biçiminde Ek A.34, A.35, A.36 ve A.37’de gösterilmiştir.

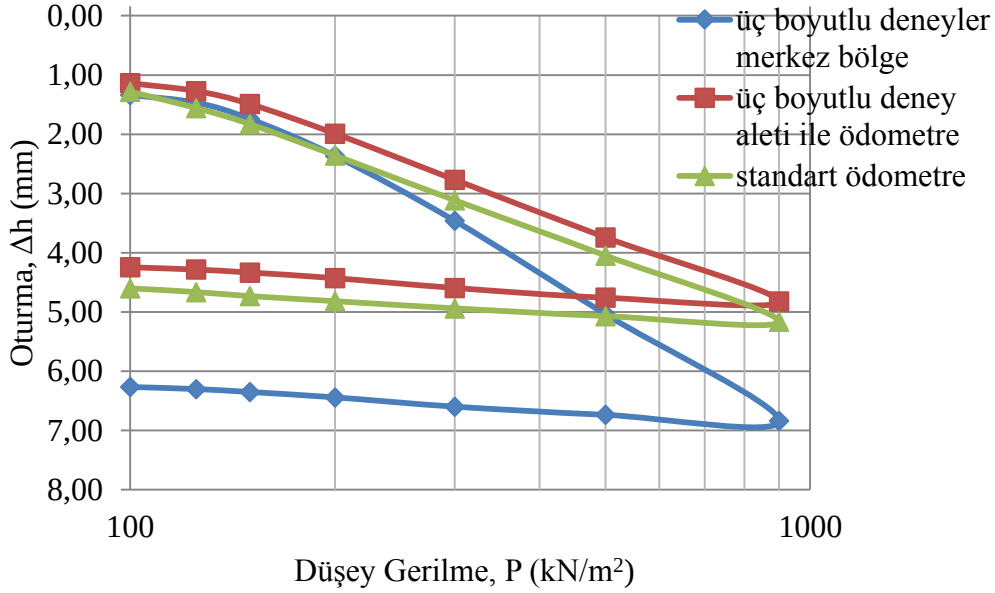
N9'un çevre bölgesi oturma eğrisi Şekil 5.18'den görüldüğü üzere diğer numunelerden gözlenen çevre bölge oturma davranışı ile uyumludur. Merkez bölgeye uygulanan gerilme artımları esnasında çevre bölgede küçük miktarlarda oturmalar görülürken, ilave gerilmelerin geri alınması aşamasında çevre bölgede görülen oturma değerleri yaklaşık olarak sabit kalmaktadır (Şekil 5.18). Ancak bu bölgede şekilden de görüldüğü üzere değerler diğer deney sonuçlarından daha düzenlidir. Merkez bölgeye uygulanan gerilmelerin geri alınması durumunda çevre bölgede bazı deney sonuçlarında 125, 150 kPa basınç değerlerinde görülen 0.01mm değerindeki oturma bu deney sonucunda bulunmamaktadır. İlgili sonuca neden, merkez bölgedeki ilave gerilmeler geri alınırken çevre bölgede de eksenel gerilmelerde azalmaların olduğu biçiminde açıklanabilir. Bu nedenle numunenin alt ve üst yüzeylerinde su muhtevalarının artması sonucu etkisinde kaldığı gerilme dolayısıyla küçük ilave oturmalar görülmektedir. Bütün deney sonuçlarının ayrı biçimde çizimi Ek A.35'de gösterilmiştir.



Şekil 5.18 : Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N9 (CH).

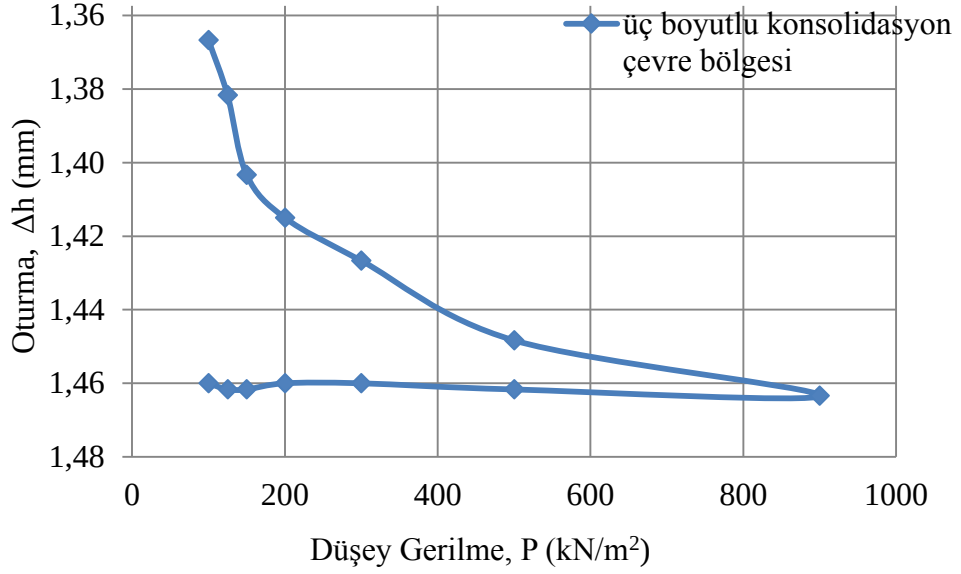
N10 ile yapılan konsolidasyon deneylerinden bulunan sonuçlar Şekil 5.19'da çizilmiştir. Deney sonuçları diğer numunelerden bulunan deney sonuçları ile özellikle N2 ve N9 deney sonuçları ile daha uyumludur. Üç boyutlu oturma miktarları üç boyutlu deney aleti ile yapılan bir boyutlu deney sonuçlarından bulunan oturma miktarlarından her basınç kademesinde daha büyüktür. Standart ödometre deneylerinden bulunan oturma miktarlarından ise 200 kPa gerilme değerinden sonra

daha büyüktür. Yine ödometre deneylerinden bulunan oturma eğrileri yaklaşık birbirlerinin ötelenmesi biçimindedir. Şekil 5.19'dan görüldüğü üzere üç boyutlu oturma eğrisinin eğimi bir boyutlu oturma eğrisinin eğiminden yaklaşık 200 kPa gerilme değerinden sonra daha büyüktür. İlgili sonuçta bu gerilme değerlerinde daha büyük oturma miktarları anlamındadır.



Şekil 5.19 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri, N10 (MH).

N10 ile yapılan üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarından bulunan çevre bölge oturma eğrisi Şekil 5. 20'de görülmektedir. Diğer deney sonuçlarından bulunan sonuçlara benzer biçimde merkez bölgeye uygulanan ilave gerilme artımları esnasında bu bölgede oturmalar görülmektedir. Merkez bölgeye uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması esnasında ise oturmalar yaklaşık sabit kalmaktadır. N10'un üç boyutlu konsolidasyon deneyi çevre bölgesi davranışı diğer numune sonuçlarına oranla daha düzenlidir. Her deney sonucunun ayrı biçimdeki oturma eğrisi Ek A.39'da görülebilmektedir. Benzer biçimde N10 ile yapılan diğer konsolidasyon deneylerinin eğrileri Ek. A.38, A.40 ve A.41'de gösterilmiştir.



Şekil 5.20 : Üç Boyutlu Deneylerde Çevre Bölge Oturma Eğrisi, N10 (MH).

Laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan 10 farklı plastisite indisli numuneler kullanılarak çalışmada bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyleri yeterli sayılarda yapılmıştır. Deney sonuçlarından genel olarak killi zeminlerde daha düzenli oturma davranışı görülürken aynı düzenli davranış düşük plastisiteli siltli numunelerde görülmemiştir.

Zeminlerin killi ya da siltli, düşük veya yüksek plastisiteli olmalarına bağımlı olarak 200 kPa ~300 kPa basınç değerlerinden daha büyük basınç değerlerinde üç boyutlu oturma miktarları bir boyutlu oturma miktarlarından daha büyüktür. Benzer biçimde üç boyutlu oturma eğrilerinin eğimleri 150 kPa ~200 kPa gerilme değerlerinden sonra bir boyutlu oturma eğrilerinin eğimlerinden daha büyüktür. Açıklanan bu sonuçlarda eksenel gerilmenin yüksek değerlerinde ödometre deney sonuçları kullanılarak hesaplanan oturma miktarlarının arazideki gerçek oturma miktarlarına uygun olmayacağı anlamındadır.

Killi zeminlerde boşluk oranı ve düşey efektif gerilmenin logaritması arasındaki bağıntı Skempton (1970) çalışmasına göre zorunlu olarak doğrusaldır. Bu deneysel çalışmada da bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında yaklaşık 200 kPa basınç değerinden sonra, üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında 300 kPa basınç değerinden sonra oturma eğrileri yarı logaritmik eksenlerde doğrudur.

Her iki grup deney sonucunda 300-500 kPa gerilme aralığında hacimsel sıkışma sayıları ile sıkışma modülleri hesaplanarak Çizelge 5.2'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.2 : Bir ve Üç Boyutlu Hacimsel Sıkışma Sayıları ile Sıkışma Modülleri.

Zemin No	Bir Boyut mv (m ² /kN) 10 ⁻²	Bir Boyut Mc (kN/m ²) 10 ²	Üç Boyut mv (m ² /kN) 10 ⁻²	Üç Boyut Mc (kN/m ²) 10 ²	Oran Olarak -	Ondalık Olarak -
N1	0.028556	35.02	0.050802	19.68	5/9	0.562
N2	0.035594	28.10	0.079284	12.61	4/9	0.449
N3	0.006143	162.80	0.007896	126.65	7/9	0.778
N4	0.017446	57.32	0.031488	31.76	5/9	0.554
N5	0.018373	54.43	0.030655	32.62	3/5	0.600
N6	0.027545	36.30	0.044860	22.29	3/5	0.614
N7	0.008041	124.37	0.010681	93.62	3/4	0.753
N8	0.023425	42.69	0.038298	26.11	3/5	0.612
N9	0.024786	40.35	0.057298	17.45	3/7	0.432
N10	0.028298	35.34	0.050076	19.97	4/7	0.565

Konu ile ilgili literatürde Tschbotarioff, (1948) tarafından büyük boyutlu ödometre deneyleri ince daneli kırmızı kil kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada ödometre ringine tutturulan deformasyon ölçerler yardımı ile yanal yönde oluşan kuvvetler ölçülmüştür. Büyük eksenel gerilme değerlerinin kullanıldığı çalışmada K değeri 0.50 dolaylarında bulunmuştur.

Boyut etkisinin araştırılması nedeni ile başka bir çalışma Habib ve Puyo (1953) tarafından yapılmıştır. Büyük boyutlara sahip numunelerin kullanıldığı ödometre deneyi sonuçlarından K değerinin 0.50'den daha büyük olduğu görülmüştür.

İsveç Geoteknik Enstitüsünde Kjellman ve Jakobson (1955) tarafından kumlu zemin kullanılarak yapılan büyük boyuttaki ödometre deneylerinden K değeri olarak 0.45 bulunmuştur. İlgili çalışmada aynı zamanda arazideki sıkışma modülünün, ödometre deneyi sonucundan bulunan modülün yaklaşık 73% üne eşit olduğu gösterilmiştir.

Caquot ve Kerisel (1956) yayınına dayalı olarak K için en küçük değer 0.50 olarak dikkate alınmalıdır. İlgili yayına göre arazi sıkışma modülü olarak, ödometre

deneyinden bulunan modülün 2/3'ü arazide eksenel yükleme durumunda deformasyon hesabında kullanılmalıdır. Bu değerde genel olarak en büyük değer olarak alınmalıdır.

Çizelge 5.2'den görüldüğü üzere 10 farklı ince daneli numunenin kullanıldığı deneysel çalışma sonucundan üç boyutlu sıkışma modülünün bir boyutlu sıkışma modülüne oranı 0.50~0.75 arasında bulunup literatürde yapılan çalışmalara uyum göstermektedir. Düşük plastisiteli kil-silt olan numune N3 ve N7 dikkate alınmadığında ilgili oranın daha iyi olduğu kabul edilmektedir.

Çalışmada yapılan üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarından ayrıca, çevre bölgede, merkez bölgeye uygulanan ilave gerilme artımları esnasında küçük miktarlarda oturmalar görülmüştür. Merkez bölgeye uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması aşamasında ise çevre bölgedeki oturmaların yaklaşık sabit kaldığı gözlenmiştir. Gözlenen sonuç zemin yüzeyine eksenel gerilme uygulanması halinde derinlikle düşey ve yatay yönlerde gerilme dağılımları ile uyumludur.

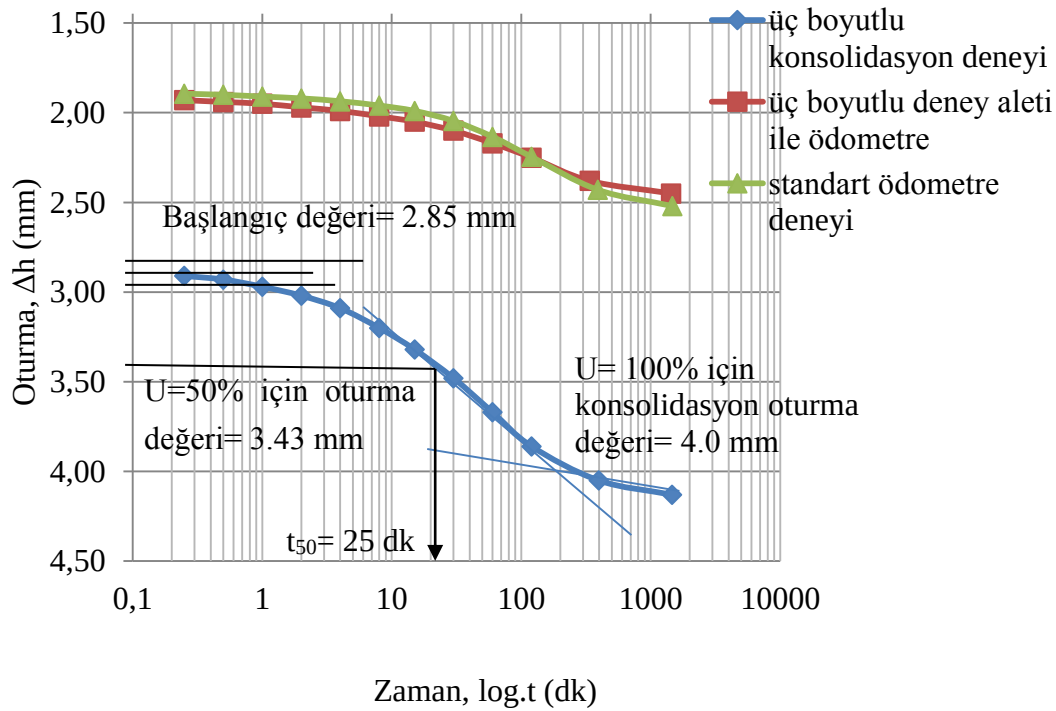
Ödometre deneylerinde bilindiği üzere numuneye eksenel gerilme artımları uygulanmaktadır. Dolayısıyla düşey yer değiştirmeler zaman ile üniform dağılım göstermeyip, azalmaktadır. Gerilme artımının uygulandığı anda yer değiştirme miktarı büyük olup geçen zaman ile azalıp, yatay doğruya yönelmektedir. Deneysel çalışmada üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde de gerilme artım yöntemi kullanılmıştır.

Ödometre deneyinde ayrıca ring yüzeyi ile numune arasındaki sürtünme kuvvetleri dolayısıyla da uygulanan gerilme dağılımı üniform değildir. Buna bağlı olarak ta yer değiştirmeler üniform değildir. Dolayısıyla deney yapımında büyük boyuttaki numune çapının kullanımı önerilmektedir. Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde de 120 mm çapındaki numunenin etrafında ring bulunmaktadır.

Ödometre deneyinde her hangi gerilme artımı numuneye uygulandığında zaman ile yer değiştirmelerin ne kadarının tamamlandığı konusu ile ilgili konsolidasyon katsayısı ile konsolidasyon yüzdesi bilgi vermektedir. Konsolidasyon katsayısının bulunmasında en yaygın kullanılan yöntemler bilindiği üzere zamanın logaritması ile zamanın kare-kökünün alındığı (Casagrande, Taylor, 1948) yöntemlerdir. Bilindiği üzere Casagrande yönteminde her hangi eksenel gerilme artımı numuneye uygulandığında oturma miktarlarına karşın zamanın logaritması çizilmektedir. Bu

yöntemde teorik eğriye oturma grafiğinin yaklaşık doğru olduğu orta bölge uyum göstermektedir. Taylor yönteminde ise deneysel eğrinin başlangıç bölümü teorik eğriye uyum göstermektedir. Dolayısıyla konsolidasyon katsayısının hesaplanmasında deneysel eğrilerin teorik eğriye uygun olan bölümleri kullanılmaktadır.

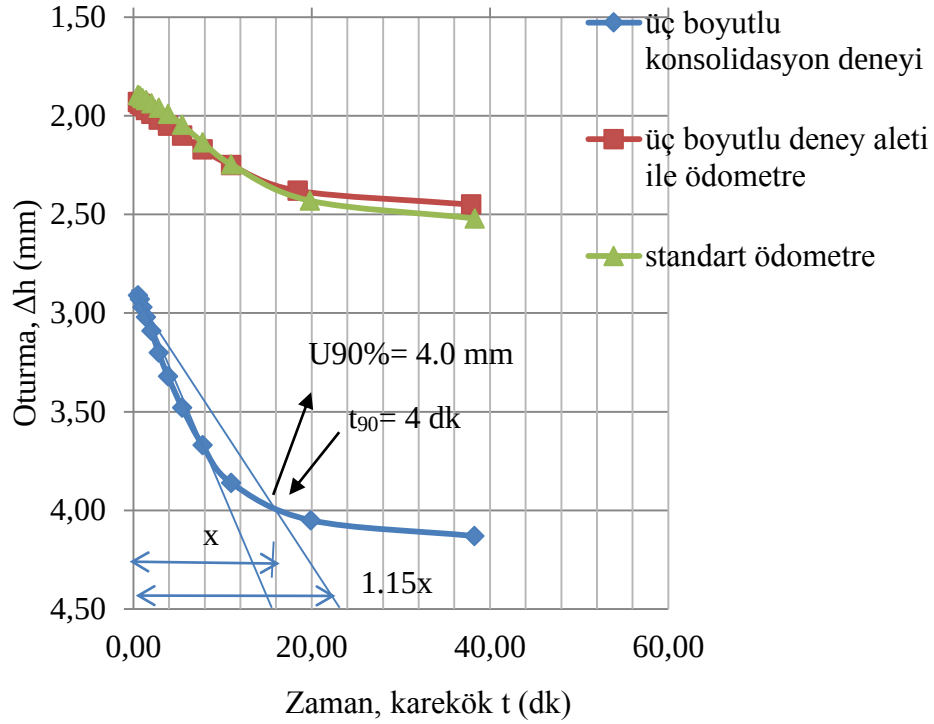
Çalışmada 200~300 kPa gerilme artımları numunelere uygulandığında, zaman ile oturma miktarlarının nasıl değiştiğinin görülebilmesi amacı ile N9'un deney sonuçlarında zamanın hem logaritması hem de kareköküne karşın oturma miktarları çizilmiştir (Şekil 5.21, Şekil 5.22). Şekil 5.21 ve şekil 5.22'den görüldüğü üzere üç boyutlu oturma miktarları bir boyutlu oturma miktarlarından bu eksenel gerilme değerinde daha fazladır. Ayrıca hem üç boyutlu deney aleti hem de standart deney aleti kullanılarak yapılan bir boyutlu deney sonuçlarından yaklaşık aynı oturma miktarları gözlenmiştir.



Şekil 5.21 : Logaritma Zaman Yöntemi, N9, 200~300 kPa.

Şekil 5.21'de üç boyutlu oturma grafiğinin teorik kabullere uygun olmamasına rağmen logaritma-zaman yöntemine dayalı değerlendirmesi daha net görülmektedir. Parabol olan başlangıç bölümü, teorik eğriye uygun olan orta bölüm lineer ve eğrinin dönmesinden sonraki ikincil oturmaların bulunduğu bölüm olmak üzere ilgili grafikte

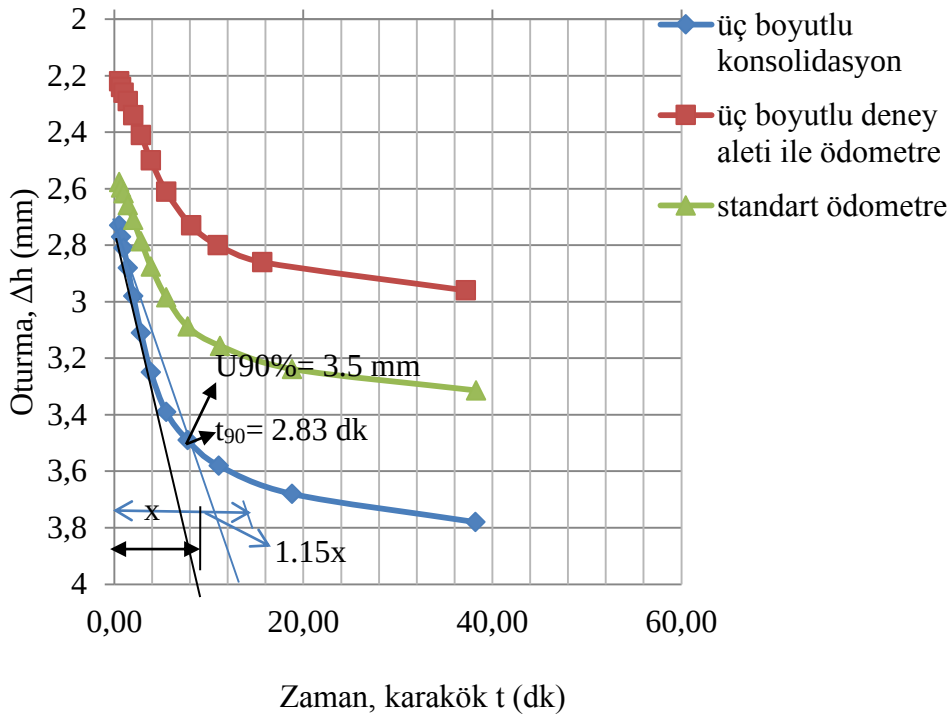
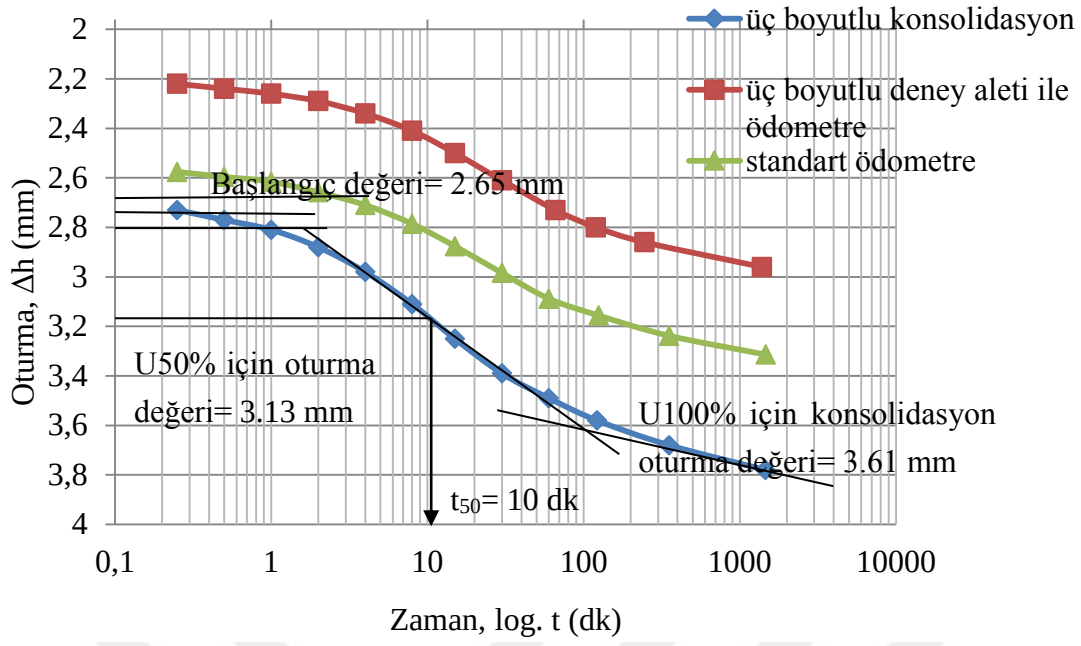
görülebilmektedir. Konsolidasyon katsayısı bilindiği üzere U50% için bulunan zaman değerinden hesaplanmaktadır.



Şekil 5.22 : Karekök Zaman Yöntemi, N9, 200~300kPa.

Karekök yönteminde ise oturma grafiğinin başlangıç U60% bölümü doğrudur. Doğru uzatılarak zaman eksenini kestiği değerin 1.15 katı alınıp ikinci doğru çizilir. İkinci doğrunun oturma eğrisini kestiği noktadan U90% a karşılık gelen oturma ve zaman değerleri yardımı ile konsolidasyon katsayısı hesaplanmaktadır.

Standart zaman aralıklarında oturma miktarlarının nasıl değişim gösterdiğinin görülebilmesi amacı ile 200~300 kPa gerilme değerinde N10 deney sonuçları da logaritma zaman ve karekök zaman yöntemlerine göre Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'de çizilmiştir. Benzer biçimde ilgili oturma ve zaman değerleri grafiklerde gösterilmiştir.



6. ÖRSELENMEMİŞ VE YENİDEN KONSOLİDE EDİLEREK HAZIRLANAN NUMUNELERİN OTURMA DAVRANIŞLARI

Bilindiği üzere çalışmada çoğunlukla laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler kullanılarak bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler; arazideki zeminlerden oluşumları gereği yapı ve daneler arası bağ kuvvetleri, danelerin şekli, boyutu, yüzey alanları, mineral yapıları açısından buzullarla oluşanlar, yağmur, rüzgâr vb nedenlerle taşınarak, ayrışma sonucu yerinde oluşanlar olmak üzere farklılık göstermektedirler. Yer altı suyunun kimyasal özellikleri, bulunup bulunmadığı, akım halinde mi yoksa sabit mi olduğu ve yaşlanma gibi nedenler zeminlerin oluşumlarında etkilidir. Arazi ile karşılaştırıldığında laboratuarda daha küçük eksenel basınç etkisinde konsolide edilmektedirler. Konsolide edildikten hemen sonra deney yapımında kullanılırlar. Yaşlanma etkisi ile oluşan daneler arası bağ kuvvetleri ve buna bağımlı oluşan zemin yapı ve dokusu laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerde bulunmamaktadır. Arazide zeminler çoğunlukla tabakalar halindedir.

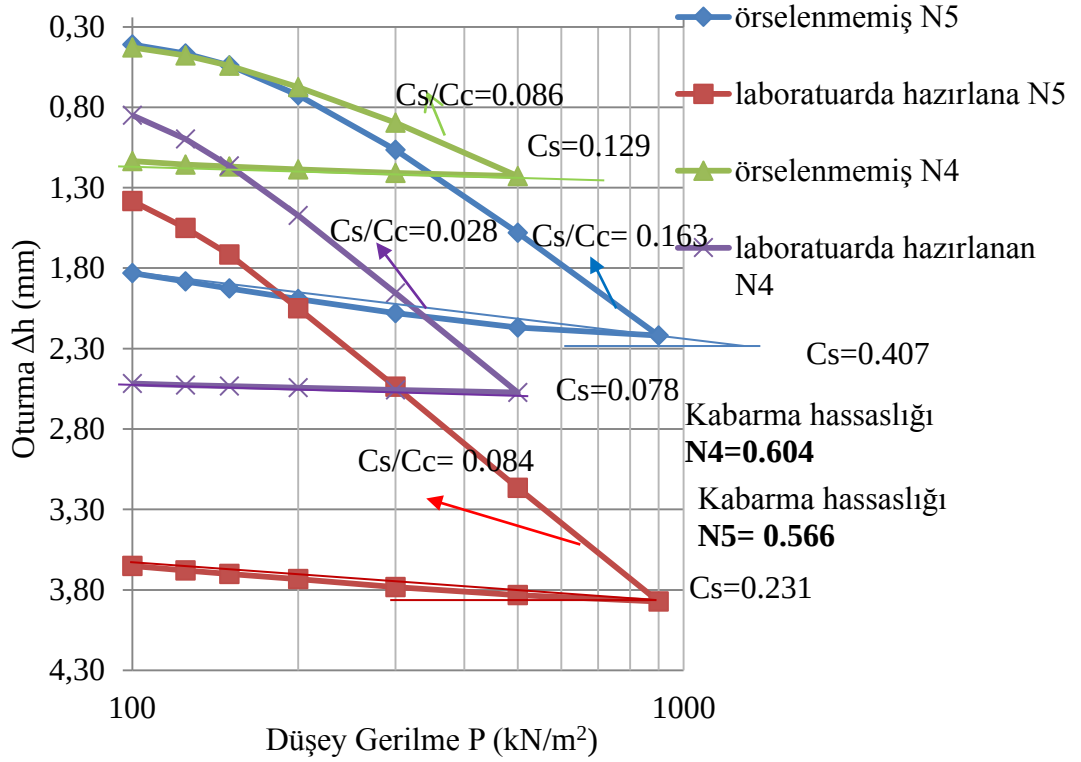
Yukarıda açıklanan etkenlere bağlı kalınarak arazideki zeminlerin davranışları laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminlerin davranışlarından farklı olacaktır. Oturma özellikleri araştırıldığında oturma–logaritma düşey gerilme eksenlerinde, arazideki zeminin oturma eğrisinin yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminin oturma eğrisinin sağ tarafında bulunduğu görülmüştür (Atkinson, 2007; Burland, 1990; Butterfield, 1979; Graham ve Li, 1985).

Buradaki deneysel çalışmada da örselenmemiş örnekleri bulunan N4 ve N5 numuneleri kullanılarak standart ödometre deneyleri yapılmıştır. Numuneler 7 cm çapında ve tüp yöntemi ile araziden alınmıştır. Laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan örnekleri ile yapılan ödometre deneyi sonuçlarının ortalaması ile örselenmemiş numunelerin deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki grup numunenin deney sonucunda da yukarıda açıklanana benzer sonucun bulunduğu

Şekil 6.1’de görülebilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda arazi oturma eğrisinin eğiminin ön konsolidasyon basıncı geçildikten sonra, laboratuarda hazırlanan numunenin oturma eğrisinin eğiminden daha büyük olduğu Graham ve Li (1969) yayını dışında diğer yayınlarda gözlenmiştir. Bu sonuçta arazide daha fazla oturma olacağı ve daha kırılğan yapının bulunduğu anlamındadır. Ancak buradaki deney sonuçlarında örselenmemiş numunelerin sıkışma indisleri yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin sıkışma indislerinden daha küçük bulunmuştur. N4’te örselenmemiş numunenin sıkışma indisi $C_c=1.50$ bulunurken yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunede ilgili değer $C_c=2.79$ olarak daha büyük bulunmuştur. N5’te ise sıkışma indisleri sırasıyla $C_c=2.51$ ve $C_c=2.76$ olarak yeniden hazırlanan numunenin sıkışma indisi örselenmemiş numunenin sıkışma indisinden daha büyüktür. Bu sonuca benzer sonuç Graham ve Li (1985) yayınında görülmektedir. Yukarıda açıklanan diğer yayınlarda eksenel gerilmenin belirli bir değerinden sonra arazi sıkışma indisinin laboratuarda hazırlanan numunenin sıkışma indisinden daha büyük olduğu açıklanmaktadır. Ayrıca konu edilen yayınlarda numunelerin serbest basınç mukavemetleri de karşılaştırılmış ve yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerde daneler arası bağ kuvvetlerinin yeterli büyüklükte oluşmaması nedeni ile serbest basınç mukavemetlerinin örselenmemiş numunelerden bulunan değerlerinden daha küçük olduğu görülmüştür (Atkinson 2007; Burland 1990; Butterfield 1979). Graham ve Li (1985) çalışmasında örselenmemiş numunenin sıkışma indisi $C_c= 0.70$ bulunurken, aynı numunenin yeniden konsolide edilerek hazırlanan örneğinden ilgili değer $C_c= 0.72$ olarak daha büyük bulunmuştur. Aynı çalışmada hacimsel sıkışma modülü örselenmemiş numunelerde de yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerde de aynı değer olarak bulunmuştur. Benzer biçimde Graham ve Li (1985) yayınında yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetleri hem normal konsolide hem de aşırı konsolide durumlarda örselenmemiş numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden daha büyük olarak gözlenmiştir. Yazarlara göre açıklanan sonuçlara neden, arazide yer altı suyunun zemin yüzeyine doğru akım halinde olması ve yer altı suyunun kimyasal bileşiminden kaynaklanabileceğine inanılmaktadır.

Burland (1990) yayınında yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunenin yükleme indisinin örselenmemiş numunenin yükleme indisine oranı kabarma hassaslığı olarak tanımlanmaktadır. Bilindiği üzere herhangi bir zeminin yeniden yükleme indisi ilgili

zeminin gerilme geçmişinden bağımsızdır. Bu çalışmada da ilgili değer her iki numune ile yapılan deney sonuçlarında hesaplanarak Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Kabarma hassaslığının arazideki zeminin bağ kuvvetlerinin ölçümü hakkında önemli bilgi verdiğine inanılmaktadır (Schmertmann, 1969). Çalışmada her iki numune için de kabarma hassaslığı 0.5’den büyük bulunmuştur. Ayrıca C_s/C_c değerleri de her oturma eğrisi için hesaplanarak Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : Örselenmemiş ve Yeniden Konsolide Edilerek Hazırlanan Numunelerin Bir Boyutlu Oturma Davranışları.

Örselenmemiş numune çapının 7 cm olması dolayısıyla üç boyutlu konsolidasyon deneyleri ilgili numuneler kullanılarak yapılamamıştır. Dolayısıyla üç boyutlu oturma davranışları karşılaştırılamamıştır. NÖ4 ve NÖ5 ödometre deneyi sonuçları Ek A.16 ile A.20’de gösterilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda ayrıca yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerde daneler arası bağ kuvvetlerinin yeterli büyüklükte olmaması dolayısıyla mukavemet zarflarının da örselenmemiş numunelerin kırılma zarflarının içerisinde bulundukları gösterilmiştir.

Bu açıklamalara bağlı kalınarak zemin parametrelerinin laboratuarda, arazideki durumun çok iyi değerlendirilerek belirlenmesi gerektiği söylenebilir.



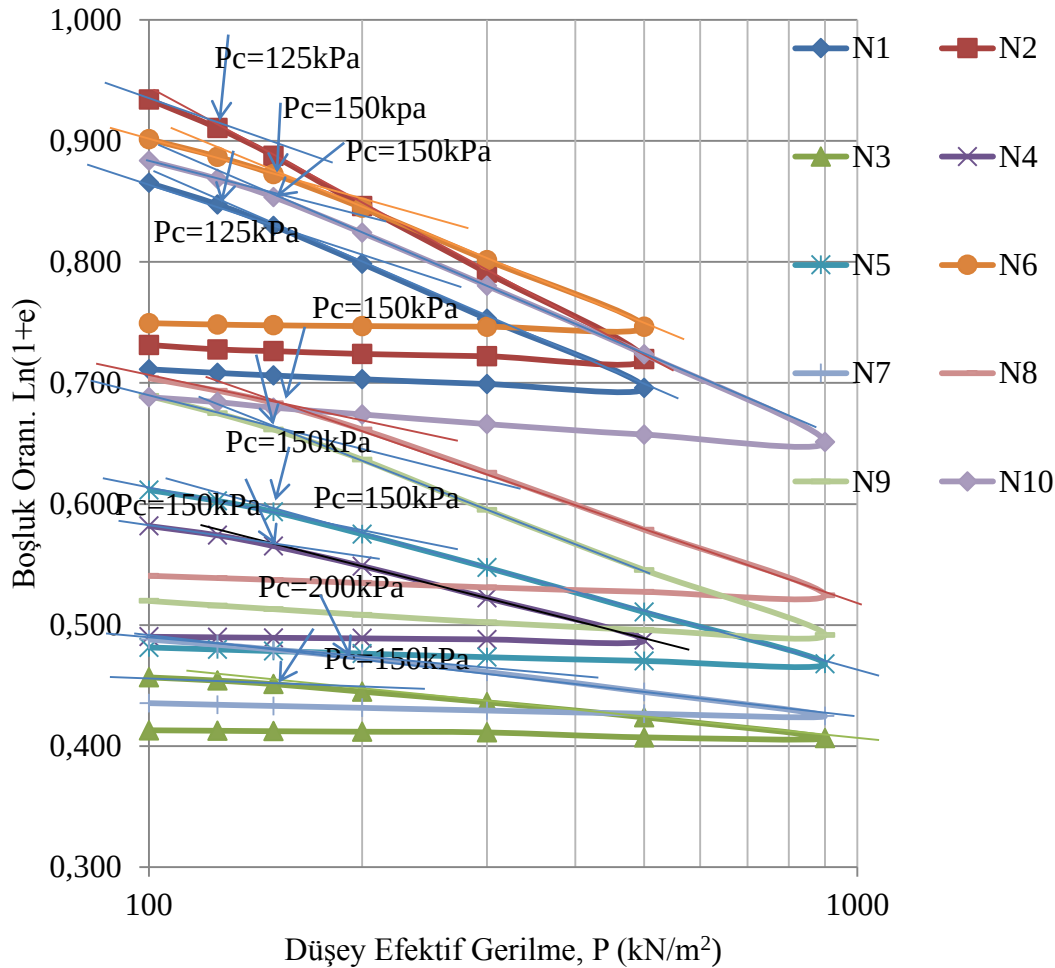
7. İNCE DANELİ ZEMİNLERİN ÖN KONSOLİDASYON BASINCI

Ön konsolidasyon basıncının gerçek değerine uygun belirlenebilmesi, oturma miktarlarının araziye daha uygun hesaplanabilmesinde oldukça önemlidir. Bazı araştırmacılar tarafından akma gerilmesi (yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerde) olarak ta tanımlanan ön konsolidasyon basıncını; numunenin örselenmesi, gerilme artım oranı, gerilmenin bulunma süresi, numune alma yöntemleri, konsolidasyon deney yöntemlerinin etkilediği bilinmektedir. Numunelerin araziden alınmaları, laboratuara taşınmaları, laboratuarda deneyler için hazırlanmaları aşamalarında yeterli önem gösterilmesine rağmen bazı örselenmeler olmaktadır. Bu örselenmeler Casagrande yöntemine dayalı olarak ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi aşamasında oturma eğrisinde eğriliğin en küçük olduğu noktanın belirlenmesini güçleştirecektir. Dolayısıyla Casagrande yöntemi ile belirlenen ön konsolidasyon basıncı gerçek değerine uygun olmayacaktır. Konu ile ilgili Brumund ve diğ. (1976) çalışmasına dayalı olarak numunede örselenme miktarı arttıkça, ön konsolidasyon basıncı gerçek değerinden daha küçük olarak bulunmaktadır.

Konsolidasyon deneylerinde gerilme artım oranı (LIR) genel olarak bir olacak biçimde uygulanmaktadır. Gerilme artım oranının ön konsolidasyon basıncına etkisi, Leonards (1976), Holtz ve Kovacs (1981), Sandbaeken ve diğ. (1985) yayınlarında önerildiği üzere, deney esnasında ön konsolidasyon basıncına yaklaşıldığında gerilme artım oranının küçültülmesi ile giderilmektedir. Yazarlara göre gerilme artım oranı küçültülerek oturma eğrilerinin yeniden yükleme bölümünden eğrilerin doğru olan bölümlerine geçiş daha iyi tanımlanabilmektedir. Gerilme artım oranı 2 uygulandığında konsolidasyon eğrisinin doğru olan bölümünün eğiminin yaklaşık 30% arttığı konu ile ilgili Taylor (1942) tarafından yapılan yayında bulunmuştur.

Konsolidasyon deneyleri için numuneler ilk olarak ring batırılıp, daha sonra ring çevresindeki fazla zemin kesilerek hazırlanmaktadır. Bu yöntem kullanılarak numune hazırlanması, numunenin istenen boyutlara küçük miktarlarda kesilerek (ring

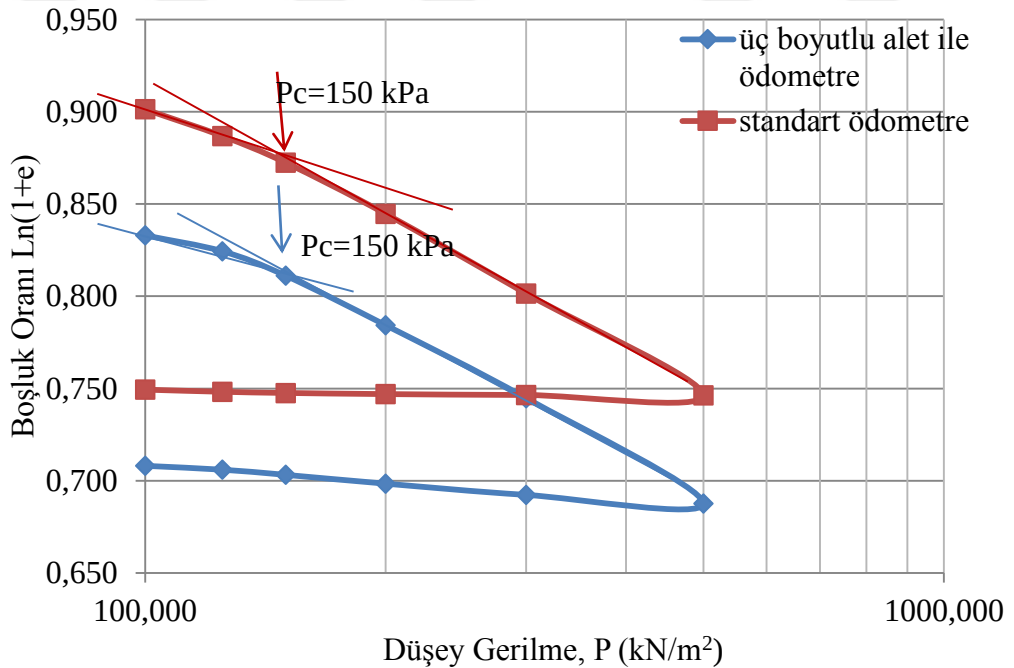
batırılmadan) getirilmesine oranla, numunede daha fazla örselenmeye neden olmaktadır (Hight ve diğ. 1992). Örselenmenin fazla olduğu numuneler ile yapılan ödometre deneylerinde ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi oturma eğrisinde eğriliğin en küçük olduğu noktanın belirli olmaması dolayısıyla kolay değildir (Casagrande yöntemi). Değişik araştırmacılara göre oturma eğrilerinde her iki eksenin logaritması alındığında bütün oturma eğrileri iki doğrudur (Atkinson, 2007; Butterfield, 1979; Onitsuka ve diğ. 1995; Hong ve diğ. 2010). Burada yapılan deneysel çalışmada da ödometre deney sonuçları her iki eksenin logaritması alınarak çizilmiştir. Bütün oturma eğrilerinin yaklaşık iki doğru olduğu Şekil 7.1’de görülebilmektedir. İki doğrunun kesim noktası ön konsolidasyon basıncı olarak tanımlanmaktadır. Ancak yöntemin kullanımı oturma eğrilerinin düzeltilmesine dolayısıyla ön konsolidasyon basıncının iyileştirilmesine olanak sağlamamaktadır.



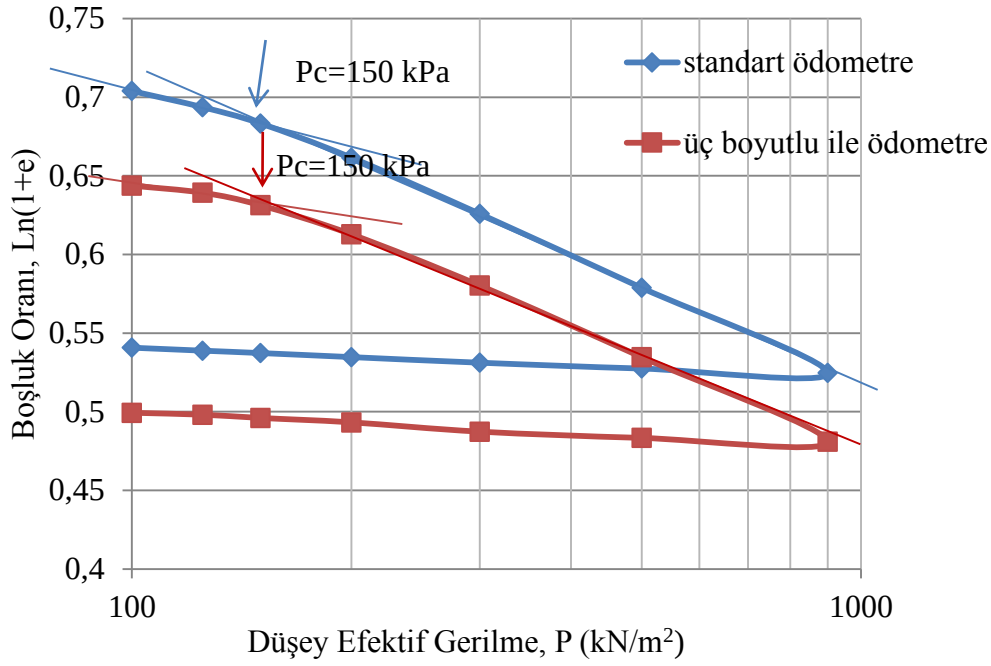
Şekil 7.1 : Ln(1+e)-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, Standart Ödometre Deney Sonuçları.

Şekil 7.1’de net görülmemesine rağmen her numunenin oturma eğrisi $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme eksenlerinde ayrı biçimde çizildiğinde ön konsolidasyon basınçları numunelerin gruplarına bağlı 125~150 kPa aralığında bulunmuştur. Yöntemin uygulamasına örnek ve grafiklerin daha iyi görülebilmesi amacı ile bazı numunelerin ön konsolidasyon basınçlarının ilgili yönteme göre belirlenmesi devam eden bölümde sırasıyla Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’ de çizilmiştir. Diğer numunelerin ilgili yönteme göre ön konsolidasyon basınçları Ek B’de görülebilmektedir. Bütün numunelerin $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine dayalı belirlenen ön konsolidasyon basınçları ayrıca Çizelge 7.1’ de gösterilmiştir.

Şekil 7.1’den görüldüğü üzere killi zeminlere herhangi ilave eksenel gerilme uygulandığında oluşabilecek oturma miktarları, killi zeminin yapısına, daneler arası bağ kuvvetlerine, zeminde bulunan kilin mineral türüne ve miktarına bağlıdır (Kaolin, bentonit, montmorillonit gibi). Killi zeminlerin likit limit değerleri arttıkça boşluk oranları da artacaktır. Yüksek plastisiteli killi zeminlerde düşük plastisiteli olanlara oranla oturma miktarları daha büyüktür. Şekil 7.1’de üst bölgede bulunan 4 eğri yüksek plastisitelidir. Diğer eğrilerin plastisite indisleri ise 50% dolaylarında ya da daha küçüktür.



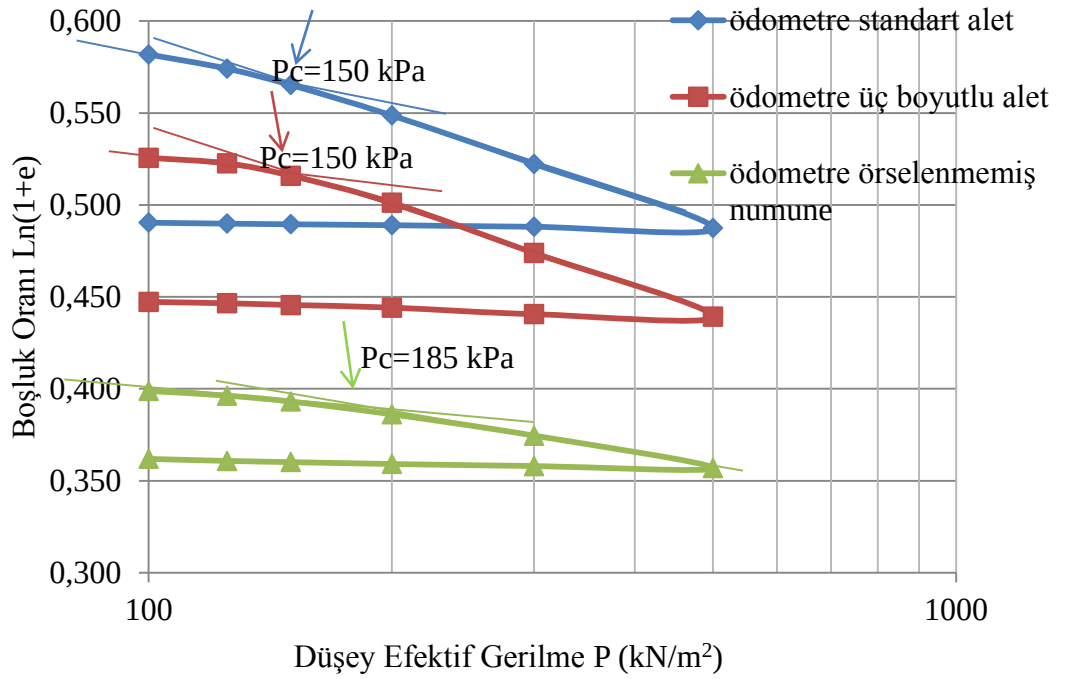
Şekil 7.2 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N6 (MH).



Şekil 7.3 : Ln(1+e)-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N8 (CL).

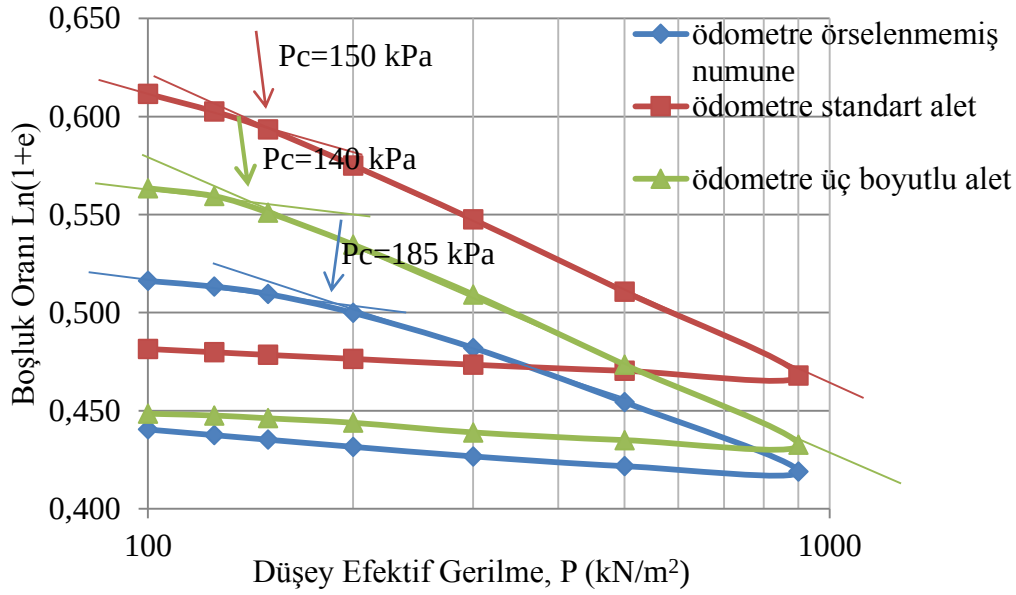
Üç boyutlu konsolidasyon deney aleti kullanılarak yapılan ödometre deneyi sonuçları da Ln(1+e)-logaritma düşey gerilme yöntemi kullanılarak çizilmiştir. Bu grup deney sonucunda da ön konsolidasyon basınçları yine 125~150 kPa gerilme aralığında bulunmuştur. Diğer numunelerin ilgili yöntemle göre ön konsolidasyon basınçları benzer biçimde Çizelge 7.1’de görülebilmektedir.

Örselenmemiş numuneler kullanılarak bir boyutlu konsolidasyon deneylerinin yapıldığından önceki bölümde söz edilmiştir. Deney aletlerinin deney sonuçlarına etkisinin olabileceği düşüncesi ile bir boyutlu deneylerin yapımında üç boyutlu deney aleti de kullanılmıştır. Aynı numunede örselenmemiş ve yeniden konsolide edilerek hazırlanan, hem standart deney aleti hem de üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan bir boyutlu deney sonuçlarına dayalı çizilen oturma eğrileri sırası ile Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’de gösterilmiştir. Bilindiği üzere deney sonuçları Ln(1+e)-logaritma düşey efektif gerilme eksenlerinde çizilmektedir. Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde deney esnasında numunelerin yanal yönde yer değiştirmelerine izin verilmesi dolayısıyla bu grup deney sonuçları ilgili yöntemle göre değerlendirilmemiştir.



Şekil 7.4 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N4 (CL).

İki farklı numunenin (N4 ve N5) üç grup deney sonucundan temin edilen oturma eğrilerinin iki doğru olduğu Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’den görülmektedir. Yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin oturma eğrileri, örselenmemiş numunelerin oturma eğrilerinin şekil olarak benzeri olup birbirlerinin ötelenmesi biçimindedir. Ancak düşey eksen oturma miktarı alındığında gözlenen davranışın tam tersi davranış bu grafiklerde bulunmaktadır. $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme eksenlerinde örselenmemiş numunenin oturma eğrisi, yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunenin oturma eğrisinin sol tarafındadır. İki doğrunun kesim noktasındaki gerilme değeri bilindiği üzere ön konsolidasyon basıncıdır. İki farklı deney aletinden de yaklaşık aynı değer ön konsolidasyon basıncı olarak bulunmuştur. Her iki grup deney sonucunda da (N4 ve N5) örselenmemiş numunelerin ön konsolidasyon basınçlarının, yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin ön konsolidasyon basınçlarından daha büyük oldukları yine Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’de görülmektedir.



Şekil 7.5 : Ln(1+e)-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N5 (CL).

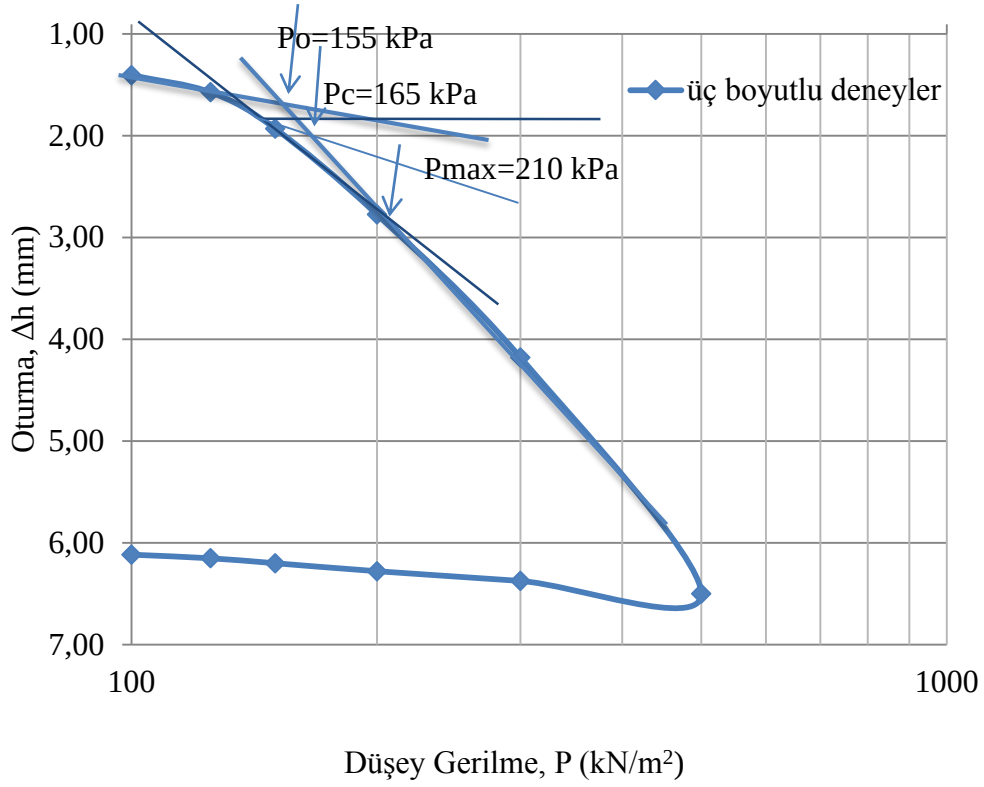
Benzer bir çalışma örselenmemiş blok ve laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler kullanılarak Nash ve diğ. (1992) tarafından yapılmıştır. Sözü edilen çalışmada standart gerilme artım yöntemi (IL), sabit deformasyon oranında (CRS), ve akımın engellendiği (RF) olmak üzere üç grup deney yapılarak deney yönteminin ön konsolidasyon basıncına etkisi araştırılmıştır. Sabit deformasyon oranında (CRS) yapılan deney sonuçlarından diğer deney sonuçlarına oranla ön konsolidasyon basınçları daha büyük bulunmuştur. İlgili sonucunda deformasyon hızına bağlı olduğu dikkate alınarak deney yönteminin ön konsolidasyon basıncına etkisinin olmadığı çalışma sonucunda açıklanmaktadır.

Konu ile ilgili diğer bir araştırma örselenmemiş blok ve piston numuneler kullanılarak Holtz ve diğ. (1987) tarafından yapılmıştır. Bu yayında standart gerilme artım yöntemi (IL), sabit deformasyon oranı (CRS) ve hidrolik eğim kontrollü (CHG) deneyler yapılarak deney yöntemi ile numune alma yönteminin ön konsolidasyon basıncına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada yapılan deneylerden piston numunelerinden bulunan ön konsolidasyon basınçlarının, blok numunelerden bulunan değerlerinden bir miktar daha küçük olduğu görülmüştür. Holtz ve diğ. (1987) yayınında gerilme artım oranı ön konsolidasyon basıncı değerine yaklaşıldığında azaltılarak oturma eğrileri iyileştirilmiştir. Konu yayında ön konsolidasyon basınçları Casagrande yöntemine göre belirlenmiştir. Yazarlara göre

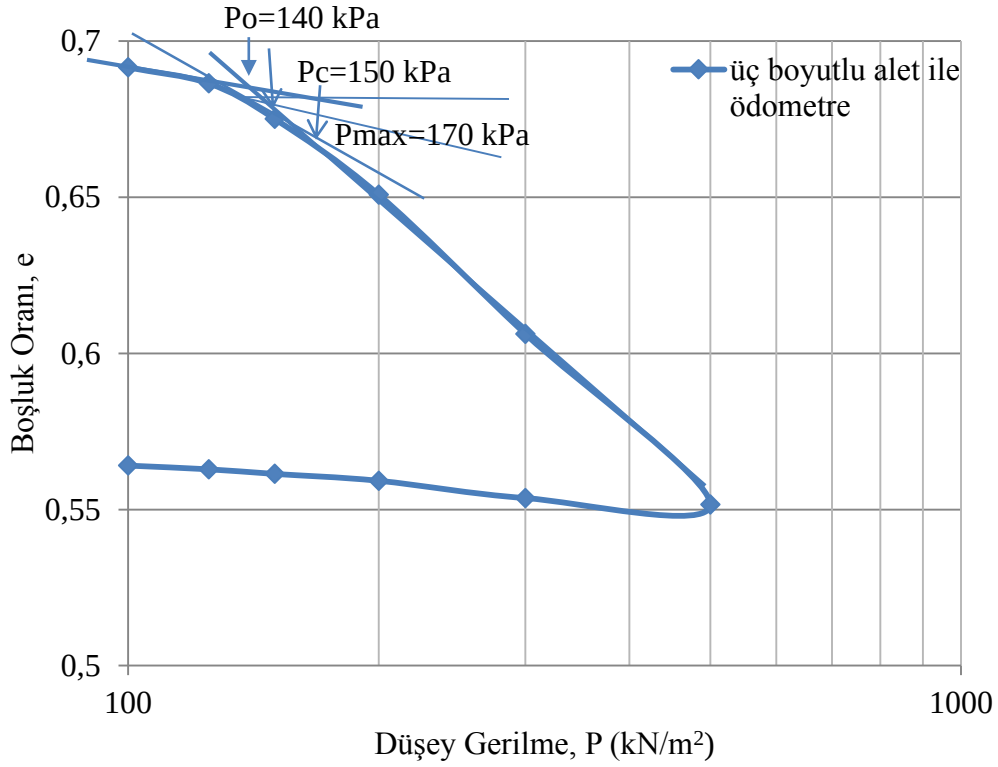
ön konsolidasyon basıncına numune alma yönteminin yanı sıra deney yönteminin de etkisi bulunmaktadır. Deneysel çalışmada en büyük ön konsolidasyon basınçları sabit deformasyonun uygulandığı (CRS) deney sonuçlarından bulunmuştur. Bu değerleri hidrolik eğim kontrollü (CHG) deney sonuçlarından belirlenen ön konsolidasyon basınçları izlemektedir. En küçük değerler standart gerilme artımının uygulandığı (IL) deney grubundan bulunmuştur. Ancak yazarlar tarafından sabit deformasyon uygulanan (CRS), ve hidrolik eğim kontrollü (CHG) deney sonuçlarından bulunan ön konsolidasyon basınçlarının yükleme hızına bağımlı olduğu ve yükleme hızı arttıkça ilgili değerin arttığı sonucu açıklanmaktadır.

Burada üç boyutlu konsolidasyon deney aleti kullanılarak yapılan ödometre ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında Casagrande yöntemi ile ön konsolidasyon basınçları bulunmuştur. Casagrande yöntemi kullanılarak bulunan ön konsolidasyon basınçları, numunelerin gruplarına bağımlı olarak 130~200 kPa gerilme aralığındadır. Her numunenin Casagrande yöntemine göre ön konsolidasyon basınçları yine Çizelge 7.1'de görülebilmektedir. Yüksek plastisiteli kil olarak isimlendirilen N2 ile yapılan üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında Casagrande yöntemi ile ön konsolidasyon basıncının bulunması Şekil 7.6'da görülebilmektedir. Şekil 7.6'dan görüldüğü üzere ön konsolidasyon basıncı Casagrande yöntemi ile 165 kPa bulunmuştur. Aynı numunenin bir boyutlu deney sonuçlarından, $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine göre ön konsolidasyon basıncının 125 kPa olarak daha küçük olduğu Çizelge 7.1'den görülebilmektedir.

Yöntemin kullanımına örnek olması açısından N4 konsolidasyon deneyi sonuçları Casagrande yöntemi kullanılarak Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de çizilmiştir. Üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan bir boyutlu deney sonuçlarında ön konsolidasyon basıncı Şekil 7.7'den görüldüğü üzere 150 kPa iken aynı yöntemle göre üç boyutlu deney sonuçlarında Şekil 7.8'den görüldüğü üzere 160 kPa bulunmuştur. Casagrande yöntemine göre ön konsolidasyon basıncı üç boyutlu deney sonuçlarından $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine oranla daha büyük bulunmuştur.

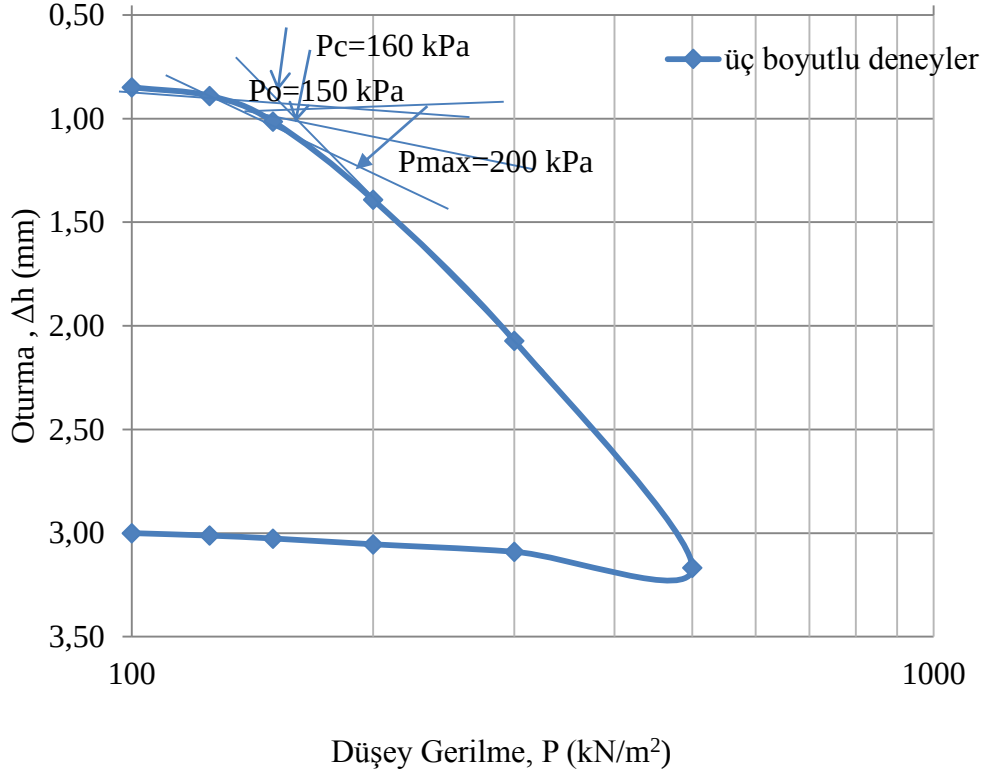


Şekil 7.6 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N2 (CH).



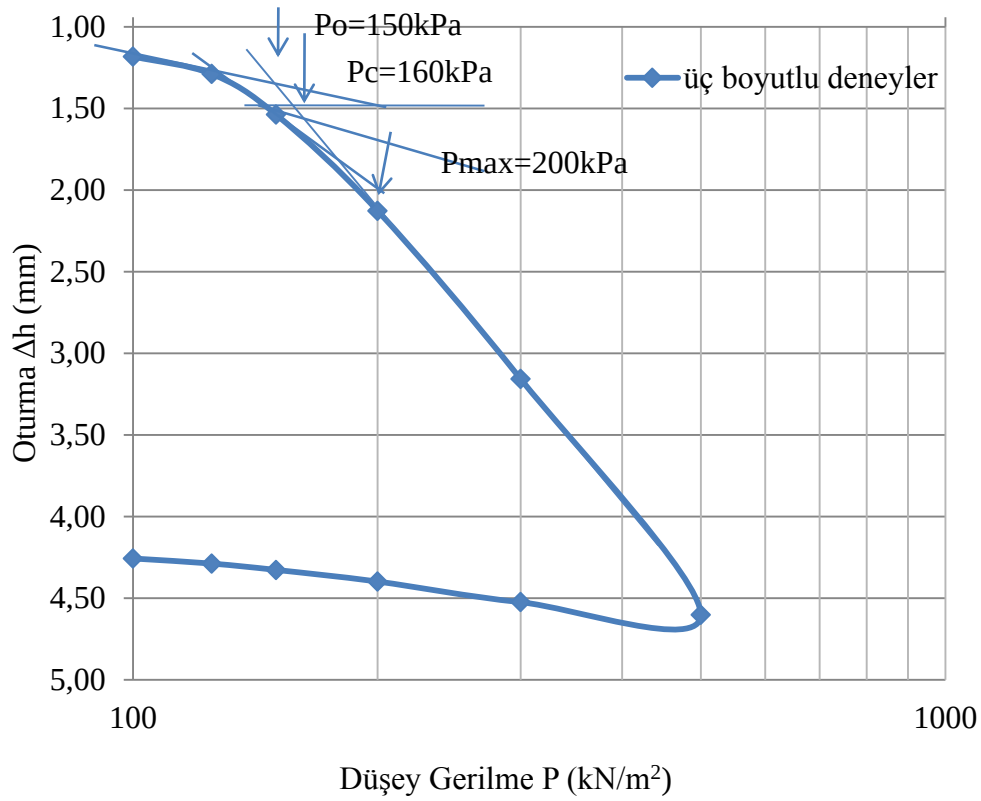
Şekil 7.7 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N4 (CL).

Şekil 7.6, Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da bilindiği üzere P_o ; olma olasılığı en büyük değer. P_c ; Casagrande yöntemine göre ön konsolidasyon basıncı, P_{max} ; ön konsolidasyon basıncının olabileceği en büyük sınır değerdir. Diğer numunelerin Casagrande yöntemine göre ön konsolidasyon basınçları yine Çizelge 7.1’de görülebilmektedir.



Şekil 7. 8 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N4 (CL).

Casagrande yöntemi kullanılarak yüksek plastisiteli silt olan N 6’nın üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları benzer biçimde Şekil 7.9’da görülebilmektedir. Şekil 7.9’dan görüldüğü üzere ön konsolidasyon basıncı bu yönteme göre 160 kPa olarak $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yönteminden bulunan değerinden daha büyük olarak bulunmuştur (Çizelge 7.1 ve Ek B). $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine göre bir boyutlu deney sonuçlarından 150 kPa olarak bulunmuştur.



Şekil 7.9 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N6 (MH).

Ön konsolidasyon basıncının bulunmasında kullanılan diğer bir yöntem, sıkışma modülüne ($M_c=1/m_v$) karşılık, logaritma düşey efektif gerilme eksenlerinde deney sonuçlarının değerlendirilmesidir (Nash ve diğ. 1992; Germaine 1985; Janbu, 1969). Çizilen grafikte en küçük modül değerine karşılık gelen gerilme değeri ön konsolidasyon basıncı olarak alınmaktadır.

Eksenel gerilmenin logaritmik ölçekte çizilmesinin uygun olmadığı Janbu ve Senneset (1979) çalışmasında dikkate alınmıştır. Dolayısıyla ilgili çalışmada sıkışma modülüne karşılık eksenel gerilme değerlerinin çizilmesi önerilmektedir. Bu biçimde çizilen grafikte ön konsolidasyon basıncı, gerilme aralığı olarak tanımlanmaktadır. Oturma grafiğinde sıkışma modülünde önemli azalma olduktan sonra sıkışma modülü kabaca sabit değer almaktadır. Sabit değerinden sonra sıkışma modülü gerilme ile lineer artım göstermektedir. Bu yöntemle göre ön konsolidasyon basıncı sıkışma modülünün kabaca sabit kaldığı gerilme aralığı olarak tanımlanmaktadır. Diğer yöntemler ile bulunan ön konsolidasyon basınçları genel olarak tanımlanan gerilme aralığında bulunmaktadır.

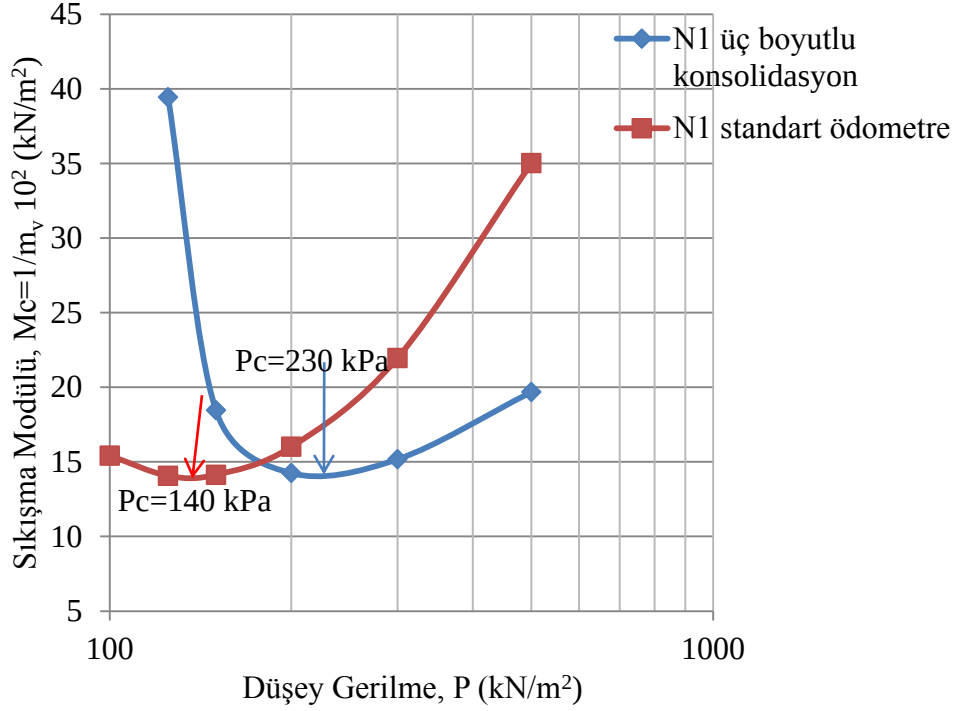
Çizelge 7.1 : Farklı Yöntemlere Göre Ön Konsolidasyon Basınçları.

Deney Yöntemi	Ödometre Standart Deney Aleti	Ödometre Üç Boyutlu Deney Aleti	Ödometre Üç Boyutlu Deney Aleti	Üç Boyutlu Deney Merkez Bölge
Hesap Yöntemi	Ln(1+e)-Logaritma Düşey Gerilme	Ln(1+e)-Logaritma Düşey Gerilme	Casagrande Yöntemi	Casagrande Yöntemi
Numune Numarası	Ön Konsolidasyon Basıncı (kN/m ²)	Ön Konsolidasyon Basıncı (kN/m ²)	Ön Konsolidasyon Basıncı (kN/m ²)	Ön Konsolidasyon Basıncı. (kN/m ²)
N1	125	-	-	160
N2	125	125	135	165
N3	150	150	180	200
N4	150	150	150	160
NÖ4	185	-	155*	-
N5	150	140	150	160
NÖ5	185	-	170*	-
N6	150	150	130	160
N7	200	200	180	190
N8	150	150	145	190
N9	150	150	140	170
N10	150	150	130	170

*; standart deney aleti ile ödometre deneyi sonucu

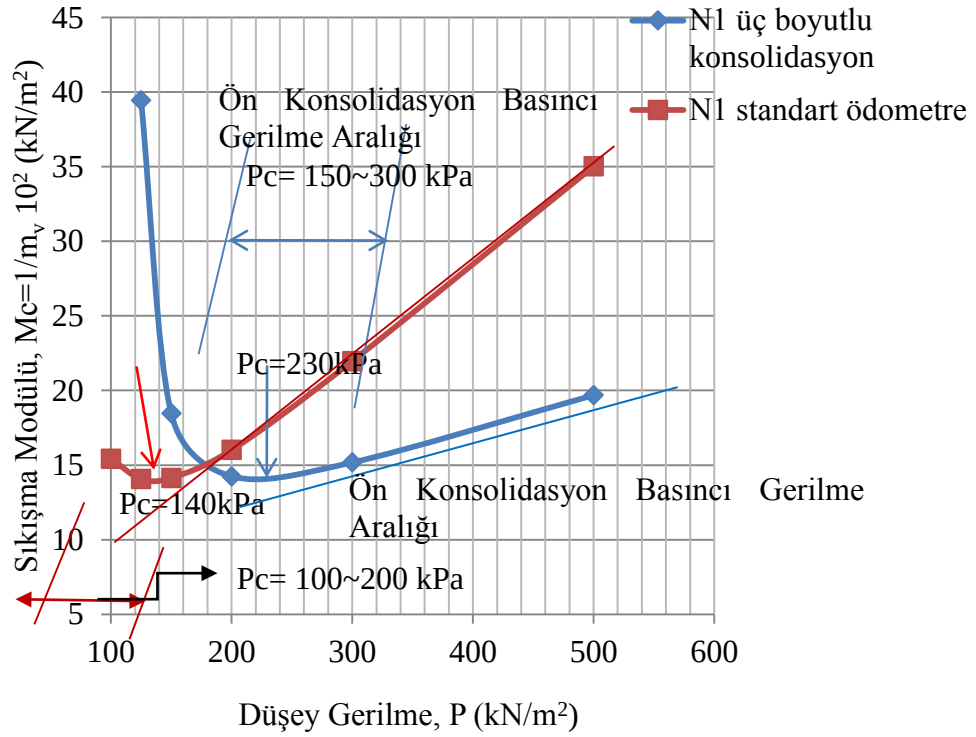
Çalışmada farklı hesap yöntemlerinin ön konsolidasyon basıncına etkisinin görülebilmesi amacı ile hem bir boyutlu hem de üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları sıkışma modülüne karşılık logaritma düşey gerilme eksenlerinde çizilmiştir. Yüksek plastisiteli silt olan N1 ile yapılan bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları bu yönteme dayalı olarak sırasıyla logaritma düşey gerilme ve düşey gerilme eksenlerinde Şekil 7.10a ve Şekil 7.10b’de görülebilmektedir. Bir boyutlu deney sonuçlarında sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemine göre ön konsolidasyon basıncı 140 kPa olarak Ln(1+e)-logaritma düşey gerilme yönteminden bulunan 125 kPa değerinden daha büyük olarak

bulunmuştur (Şekil 7.10a). Benzer biçimde üç boyutlu deney sonuçlarında ön konsolidasyon basıncı sıkışma modülü- logaritma düşey gerilme yöntemine göre Şekil 7.10a'dan görüldüğü üzere 230 kPa olarak Casagrande yöntemi ile bulunan 160 kPa değerinden daha büyük olarak bulunmuştur (Çizelge 7.1 ve Ek B).



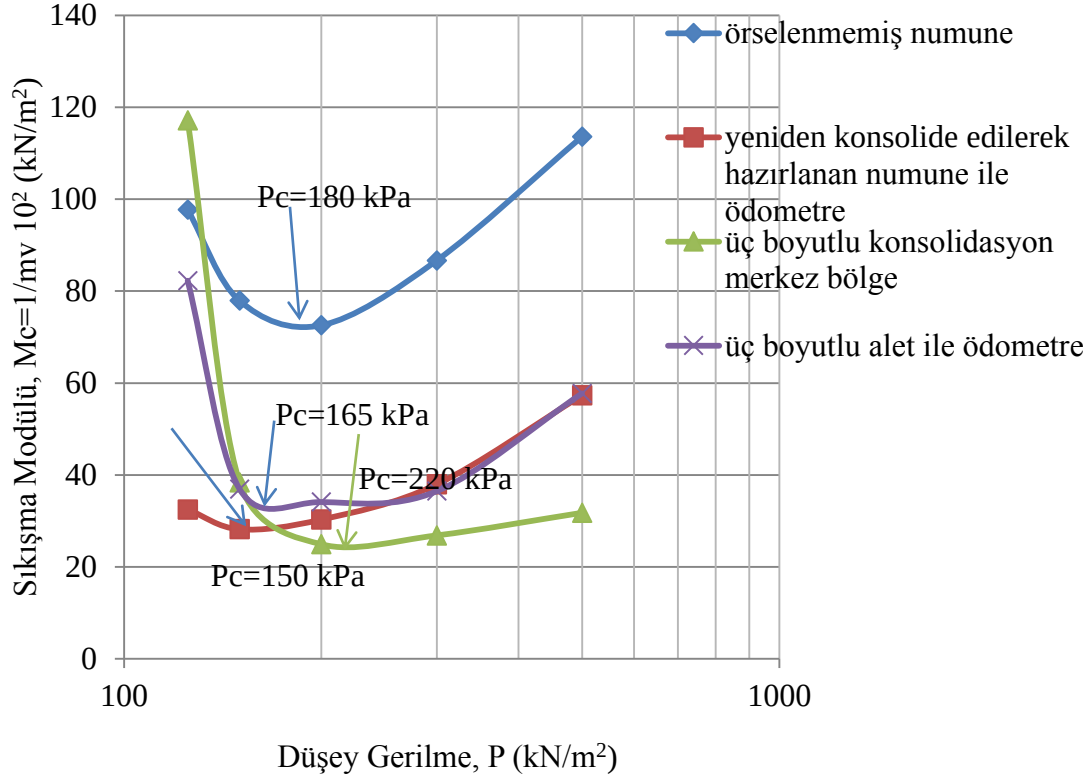
Şekil 7.10a : Sıkışma Modülü- Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N1 (MH).

Şekil 7.10b'de kullanılan eksenler aritmetik eksenlerdir. Bu durumda ön konsolidasyon basıncı gerilme aralığı, ödometre deneylerinde 100~200 kPa iken üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde Şekil 7. 10b'den görüldüğü üzere 150~300 kPa olarak belirlenmiştir. Eksenel gerilmenin logaritmasının alınması durumunda en küçük modül değerine karşılık gelen eksenel gerilme değerlerinin tanımlanan aralık içerisinde bulundukları ilgili şekillerde görülmektedir. Ayrıca $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme ve Casagrande yöntemleri ile bulunan ön konsolidasyon basınçları da Şekil 7.10b'de tanımlanan gerilme aralığı içerisinde yer almaktadır.



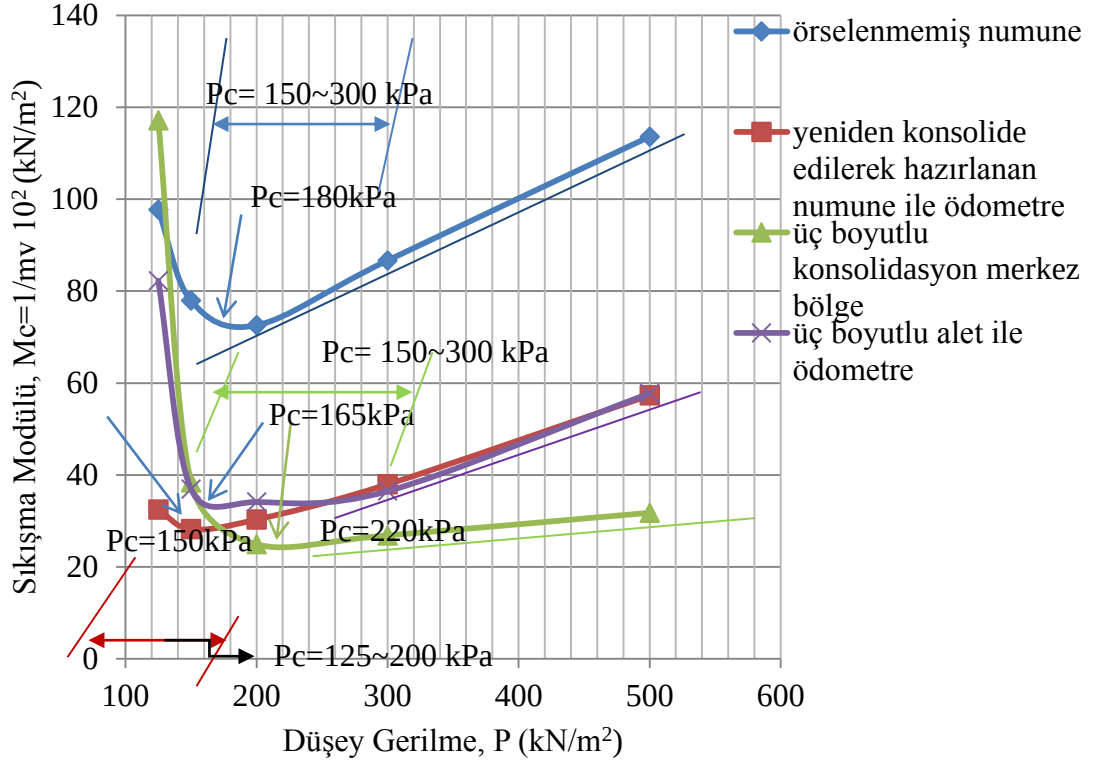
Şekil 7.10b : Sıkışma Modülü-Düşey Efektif Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N1 (MH).

Benzer biçimde düşük plastisiteli kil olan N4 ile yapılan bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında sıkışma modülü- logaritma düşey gerilme yöntemine göre ön konsolidasyon basıncının bulunması Şekil 7.11a ve Şekil 7.11b'de görülebilmektedir. Eksenel gerilmenin logaritması alındığında en küçük modül değerine karşılık gelen gerilme değerleri dört ayrı deney için de Şekil 7.11b'de tanımlanan gerilme aralığında bulunmaktadır. Örselenmemiş numuneden $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemi ile 185 kPa, Casagrande yöntemi ile aynı numunede ön konsolidasyon basıncı 155 kPa bulunmuştur. Sıkışma modülü-eksenel gerilme yöntemi ile Şekil 7.11b'de tanımlanan ön konsolidasyon basıncı gerilme aralığı bu numunede Şekil 7.11b'den görüldüğü üzere 150~300 kPa olarak yukarıda açıklanan değerleri kapsamaktadır. N4'ün diğer numune tiplerinde ve deneylerinde Casagrande ve $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemleri ile bulunan ön konsolidasyon basınçları Şekil 7.11b'de tanımlanan gerilme aralığındadır (Çizelge 7.1, Şekil 7.4, Şekil 7.7, Şekil 7.8). İlgili çizelge ve şekillerden görüldüğü üzere en büyük ön konsolidasyon basınçları üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında, sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemi kullanıldığında bulunmuştur.



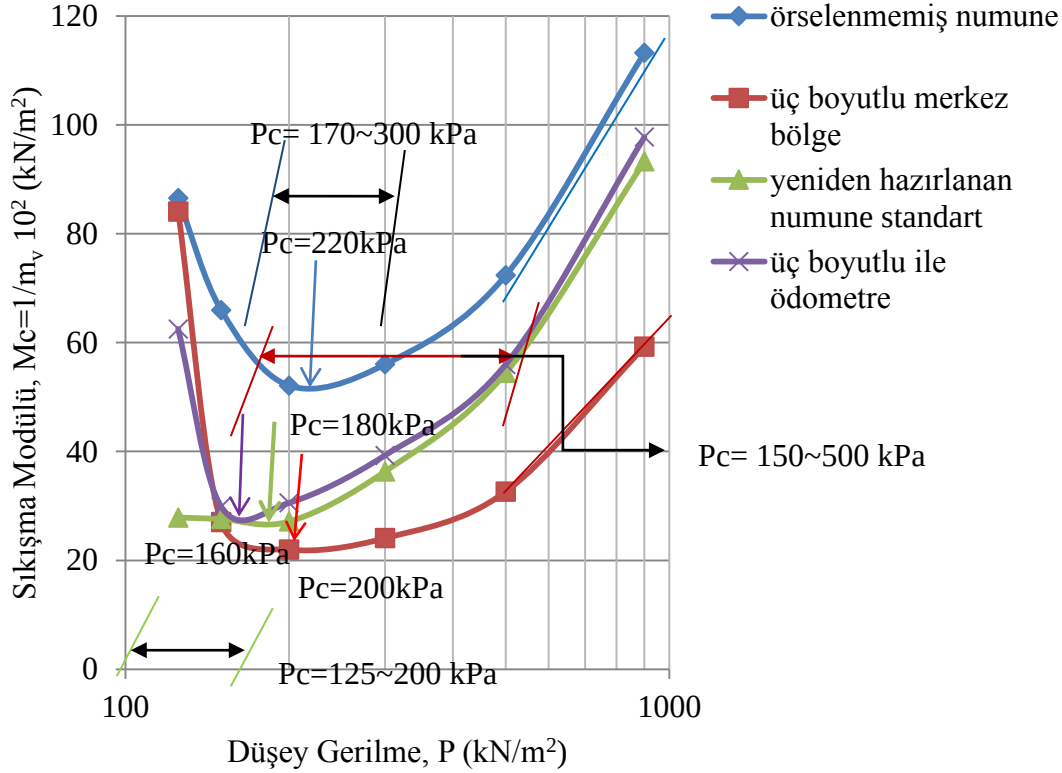
Şekil 7.11a : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N4 (CL).

N5 ile yapılan dört ayrı konsolidasyon deneyi sonuçlarında ön konsolidasyon basınçları sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemi ile Şekil 7.12’de görüldüğü üzere bulunmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan her numunenin deney sonuçlarında ayrı biçimde çizildiği üzere bu numunenin deney sonuçlarında da eksenel gerilmenin logaritması alınmadan deney sonuçları çizilip gerilme aralıkları tanımlanmıştır (Çizelge 7.3). Ancak Şekil 7.12’de görüldüğü üzere yatay eksen logaritmik olduğunda da ilgili oturma eğrilerinde sıkışma modülünde önemli azalmanın olduğu, sıkışma modülünün kabaca sabit kaldığı ve sıkışma modülünün gerilme ile lineer artım gösterdiği bölgeler kolaylıkla görülebilmektedir. Dolayısıyla eksenel gerilmenin aritmetik eksen olduğu şekillerin tamamı burada gösterilmeyecektir. Yöntemin kullanımına diğer bir örnek olması amacı ile N9 deney sonuçlarında ön konsolidasyon basıncının bulunması Şekil 7.13’de çizilmiştir. Diğer numunelerin sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemine göre ön konsolidasyon basınçları Çizelge 7.2’de özetlenmiştir.



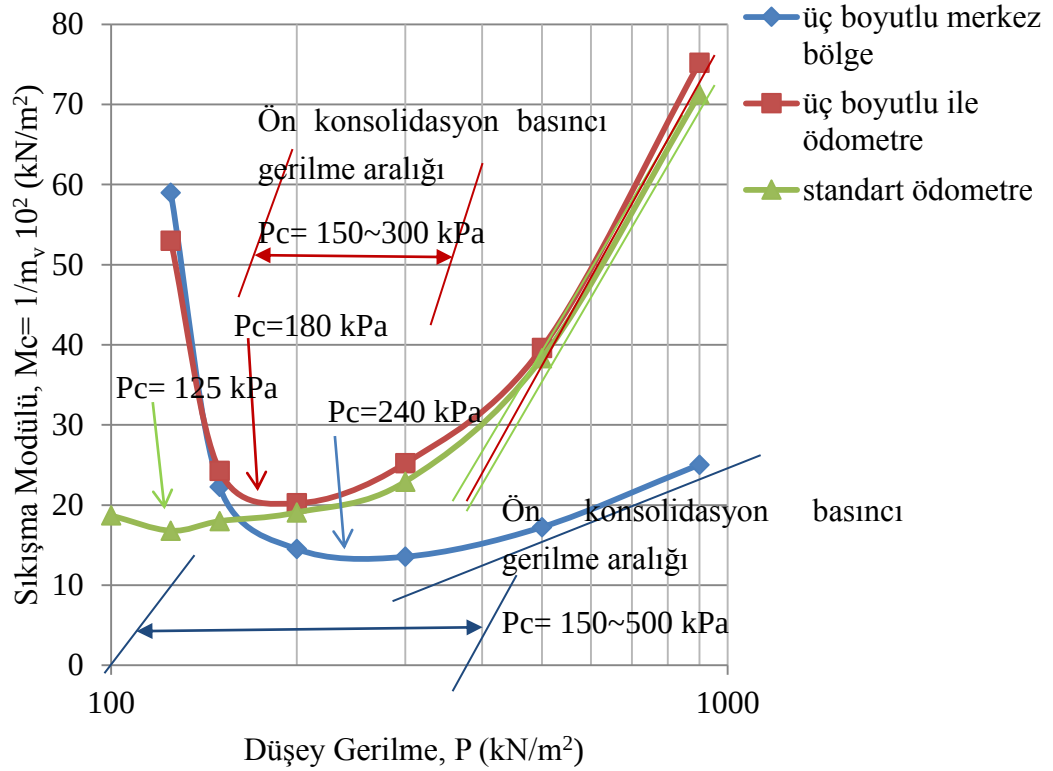
Şekil 7.11b : Sıkışma Modülü-Düşey Efektif Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N4 (CL).

Düşük plastisiteli kil olan N5’de standart ödometre deneyi sonuçlarında Şekil 7.12’de görüldüğü üzere ön konsolidasyon basıncı 160 kPa olarak $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemi ile belirlenen değerinden daha büyük bulunmuştur. Örselenmemiş numunede ise ön konsolidasyon basıncı sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemi ile 220 kPa olarak diğer iki yöntem ile bulunan değerinden daha büyüktür (Çizelge 7.1). Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ön konsolidasyon basıncı 200 kPa olarak diğer deney ve yöntemler ile bulunan değerlerinden daha büyüktür. N5 konsolidasyon deneyi sonuçlarında da üç farklı yöntem ($\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme, Casagrande, sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme) kullanılarak bulunan ön konsolidasyon basınçları Janbu ve Senneset (1979) yayınında tanımlanan gerilme aralığında bulunmaktadır (Şekil 7.12).



Şekil 7.12 : Sıkışma Modülü- Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N5 (CL).

N9 konsolidasyon deneyi sonuçlarında ön konsolidasyon basıncının sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemine göre bulunması Şekil 7.13’de görülebilmektedir. Sonuçların diğer numunelerin sonuçlarının benzeri oldukları ilgili şekilde görülmektedir. Standart ödometre deneyi sonucunda $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine göre ön konsolidasyon basıncı 150 kPa, olarak bulunmuştur. Üç boyutlu deney aleti ile yapılan ödometre deneyi sonucunda Casagrande yöntemine göre ön konsolidasyon basıncı 130 kPa ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında Casagrande yöntemi ile ön konsolidasyon 170 kPa olarak bulunmuştur (Çizelge 7.1). Şekil 7.13’den görüldüğü üzere sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemi ile ön konsolidasyon basınçları genel olarak yukarıda açıklanan değerlerinden daha büyüktür. Ayrıca üç yöntem ile bulunan değerler tanımlanan gerilme aralığındadır (Çizelge 7.3). Daha önceden söz edildiği üzere diğer numunelerin sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemine göre ön konsolidasyon basınçları Çizelge 7.2’de görülebilmektedir.



Şekil 7.13 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N9 (CH).

Ayrıca her numunenin gerilme aralıkları aritmetik eksenlerde deney sonuçlarının ayrı biçimde çizilmesi ile belirlenerek Çizelge 7.3’de gösterilmiştir. Hem sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemi ile bulunan ön konsolidasyon basınçları hem de $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme ve Casagrande yöntemleri ile bulunan ön konsolidasyon basınçları Çizelge 7.3’de tanımlanan aralıktadır.

Genel olarak en küçük ön konsolidasyon basınçları standart ödometre deney sonuçlarında $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yönteminden bulunurken bu değerleri aynı grup deney sonuçlarında Casagrande yöntemi ile bulunan değerler izlemektedir. En büyük ön konsolidasyon basınçları ise üç boyutlu deney sonuçlarında sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yönteminden bulunmuştur.

Nash ve diğ. (1992) yayınında da standart gerilme artımının uygulandığı (IL) deney sonuçlarında sıkışma modülü-logaritma düşey efektif gerilme yöntemi ile bulunan ön konsolidasyon basınçlarının diğer iki yöntem ile (Casagrande ve $\ln(1+e)$ -logaritma düşey efektif gerilme) bulunan değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Aynı yayında Casagrande ve $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemleri ile bulunan ön konsolidasyon basınçlarının benzer oldukları gözlenmiştir. Sözü edilen yayında

oturma eğrileri, deney esnasında ön konsolidasyon basıncına yaklaşıldığında gerilme artım oranı azaltılarak iyileştirilmiştir.

Çizelge 7.2 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncıları.

Deney Yöntemi	Ödometre Standart Deney Aleti	Ödometre Üç Boyutlu Deney Aleti	Üç Boyutlu Merkez Bölge	Örselenmemiş Numune Ödometre
Numune Numarası	Ön Konsolidasyon Basıncı	Ön Konsolidasyon Basıncı	Ön Konsolidasyon Basıncı	Ön Konsolidasyon Basıncı
-	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)
N1	140	-	230	-
N2	130	180	210	-
N3	180	160	250	-
N4	150	165	220	180
N5	180	160	200	220
N6	125	165	220	-
N7	125	160	280	-
N8	180	180	250	-
N9	125	180	240	-
N10	180	200	240	-

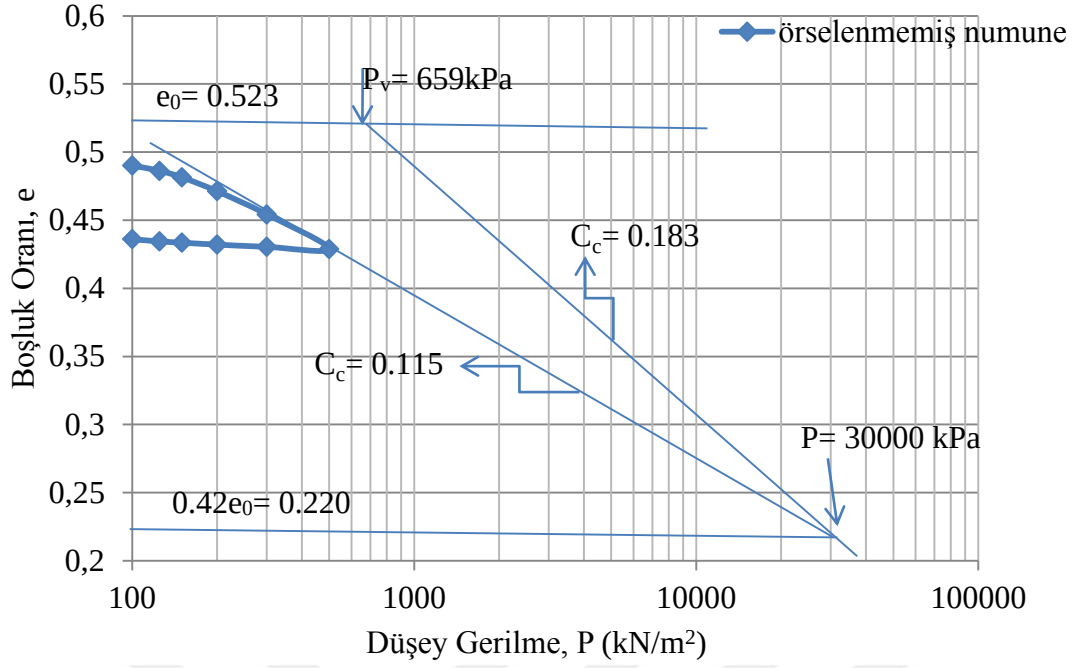
Numunelerde bulunan olası örselenmelerin konsolidasyon deneyi sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrilerini etkilediği bilinmektedir. Örselenmelerin etkilerinin giderilmesinde kullanılan diğer bir yöntem bilindiği üzere Schmertmann (1955) yöntemidir. Schmertmann yöntemi, Casagrande yöntemi ile bulunan ön konsolidasyon basıncı değerlerini genel olarak 10~15% dolaylarında arttırmaktadır (Germaine,1985). Ön konsolidasyon basıncının bulunmasında kullanılan en uygun yöntemlerden biri olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca örselenme miktarı arttıkça Casagrande yöntemi ile bulunan ön konsolidasyon basıncı değerleri arasındaki farkta artmaktadır (Germaine, 1985).

Çizelge 7.3 : Sıkışma Modülü-Düşey Efektif Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon ...Basıncı Gerilme Aralıkları.

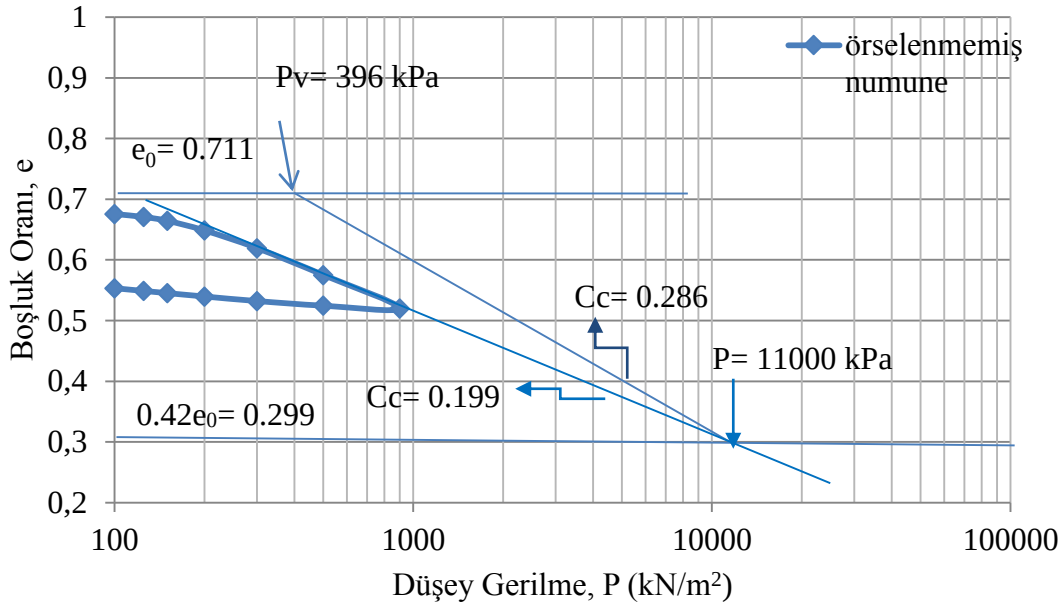
Deney Yöntemi	Ödometre Standart Deney Aleti	Ödometre Üç Boyutlu Deney Aleti	Üç Boyutlu Merkez Bölge	Standart Ödometre Örselenmemiş Numune
Numune Numarası	Ön Konsolidasyon Basıncı Gerilme Aralığı (kN/m ²)	Ön Konsolidasyon Basıncı Gerilme Aralığı (kN/m ²)	Ön Konsolidasyon Basıncı Gerilme Aralığı (kN/m ²)	Ön Konsolidasyon Basıncı Gerilme Aralığı (kN/m ²)
-				
N1	100~200	-	150~300	-
N2	125~200	150~300	150~300	-
N3	125~300	150~500	200~500	-
N4	125~200	150~300	150~300	150~300
N5	125~200	150~300	150~500	170~300
N6	125~200	150~300	150~300	-
N7	125~300	150~300	150~500	-
N8	125~300	150~300	150~500	-
N9	100~200	150~300	150~500	-
N10	125~300	150~300	150~500	-

Burada örselenmemiş örnekleri kullanılarak ödometre deneyleri yapılan N4 ve N5 deney sonuçlarında Schmertmann yöntemi kullanılarak arazi oturma eğrileri belirlenmeye çalışılmıştır. Numunelerin hazırlanması bölümünde alındıkları derinlik, ortalama su muhtevalarından söz edilmiştir. Tam sondaj bilgileri temin edilemediğinden ortalama derinlik ve ortalama tabii birim hacim ağırlık belirlenerek kabaca jeolojik gerilmeler hesaplanmıştır.

Ödometre deneyi sonunda numunelerin suya daha doygun oldukları kabul edilerek deney başıboşluk oranları tekrar hesaplanmıştır. Her iki numune içinde yapılan deneylerin ortalaması alınarak deney başıboşluk oranları bulunmuştur. Numuneler normal konsolide kabul edilerek Schmertmann düzeltmeleri N4 için Şekil 7.14 ve N5 için Şekil 7.15'te görülebilmektedir.



Şekil 7.14 : Oturma Eğrisinde Schmertmann Düzeltmesi, N4 (CL).



Şekil 7.15 : Oturma Eğrisinde Schmertmann Düzeltmesi, N5 (CL).

Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'te görüldüğü üzere Schmertmann yöntemi ile belirlenmeye çalışılan arazi oturma eğrilerinin eğimleri laboratuvar oturma eğrisi eğimlerinden oldukça büyüktür.

Ön konsolidasyon basıncının bulunmasında kullanılan diğer bir yöntem deformasyon enerjisi yöntemidir Tavenas ve diğ. (1979). Deformasyon enerjisi, uygulanan gerilme artımında oturma eğrisinin altında kalan alana eşittir. Aritmetik eksenlerde bu biçimde hesaplanan deformasyon enerjileri eksenel gerilmeye karşılık çizilir. Ön konsolidasyon basıncına kadar olan bölümün eğimi diğerine oranla oldukça küçüktür. İki doğrunun kesim noktası bu yöntemle göre ön konsolidasyon basıncıdır Germaine, (1985). Buradaki çalışmada bu yöntem kullanılmamıştır.

10 farklı plastisite indisli, yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler ve örselenmemiş 2 numune ile bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından genel olarak; standart ödometre deneylerinden $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine göre 125 kPa~150 kPa olarak ön konsolidasyon basınçları diğer iki yöntem ile bulunan değerlerinden daha küçük olarak bulunmuştur. Bu grup deney sonuçlarında sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemine dayalı ön konsolidasyon basınçları 125 kPa~180 kPa olarak belirlenmiştir. Yine bu yöntemle göre üç boyutlu deney aleti ile yapılan ödometre deneyi sonuçlarında ilgili değerler 160 kPa~200 kPa olarak $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yönteminden bulunan 125 kPa~150 kPa değerlerinden daha büyüktür. Casagrande yöntemi ile ön konsolidasyon basınçları ödometre deneyi sonuçlarında 130 kPa~180 kPa olarak, $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yönteminden daha büyük belirlenirken sıkışma modülü- logaritma düşey gerilme yöntemi ile bulunan değerlerinden daha küçüktür.

Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında da ödometre deneyi sonuçlarına benzer olarak ön konsolidasyon basınçları sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemi ile 200 kPa~280 kPa olarak, Casagrande yöntemi ile belirlenen 160 kPa~200 kPa değerlerinden daha büyüktür.

Deneysel çalışma sonuçlarında en küçük ön konsolidasyon basınçları $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yönteminden bulunurken, bu değeri Casagrande yöntemi ile bulunan değerler izlemektedir. En büyük değerler ise sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yönteminden belirlenmiştir. Üç farklı yöntem kullanılarak bulunan ön konsolidasyon basınçları sıkışma modülü-düşey gerilme yöntemi ile tanımlanan aralık içerisinde.

Yaklaşık 125 kPa eksenel gerilme etkisinde yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler ile yapılan konsolidasyon deneyi sonuçlarından farklı deney gruplarından

farklı ön konsolidasyon basınçları bulunmuştur. Bazı numuneler çamur konsolidasyon aletinde 2 defa hazırlanmıştır. Bazı numuneler çamur konsolidasyon aletinde yaklaşık 1 yıl konsolide edildikten sonra konsolidasyon deneylerinin yapımında kullanılmışlardır. Ön konsolidasyon basıncı olarak farklı yöntemlerden farklı değerlerin bulunmasının nedeni, numunelerin sahip oldukları özelliklerini yeniden hazırlama sürecinde tamamen kaybetmemiş olmalarıdır. Numunelerin etüvde kurutulmaları ve danelerine ayrılmaları aşamalarında dane yapılarının önemli zarar görmediği düşünülmektedir. Laboratuarda karıştırıldıkları su ile etkisinde kaldıkları eksenel gerilme, arazi koşullarını yansıtmasa da yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler belirgin bir yapıya sahiptirler. Literatürde konsolidasyon esnasında daneler arası boşlukların incelendiği çalışmalarda konu ile ilgili açıklamalar bulunmaktadır.

Ayrıca genel olarak üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarına bağımlı çizilen oturma grafikleri bir boyutlu deney sonuçlarına bağımlı çizilenlere oranla daha düzenli davranış göstermektedir. Üç boyutlu deneylerde gerilme artımı merkez bölgeye uygulanmaktadır. Buna karşın bir boyutlu deneylerde numune hazırlanması aşamasında ringin numuneye batırılması esnasında ring ile numune arasında, ringe yakın bölümde numunede örselenmeler olmaktadır. Sözü edilen örselenmeler deney sonuçlarını etkilemektedir. Dolayısıyla üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarına bağımlı çizilen grafiklerde ön konsolidasyon basınçları daha net görülmektedir.

Örselenmemiş numunelerden bulunan ön konsolidasyon basınçlarının aynı numunelerin yeniden hazırlanan örneklerinden bulunan değerlerinden daha büyük oldukları yine ilgili şekillerden görülmektedir.

Deney sonuçlarına bağımlı yapılan açıklamalara göre ön konsolidasyon basıncının numune tipine, numune alma yöntemine, deney yöntemine ve ön konsolidasyon basıncının belirlenmesinde kullanılan yöntemlere bağımlı olduğu söylenebilir.

8. İNCE DANELİ ZEMİNLERİN SINIFLANDIRMA VE OTURMA ÖZELLİKLERİ ARASINDA KORELÂSYONLAR

Zeminlerin arazideki davranışlarının tahmin edilebilmesinde nümerik çözüm yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Nümerik çözüm yöntemlerinden arazideki zeminin davranışını en iyi temsil edebilen sonuçların temin edilebilmesi, zemin parametrelerinin güvenilir biçimde laboratuvar deneylerinden belirlenerek, çözüm yönteminde kullanımına bağımlıdır. Plastisite indisi gibi zeminlerin sınıflandırma özelliklerinden yararlanarak, nümerik modelde kullanılacak zemin parametrelerinin belirlenmesi pek çok araştırmanın konusu olmaktadır. Böyle bir çalışma 12 farklı plastisite indisli, laboratuvarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler kullanılarak Nakase ve diğ. (1988) tarafından yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarından genel olarak plastisite indisinin değeri azaldıkça kırılmanın olduğu eksenel deformasyon değerinin azaldığı, plastisite indisi azaldıkça akma yüzeyinin daha düzlemsel şekil aldığı, plastisite indisi arttıkça zeminin sıkışabilirliğinin arttığı bulunmuştur. Yazarlar deneysel çalışmalarının sonucunda, bünye denklemleri için gerekli zemin parametreleri ile zeminin plastisite indisi arasında korelasyon katsayıları oldukça yüksek bağıntılar bulmuşlardır.

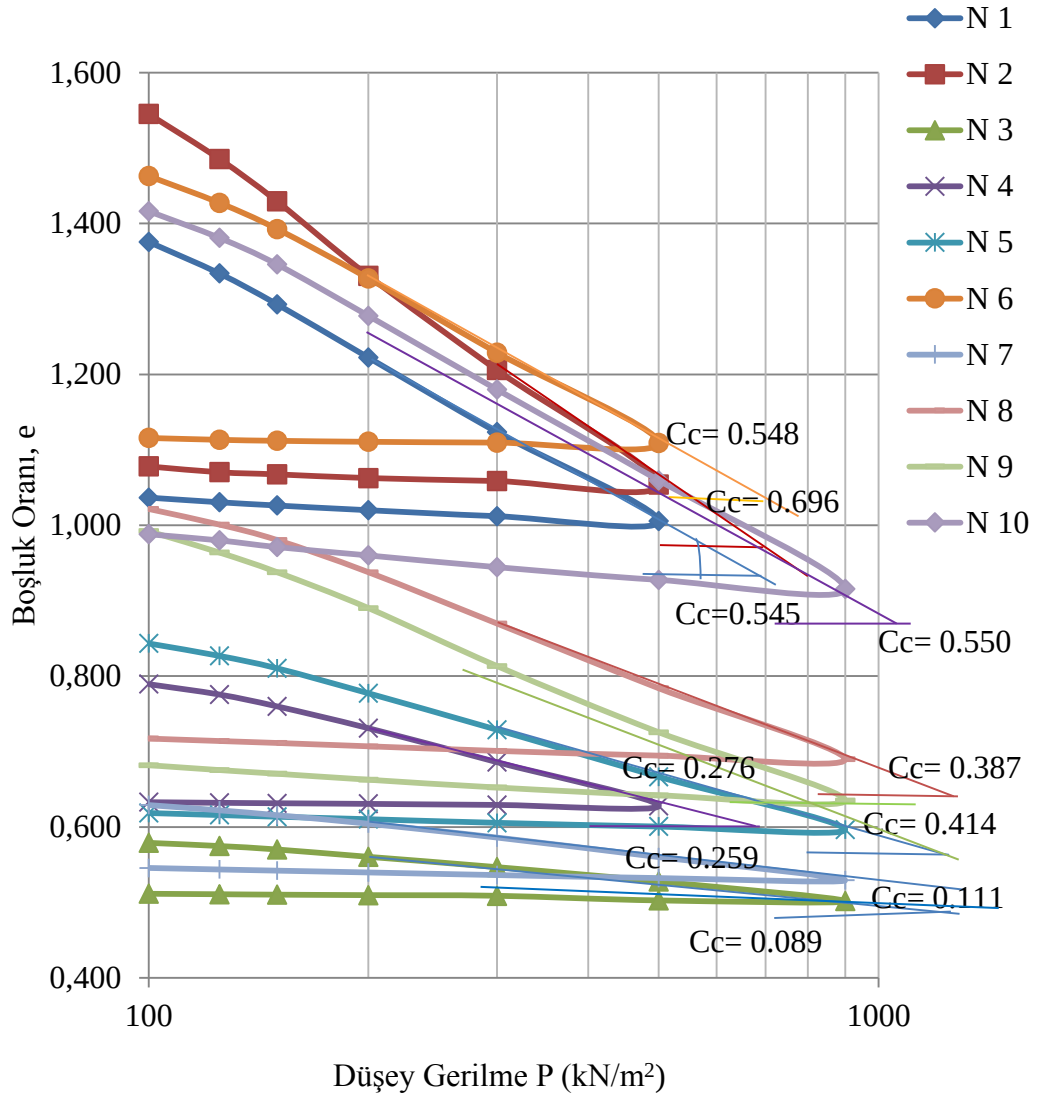
Benzer başka bir çalışma Burland (1990) tarafından yapılmıştır. Burland (1990) yayınında başka deneysel çalışmalarda, örselenmemiş ve laboratuvarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler kullanılarak yapılan deney sonuçları kullanılmıştır. Skempton (1970) yayınına göre herhangi killi zeminde boşluk oranı ile logaritma düşey efektif gerilme arasındaki bağıntı zorunlu olarak doğrusaldır. Herhangi bir düşey efektif gerilme değerinde zeminin boşluk oranı, zeminde bulunan kil minerallerinin miktarı ile kil minerallerinin ne tür kil minerali olduğuna bağımlıdır. Kil minerallerinin isimleri ise zeminlerin likit limitleri ile belirlenebilir. Likit limit arttıkça boşluk oranı da artacaktır. Dolayısıyla oturma eğrilerinin boşluk oranı ile normalize edilmesi uygun olacaktır. Burland (1990) yayınında boşluk indisi olarak parametre tanımlanmış oturma eğrileri bu parametre ile normalize edilmiştir.

Burland (1990) yayınında numuneler likit limitte suya doygun kabul edilerek likit limitteki boşluk oranları hesaplanmıştır. Çalışmada likit limitteki boşluk oranı ile düşey efektif gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranı ve sıkışma indisi arasında korelasyon katsayıları yüksek bağıntılar bulunmuştur. Bulunan bağıntılar plastisite kartında A doğrusuna yakın ve A doğrusunun üzerinde bulunan zeminler için geçerlidir.

Buradaki çalışmada killi zeminlerin oturma özelliklerinin belirlenebilmesinde zemin sınıflandırma parametrelerinin kullanılmasına çalışılmıştır. Bu amaçla likit limitte numuneler yüzde yüz suya doygun kabul edilerek boşluk oranları e_L hesaplanmıştır. Likit limitteki boşluk oranı ile düşey efektif gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranı e_{100} ve sıkışma indisi C_c arasında bağıntının bulunup bulunmadığı araştırılmıştır. Bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında plastisite indisi I_p ile sıkışma indisi C_c arasında da korelasyonun varlığı ayrıca incelenmiştir.

Deneyisel çalışmada kullanılan 10 farklı plastisite indisli, yeniden konsolide edilerek hazırlanan ince daneli zeminlerin bir boyutlu oturma eğrileri boşluk oranı (e)-logaritma düşey efektif gerilme eksenlerinde Şekil 8.1’de görülebilmektedir. Şekil 8.1’den görüleceği üzere yaklaşık 200 kPa basınç değerinden sonra numunelerin hepsinin bir boyutlu oturma eğrisi doğrudur. Numunelerin 200 kPa basınç değeri öncesi oturma davranışları hakkında genel görüş verebileceği düşüncesiyle likit limitteki boşluk oranları e_L ile düşey gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranları e_{100} arasında korelasyonun varlığı araştırılmıştır. Ön konsolidasyon basıncı bölümünde açıklandığı üzere oturma eğrileri $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme eksenlerinde iki doğrudur. Dolayısıyla e_L - e_{100} arasındaki bağıntının ince daneli zeminlerin ön konsolidasyon basıncı öncesi oturma davranışları hakkında genel görüş verebileceğine inanılmaktadır.

Ayrıca normal konsolide killi zeminlerde oturma eğrisinin eğimi olan sıkışma indisi C_c ile likit limitteki boşluk oranı e_L arasında da ilgili korelasyonun varlığı araştırılmıştır.



Şekil 8.1 : Standart Ödometre Deney Sonuçları.

Çalışmada yapılan bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında genel olarak yaklaşık 150 kPa~ 200 kPa basınç değerlerinden sonra üç boyutlu oturma miktarları ödometre oturma miktarlarından daha büyüktür. Bazı numunelerde 900 kPa eksenel gerilme deney esnasında kullanılmadığından sıkışma indisleri (C_c), 200 kPa ~500 kPa gerilme aralığında hesaplanmıştır.

Numunelerin boşluk indisleri Burland (1990) yayınında tanımlandığı biçiminde hesaplanarak değerleri Çizelge 8.1’de gösterilmiştir. Çizelge 8.1’deki boşluk indisleri örnek olması amacı ile başlangıç boşluk oranları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerlerde yapılan tüm deneylerin deney başıboşluk oranları, deney sonunda numuneler suya daha doygun kabul edilerek, deney sonu boşluk oranları kullanılıp,

tekrar hesaplanarak düzeltilip, tüm deneylerden bulunan sonuçların ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

$$I_v = \frac{e - e_{100}}{C_c} \quad (8.1)$$

Burada,

I_v : boşluk indisi,

e : her hangi eksenel gerilme değerinde boşluk oranı,

e_{100} : eksenel gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranıdır.

C_c : sıkışma indisi.

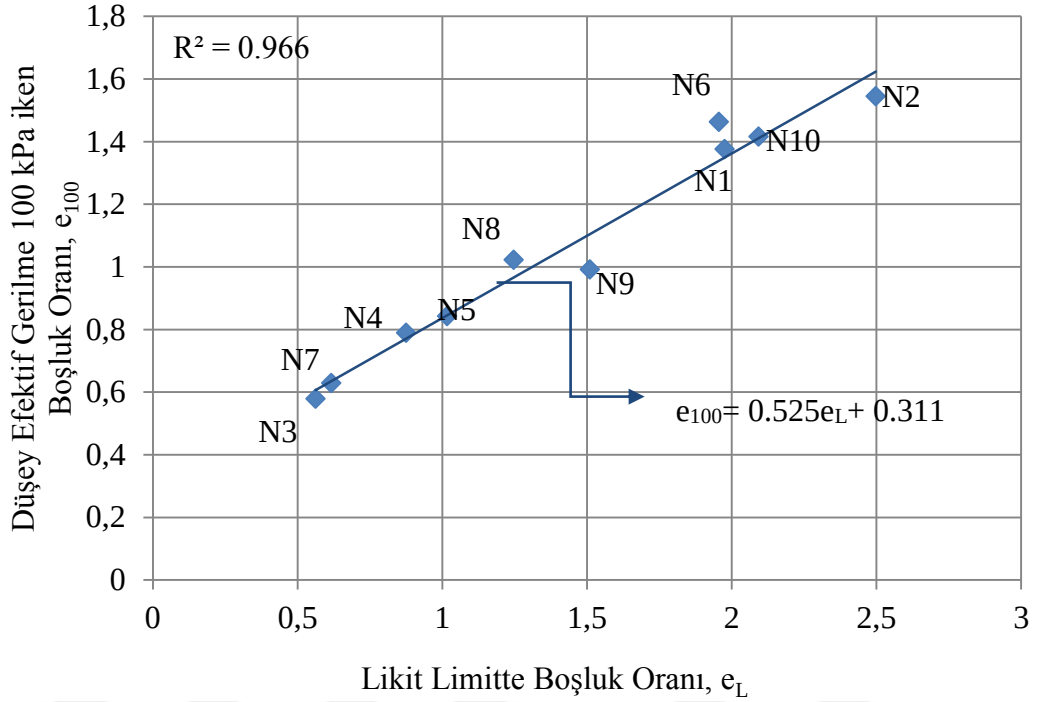
Çizelge 8.1 : Standart Ödometre Deney Sonuçlarının Değerlendirmesi.

Numune No	e_0	e_L	e_{100}	e_{200}	e_{500}	C_c	I_v
N1	1,576	1,976	1,376	1,222	1,005	0,545	0,368
N2	1,671	2,498	1,545	1,331	1,054	0,696	0,181
N3	0,662	0,562	0,579	0,560	0,528	0,089	0,933
N4	0,869	0,875	0,789	0,731	0,628	0,259	0,309
N5	0,980	1,017	0,843	0,777	0,667	0,276	0,496
N6	1,602	1,956	1,463	1,327	1,109	0,548	0,254
N7	0,728	0,616	0,629	0,604	0,560	0,111	0,892
N8	1,126	1,247	1,022	0,938	0,784	0,387	0,271
N9	1,115	1,510	0,992	0,890	0,725	0,414	0,297
N10	1,582	2,094	1,416	1,278	1,059	0,550	0,302

Çizelge 8.1’de e_0 : deney başı boşluk oranı, e_L : likit limitte boşluk oranı, e_{100} : düşey gerilme 100 kPa iken boşluk oranı, e_{200} : düşey gerilme 200 kPa iken boşluk oranı, e_{500} : düşey gerilme 500 kPa iken boşluk oranı, C_c : sıkışma indisi, I_v : boşluk indisi.

Çizelge 8.1’deki boşluk indisleri deney başıboşluk oranları ile aynı sıkışma indisleri kullanılarak hesaplandığından değerleri düzenli değildir. Boşluk indisi formülünde gerilme kademesi 100 kPa ile 1000 kPa dikkate alındığında konu olan zeminin boşluk oranı (e), 100 kPa basınç değerindeki boşluk oranına (e_{100}), eşit olduğunda boşluk indisi sıfır olacaktır. Zeminin boşluk oranının 1000 kPa basınç değerindeki boşluk oranına e_{1000} eşit olması halinde boşluk indisi -1 olacaktır. Dolayısıyla boşluk indisi sıfır ile eksi bir aralığında bir değer olarak zeminin kıvamı hakkında genel fikir verebilmektedir.

10 farklı plastisite indisli numuneler ile yapılan bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında düşey efektif gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranları (e_{100}) ile likit limitteki boşluk oranları (e_L) arasında korelasyonun varlığı araştırılmış ve ilgili bağıntı Şekil 8.2’de gösterilmiştir.



Şekil 8.2 : Likit Limitte Boşluk Oranı ve Düşey Efektif Gerilme 100 kPa iken Boşluk Oranı Arasında Bağıntı.

Şekil 8.2’den görüldüğü üzere eksenel gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranları ile likit limitteki boşluk oranları arasında bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarından, denklemi aşağıda verilen lineer bağıntı bulunmuştur.

$$e_{100} = 0.525e_L + 0.311 \quad (8.2)$$

Denklem 8.2 de,

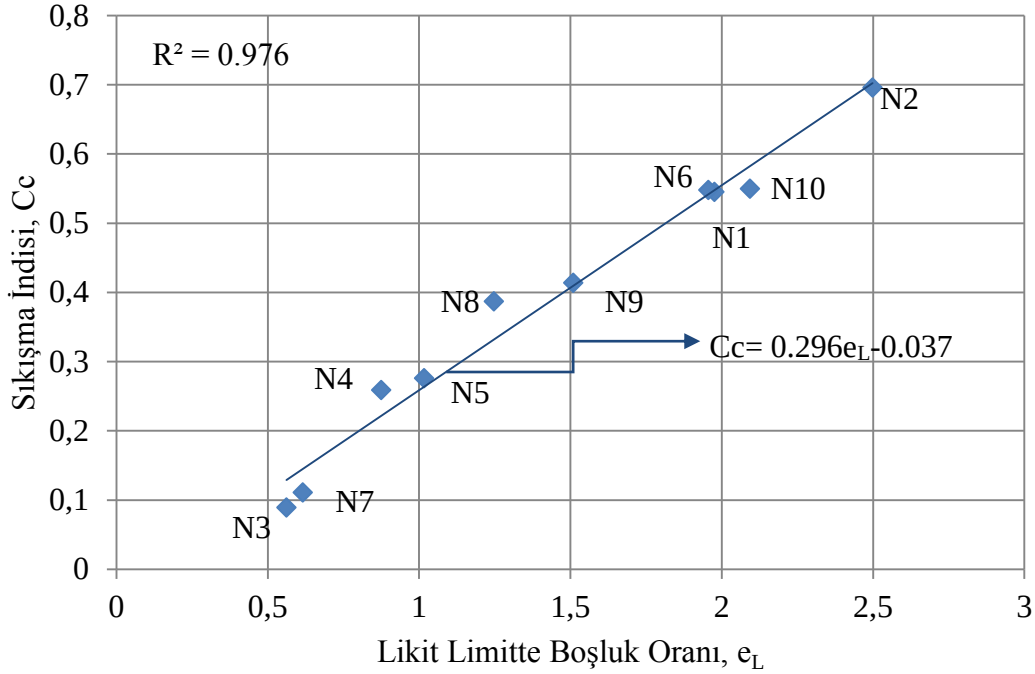
e_{100} ; düşey efektif gerilme 100 kPa değerinde numuneler 24saat konsolide edildikten sonra hesaplanan boşluk oranıdır.

e_L ; likit limitte numuneler suya doygun kabul edildiğinde boşluk oranıdır.

Regresyon katsayısının $r^2=0,966$ olarak iyi bir değer olduğu kabul edilmektedir.

Normal konsolide killi zeminler olası eksenel gerilme artımına maruz kaldıklarında olması beklenen oturma miktarlarının büyük olacağı bilinmektedir. Konsolidasyon

oturmaları hakkında genel görüş verebileceği düşünülerek likit limitteki boşluk oranları ile sıkışma indisleri arasında da olası bağıntının bulunup bulunmadığı araştırılmıştır. 10 farklı numune kullanılarak yapılan bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında gözlenen sonuç Şekil 8.3’de görülmektedir.



Şekil 8.3: Likit Limitte Boşluk Oranı ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.

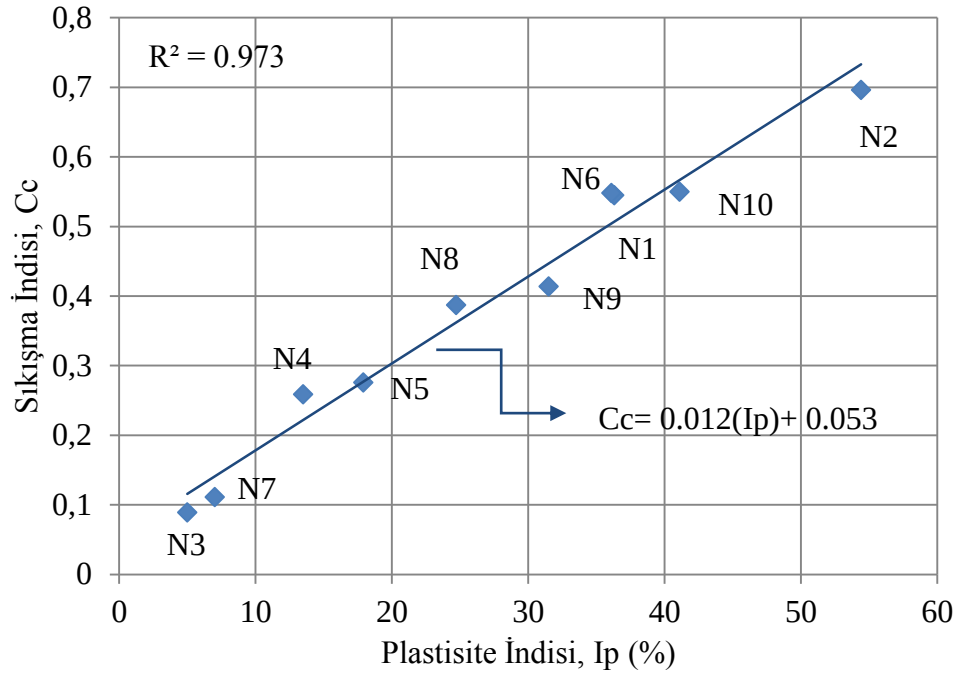
Korelasyonlarda kullanılan bir boyutlu oturma özellikleri bilindiği üzere Çizelge 8.1’de özetlenmiştir. Çizelge 8.1’de Şekil 8.1’de çizilen oturma eğrileri yardımı ile hazırlanmıştır.

Bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında numunelerin sıkışma indisleri ile likit limitteki boşluk oranları arasında denklem (8.3) ile verilen, korelasyon katsayısı 0,976 olan lineer bağıntının bulunduğu Şekil 8.3’de görülebilmektedir.

$$C_c = 0.296 e_L - 0.037 \quad (8.3)$$

Denklem (8.3)’de benzer biçimde e_L numunelerin likit limitteki boşluk oranıdır. Ayrıca zemin sınıflandırma özellikleri birbirine yakın numuneler grafiklerde de yakın bulunmaktadır.

Plastisite indisi ile sıkışma indisi arasında olası korelasyonun varlığı da araştırılıp bir boyutlu deney sonuçlarına dayalı bulunan sonuç Şekil 8.4’te gösterilmiştir.



Şekil 8.4 : Bir Boyutlu Deneylerde Plastisite İndisi ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.

$$C_c = 0.012(I_p) + 0.053 \quad (8.4)$$

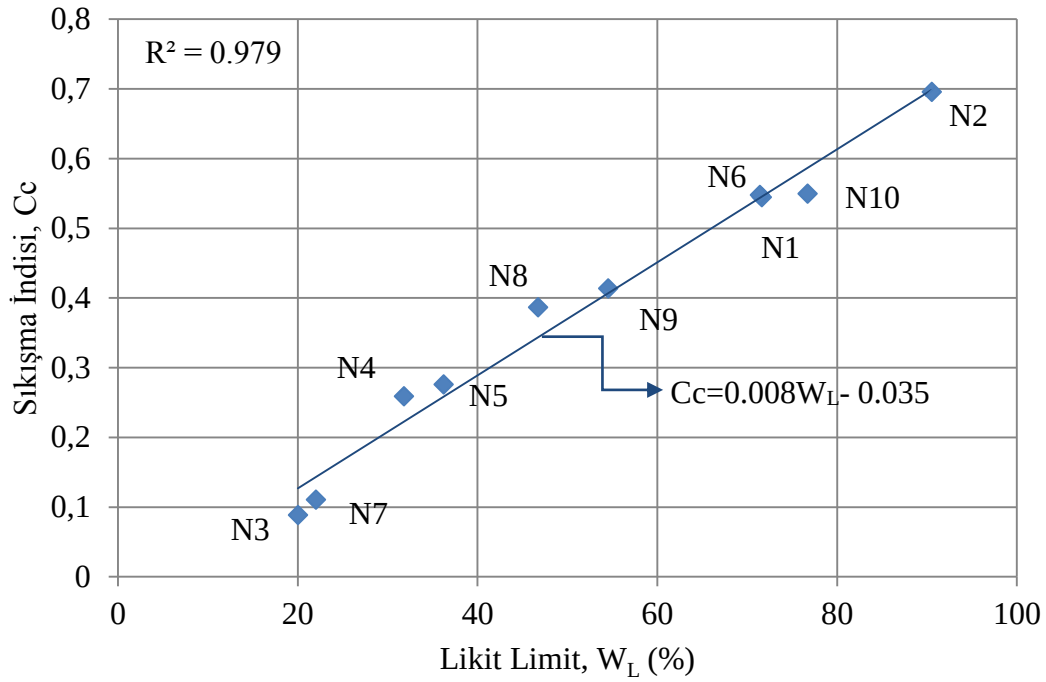
Bilindiği üzere denklem (8.4)'de I_p ilgili zeminin plastisite indisidir. Lineer bağıntıda regresyon katsayısı 0.973 olarak kabul edilebilir büyüklüktedir. Normal konsolide killi zeminlerin oturma özellikleri ile ilgili korelasyonlarda çoğunlukla zeminin plastisite indisi kullanılmaktadır. Ancak likit limit ve plastik limit deneylerinde gerçeğe daha uygun sonuç bulunabilmesi deneyleri yapan kişinin yeteneğine bağlıdır. Özellikle plastik limitin bulunmasındaki hatalı sonuç, plastisite indisinin hesabında biri, diğerinden çıkarıldığında hata miktarının daha da artmasına neden olacaktır.

Plastisite indisi I_p yerine bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında likit limit W_L ile sıkışma indisi C_c arasında bağıntının varlığı incelendiğinde bulunan sonuç Şekil 8.5'te görülebilmektedir.

Şekil 8.5'e göre bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarından likit limit ile sıkışma indisi arasında korelasyon katsayısı 0.979 olan lineer bağıntının bulunduğu görülmektedir. Sözü edilen bağıntı denklem (8.5) de gösterildiği biçimdedir.

$$C_c = 0.008(W_L) - 0.035 \quad (8.5)$$

W_L =zeminin likit limitidir.



Şekil 8.5 : Bir Boyutlu Deneylerde Likit Limit ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.

Konu ile ilgili literatürde yapılan çalışmalarda Kumbasar ve Kip (1999) normal konsolide killi zeminler için ilgili bağıntıyı denklem (8.6) da gösterildiği biçimde vermektedir.

$$C_c = 0.009(W_L - 10) \quad (8.6)$$

Yine aynı yayında ilgili formül örselenmiş zeminler için denklem (8.7) ile tanımlandığı biçimdedir.

$$C_c = 0.007(W_L - 10) \quad (8.7)$$

Skempton (1944) Londra Killeri ile yaptığı çalışmalarda sıkışma indisi formülünü denklem (8.7) ile tanımlandığı biçiminde bulmuştur.

Fransızlar Köprü ve Yol Merkez Laboratuvarında 55 farklı kil ile yapılan deney sonuçlarından ilgili bağıntıyı denklem (8.8) ile tanımlandığı şekilde bulmuşlardır (Caquot ve Kerisel, 1956).

$$C_c = 0.0035(W_L - 10) \quad (8.8)$$

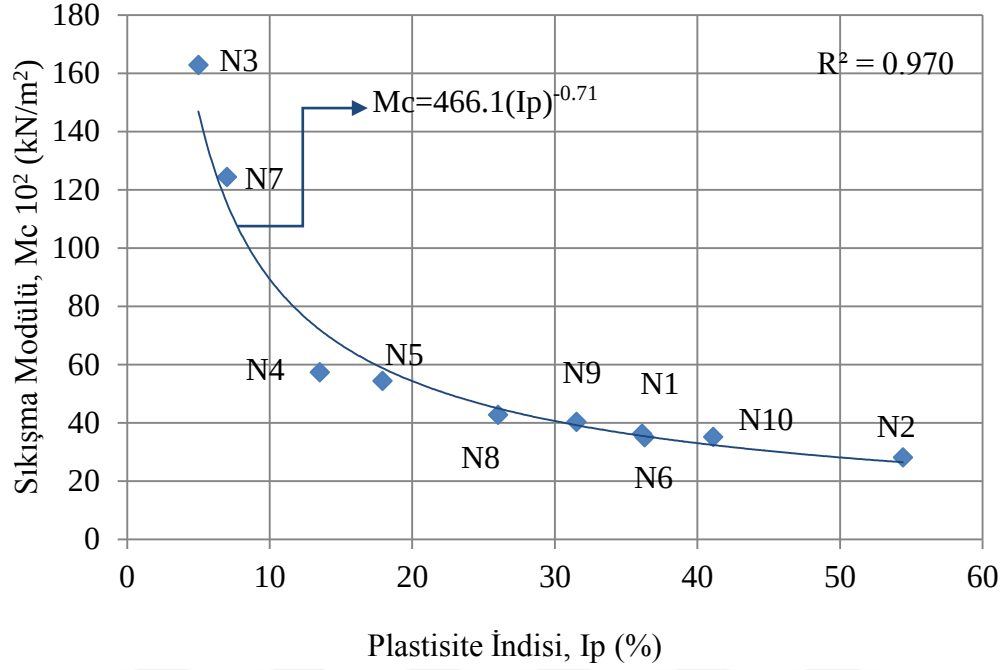
Standart ödometre deneyi sonuçlarına bağımlı çizilen oturma grafiklerinin 200 kPa basınç değerinden sonra doğru oldukları Şekil 8.1’de görülmektedir. Dolayısıyla 300 kPa-500 kPa gerilme aralığında hesaplanan sıkışma modülü ile ilgili zeminin plastisite indisi arasında herhangi bir bağıntının bulunup bulunmadığı da ayrıca araştırılmıştır. Bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarına ait sıkışma modülü ve plastisite indisi arasındaki korelasyon Şekil 8.6’da görülebilmektedir. Bu şekilden belirlenen bağıntı, üst fonksiyon biçiminde olup denklemi aşağıda verilmiştir.

$$M_c = 466,1(I_p)^{-0.71} \quad (8.9)$$

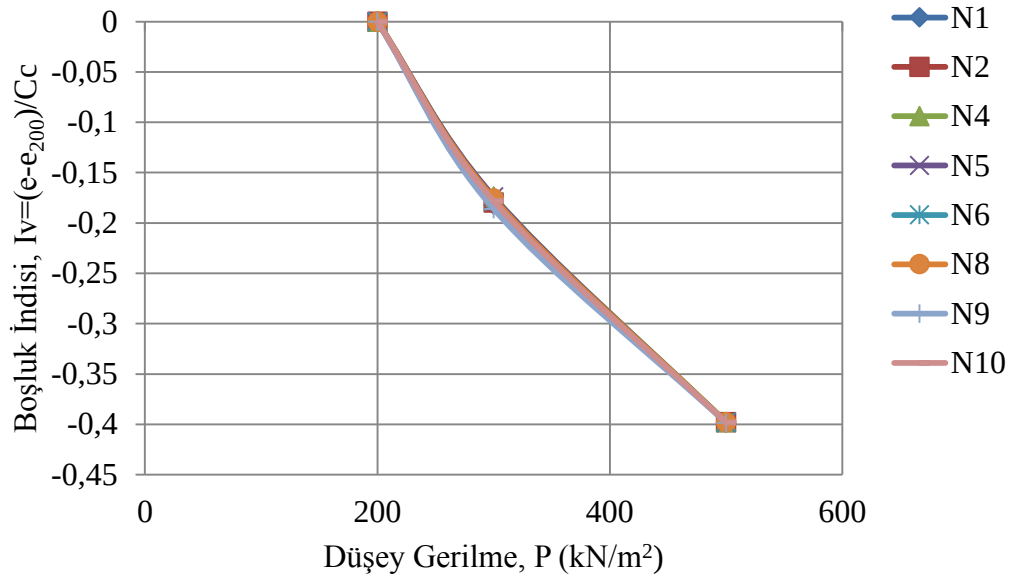
Bilindiği üzere I_p zeminin plastisite indisidir. İlgili denklemdeki korelasyon katsayısı 0,970 dir. Şekil 8.6’da N3 ve N7 (CL-ML) düşük plastisiteli kil veya silt zeminler dikkate alınmadığında diğer numuneler arasında doğrusal bağıntının bulunabileceği Şekil 8.6’da görülebilmektedir.

Bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları, yukarıda konu edilen formülü denklem (8.1) ile tanımlanan boşluk indisi ile normalize edildiğinde gözlenen sonuç Şekil 8.7’de görülmektedir. Oturma eğrilerinin doğru bölümleri normalize işleminde kullanılmıştır. Dolayısıyla denklem 8.1’de e_{100} yerine e_{200} dikkate alınmıştır. Benzer biçimde numunelerin etkisinde kaldıkları düşey gerilmelerdeki boşluk oranları e_{200} ’e eşit olduğunda boşluk indisi sıfır olacaktır.

Şekil 8.7’de numunelerin boşluk indisleri, düşey efektif gerilme değerleri sırasıyla 300 kPa ve 500 kPa iken hesaplanan boşluk oranları ile ilgili sıkışma indisleri kullanılarak (Çizelge 8.1) hesaplanmıştır. Çizelge 8.1’deki boşluk indisleri deney başıboşluk oranlarından hesaplanan değerlerdir.



Şekil 8.6 : Bir Boyutlu Deneylerde Plastisite İndisi ile Sıkışma Modülü Arasında Bağıntı.



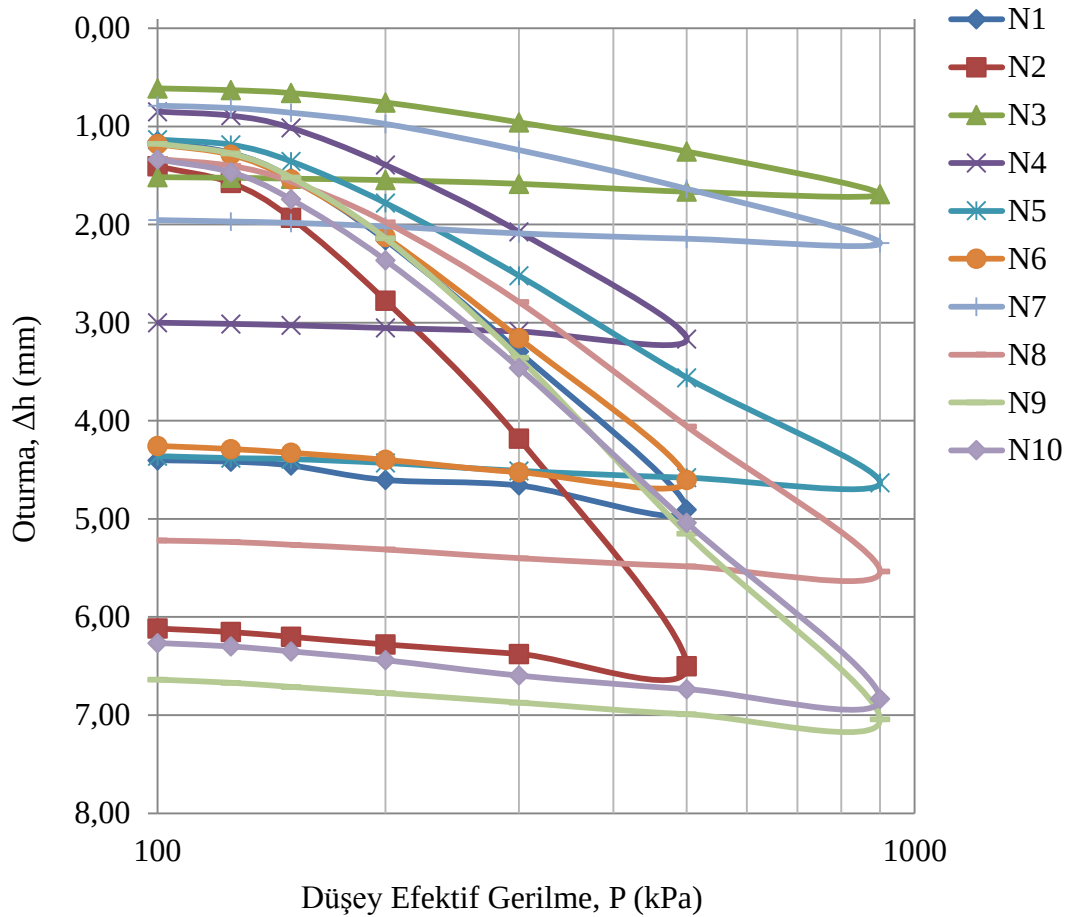
Şekil 8.7 : Ödometre Deney Sonuçlarının Boşluk İndisi ile Normalize Edilmesi.

Düşük plastisiteli kil veya silt (N3 ve N7) dikkate alınmadığında bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarının boşluk indisi ile normalize edilmesinin daha uygun olduğu ve zeminlerin genel durumları hakkında görüş verdiğine inanılmaktadır.

Ayrıca bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları ile yapılan korelasyonların uyumlu ve genel olarak lineer olduğu, ancak pratikte kullanılabilmeleri için daha çok

sayıda numune kullanılarak yapılan korelasyonların tercih edilmesinin uygun olacağı kabul edilmektedir.

Bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyleri bölümünde her numuneye ait, ayrı biçimde çizilen deney sonuçları, aynı numune ile yapılan deneylerin ortalaması biçiminde, bütün numunelerin oturma eğrileri, oturma- logaritma düşey efektif gerilme eksenlerinde Şekil 8.8’de görülebilmektedir. Eksenel gerilme artımlarında gerilme artımının uygulandığı bölgenin çevresinde şekil değiştirmeyi engelleyen ring bulunmadığından bu grup deneyler üç boyutlu kabul edilmektedir. Ancak çevre bölgede 100 kPa eksenel gerilme etkisinde bulunan zemin bulunmaktadır. Bu biçimde arazideki eksenel gerilme durumunun daha iyi model edildiğine inanılmaktadır.



Şekil 8.8 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge.

Bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları karşılaştırıldığında üç boyutlu oturma eğrilerinin bir boyutlu oturma eğrilerine nazaran hem düşük plastisiteli hem de yüksek plastisiteli olanlar bir bölgede bulunmaktadır. Ayrıca 10 farklı plastisite

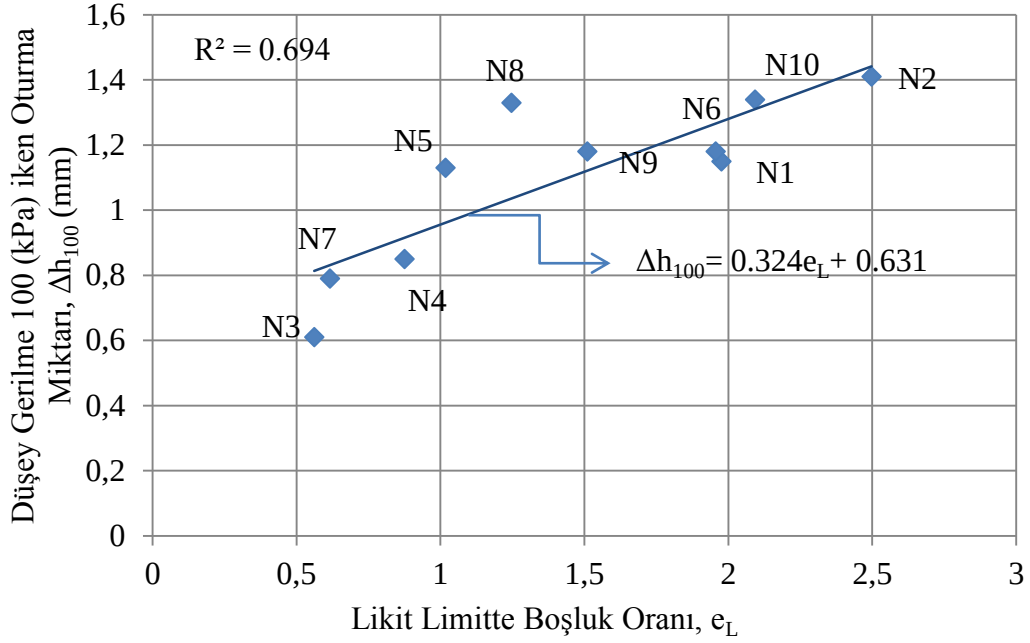
indisli numune kullanılarak yapılan deney sonuçlarında ortalama olarak bütün numunelerde 200 kPa~ 300 kPa gerilme değerinden daha büyük eksenel gerilme değerlerinde üç boyutlu oturma miktarları bir boyutlu oturma miktarlarından daha büyüktür. Yine 150~200 kPa gerilme değerinden daha büyük gerilme değerlerinde üç boyutlu oturma eğrilerinin eğimleri bir boyutlu eğrilerin eğimlerinden daha büyüktür. Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında merkez bölge oturma miktarları ile ilgili korelasyonlar için gerekli parametreler Şekil 8.8’de çizilen oturma eğrileri kullanılarak hesaplanıp Çizelge 8.2’de özetlenmiştir. Bu grup deney sonuçlarının değerlendirilmesinde boşluk oranı yerine oturma miktarları, gerek korelasyonlarda gerekse oturma eğrilerinin çiziminde kullanılmıştır.

Çizelge 8.2 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Merkez Bölge Oturma Miktarları.

Numune Numarası	Likit Limite e_L	P100(kPa) $\Delta h(\text{mm})$	P300(kPa) $\Delta h(\text{mm})$	P500(kPa) $\Delta h(\text{mm})$	S.İndisi C_c	I_p (%)
N1	1,976	1,15	3,30	4,90	7,212	36,3
N2	2,498	1,41	4,18	6,50	10,458	54,4
N3	0,562	0,61	0,96	1,26	1,530	5,0
N4	0,875	0,85	2,07	3,17	4,958	13,5
N5	1,017	1,13	2, 52	3,56	4,422	17,9
N6	1,956	1,18	3,16	4,60	6,491	36,1
N7	0,616	0,79	1,24	1,64	1,803	7,0
N8	1,247	1,33	2,79	4,06	5,725	24,7
N9	1.510	1.18	3.36	5.15	8.087	31.5
N10	2.093	1.34	3.46	5.04	7.115	41.1

Çizelge 8.2’de, e_L : likit limit değerinde boşluk oranı, $\Delta h(\text{mm})$: 100kPa iken oturma miktarı, $\Delta h(\text{mm})$: 300kPa iken oturma miktarı, $\Delta h(\text{mm})$: 500kPa iken oturma miktarı, C_c : sıkışma indisi, I_p : Plastisite indisi değerleridir.

Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında eksenel gerilme değeri 100 kPa iken hesaplanan oturma miktarları ile likit limitteki boşluk oranları arasında olası bağıntının bulunup bulunmadığı araştırılarak gözlenen sonuç Şekil 8.9’da çizilmiştir.



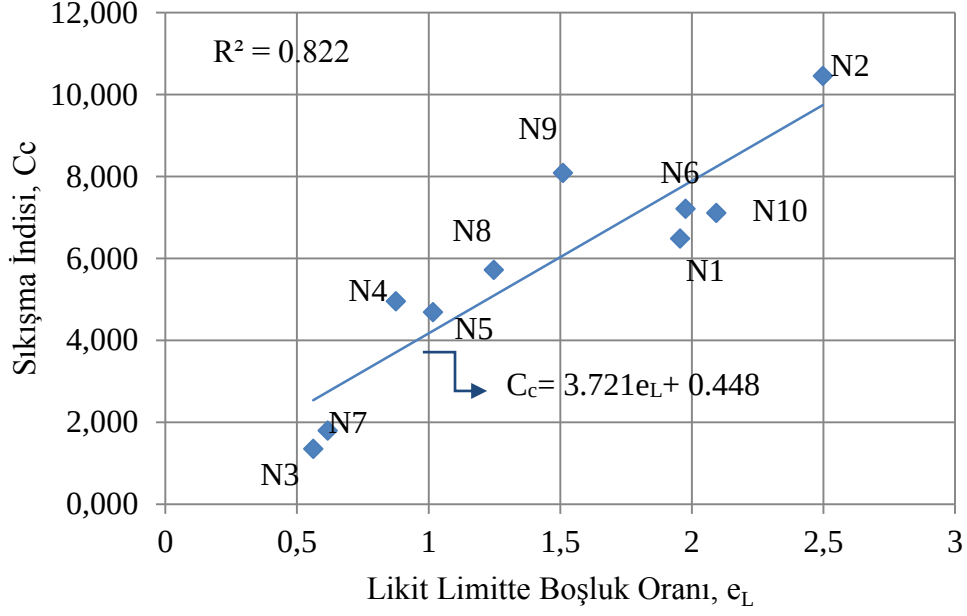
Şekil 8.9 : Likit Limitte Boşluk Oranı ve Düşey Gerilme 100 kPa İken Oturma Miktarı Arasında Bağntı.

Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde ön konsolidasyon basıncı öncesi zeminlerin oturma davranışları hakkında genel görüş verebileceği düşüncesi ile düşey gerilme 100 kPa iken bulunan oturma miktarları ile likit limitte boşluk oranları arasında bulunan bağntı denklem (8.10) ile tanımlanmıştır.

$$\Delta h_{100} = 0.324e_L + 0.631 \quad (8.10)$$

Korelasyon katsayısının Şekil 8.9’da görüldüğü üzere 0.694 olarak iyi değer olmadığı kabul edilmektedir. Bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları ile yapılan korelasyon katsayısı (0.966) ile karşılaştırıldığında ilgili bağntının iyi olmadığı görülmektedir. Oysa bir boyutlu konsolidasyon deneylerinde numune hazırlanması esnasında ring ile zemin arasında oluşan örselenmeler oturma eğrilerini etkilemektedir. Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrilerinin, bir boyutlu oturma eğrilerine nazaran daha düzenli davranış gösterdikleri ilgili grafiklerden görülmektedir.

Bir boyutlu deney sonuçları kullanılarak yapılan korelasyonlara benzer biçimde üç boyutlu deney sonuçlarında da sıkışma indisi ile likit limitteki boşluk oranı arasında bağntının varlığı incelenerek temin edilen sonuç Şekil 8.10’da çizilmiştir.



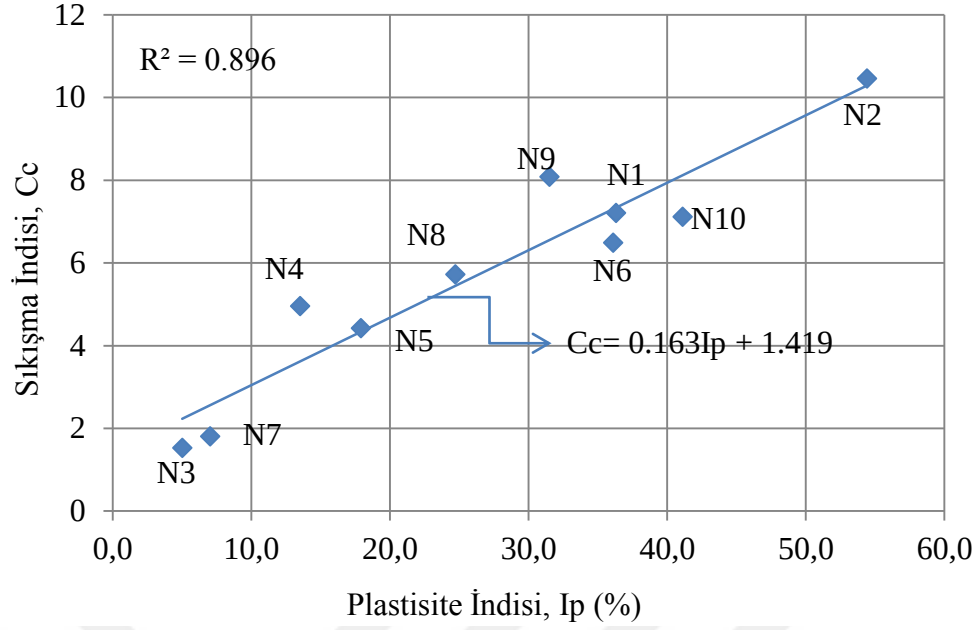
Şekil 8.10 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Likit limitte Boşluk Oranı ve Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.

Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde sıkışma indisi ile likit limitteki boşluk oranı arasında belirlenen bağntının korelasyon katsayısı 0.822 olarak, bir boyutlu deney sonuçlarından temin edilen değerinden (0.976) bir miktar daha küçüktür.

$$C_c = 3.721e_L + 0.448 \quad (8.11)$$

Denklem (8.11)'de e_L zeminin likit limitteki boşluk oranıdır.

Benzer biçimde üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında da sıkışma indisi ile plastisite indisi arasında bağntının varlığı araştırılarak temin edilen sonuç Şekil 8.11' de görülmektedir. Korelasyon katsayısı 0.896 olan bağntı, denklem (8.12) ile gösterilmiştir. Bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ilgili değer 0.973 olarak biraz daha büyük bulunmuştur.



Şekil 8.11 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Plastisite İndisi ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.

$$C_c = 0.163(I_p) + 1.419 \quad (8.12)$$

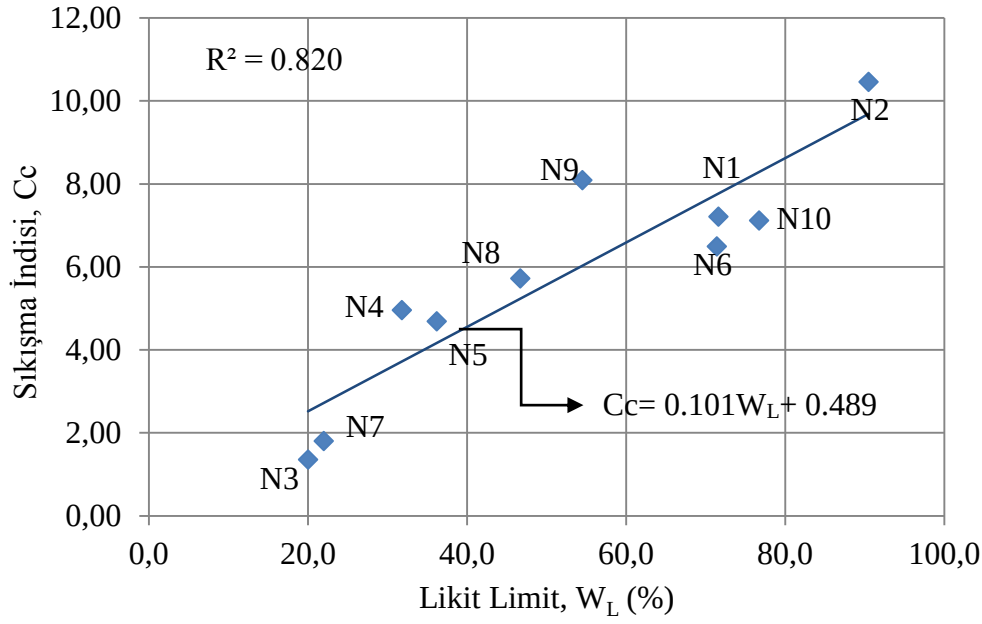
Denklem (8.12)' de I_p bilindiği üzere zeminin plastisite indisidir.

Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında, bir boyutlu deney sonuçlarına benzer biçimde likit limit ile sıkışma indisi arasında olası bağıntının varlığı araştırıldığında gözlenen sonuç Şekil 8.12'de görüldüğü biçimdedir. İlgili bağıntı denklem (8.13) ile gösterilmiştir.

$$C_c = 0.101(W_L) + 0.489 \quad (8.13)$$

Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında likit limit ile sıkışma indisi arasında lineer bağıntının bulunduğu ve korelasyon katsayısının 0.820 olduğu Şekil 8.12'de görülmektedir. Diğer korelasyon sonuçlarına benzer biçimde ilgili katsayı bir boyutlu deney sonuçlarından bulunan değerinden bir miktar küçüktür.

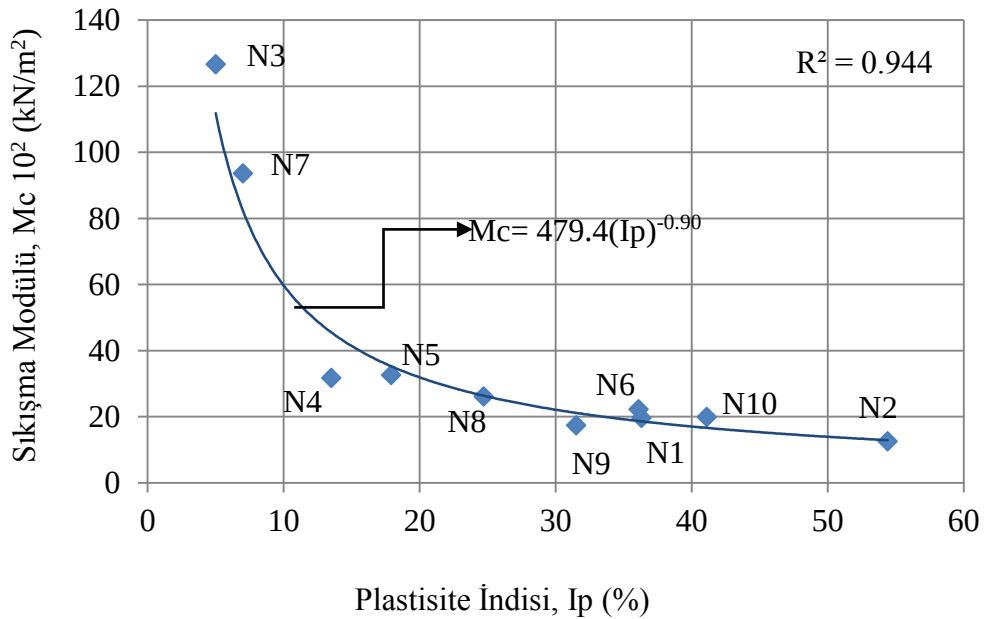
Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrilerinin yaklaşık 200 kPa gerilme değerinden sonra bir boyutlu deney sonuçlarına benzer biçimde doğru oldukları Şekil 8.8'de görülmektedir. Bu grup deney sonuçları kullanılarak 300 kPa – 500 kPa gerilme aralığında numunelerin sıkışma modülleri hesaplanmıştır. Sıkışma modülleri ile plastisite indisleri arasında bağıntının varlığı araştırılarak belirlenen sonuç Şekil 8.13'de gösterilmiştir.



Şekil 8.12 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Likit Limit ile Sıkışma İndisi Arasında Bağntı.

Belirlenen bağntı üst fonksiyon biçiminde olup denklemleri aşağıda tanımlanmaktadır. Regresyon katsayısı 0.944 olarak diğer bağntılara benzer biçimde, bir boyutlu deney sonuçlarından belirlenen ilgili bağntının katsayısı 0.970 ile karşılaştırıldığı da yine daha küçüktür.

$$M_c = 479.4(I_p)^{-0.90} \quad (8.14)$$

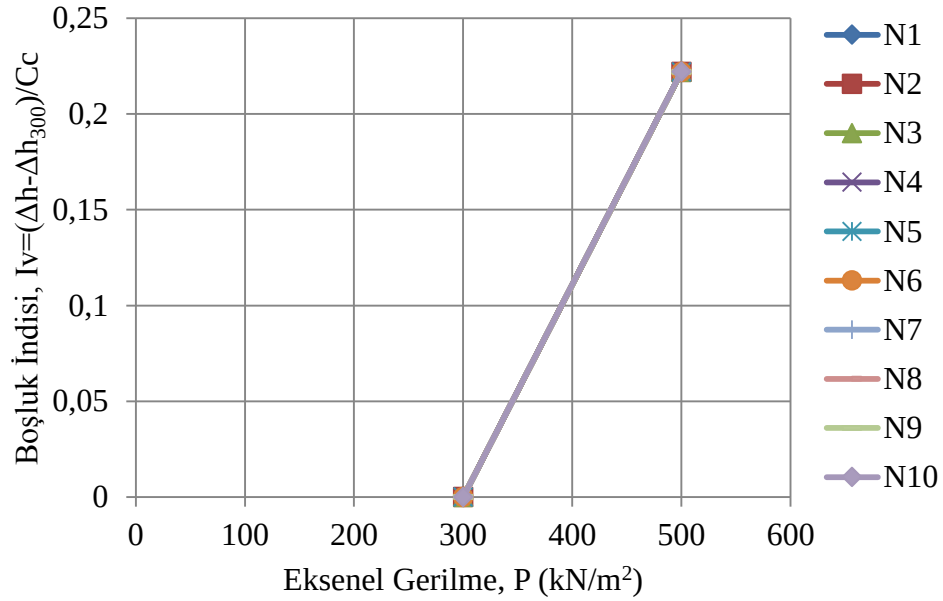


Şekil 8.13: Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneylerinde Plastisite İndisi ile Sıkışma Modülü Arasında Bağntı.

Bir boyutlu deney sonuçlarına benzer biçimde N3 ile N7 dikkate alınmadığında ilgili bağıntının lineer olabileceği Şekil 8.13’de görülebilmektedir.

Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları da bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarına benzer biçimde denklem (8.1) ile tanımlanan boşluk indisi ile normalize edilmiştir. Ancak ilgili formülde boşluk oranı yerine oturma miktarları kullanılmıştır. Üç boyutlu merkez bölge oturma eğrileri boşluk indisi ile normalize edildiğinde gözlenen sonuç Şekil 8.14’de görüldüğü biçimdedir.

Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarının boşluk indisi ile normalize edilmesinde boşluk oranı yerine oturma miktarlarının kullanılması dolayısıyla bu işlemde boşluk indisi 0 ile 1 arasında değişim göstermektedir. Şekil 8.8’de görülebilen oturma eğrilerinin yaklaşık 200 kPa eksenel gerilme değerinden sonra doğru olmaları dolayısıyla boşluk indisleri 300 ve 500 kPa eksenel gerilme değerlerinde hesaplanmıştır. Bütün numunelerde 900 kPa eksenel gerilme uygulanmadığı için bu basınç değerinde boşluk indisi hesaplanmamıştır.



Şekil 8.14 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçlarının Boşluk İndisi ile Normalize Edilmesi.

Bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları kullanılarak likit limitteki boşluk oranı, düşey efektif gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranı, sıkışma indisi, plastisite indisi, sıkışma modülü arasında araştırılan korelasyon sonuçlarından bir boyutlu deney sonuçlarında bulunan denklemlerin, üç boyutlu deney sonuçlarında

bulunan denklemlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Her iki grup deney sonucu kullanılarak yapılan korelasyonlar Çizelge 8.3’de görülebilmektedir.

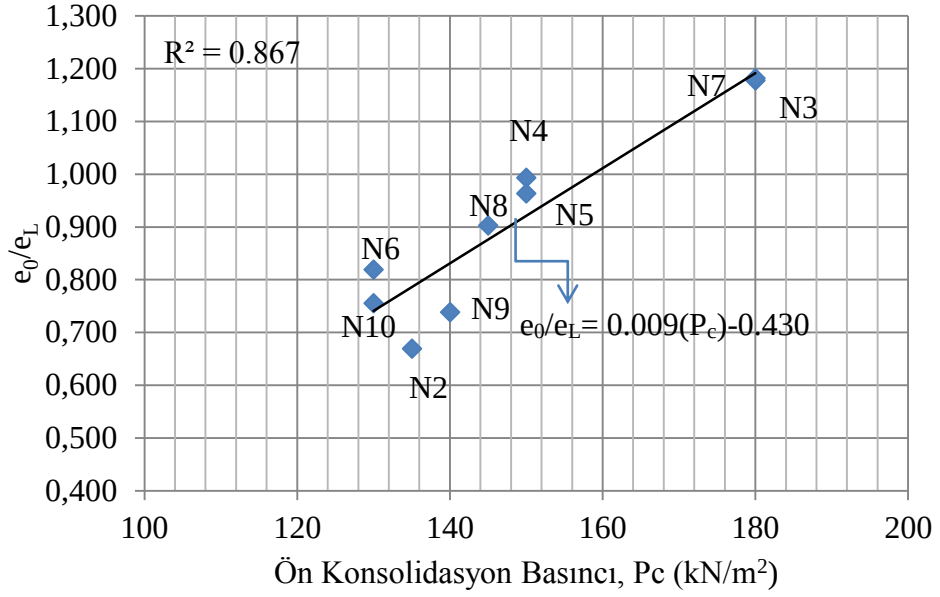
Çizelge 8.3 : Bir ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Deney Sonuçları ile Korelasyonlar.

Bir Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri	Regresyon Katsayısı	Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyleri	Regresyon Katsayısı
$e_{100}=0.525e_L+0.311$	0.966	$\Delta h_{100}=0.324e_L+0.631$	0.694
$C_c=0.296e_L-0.037$	0.976	$C_c=3.721e_L+0.448$	0.822
$C_c=0.012I_p+0.053$	0.973	$C_c=0.163I_p+1.419$	0.896
$C_c=0.008W_L-0.035$	0.979	$C_c=0.101W_L+0.489$	0.820
$M_c=466,1(I_p)^{-0.71}$	0.970	$M_c=479,4(I_p)^{-0.90}$	0.944

Korelasyon sonuçlarından görüldüğü üzere, plastisite indisi- sıkışma modülü dışında diğer bağıntılar lineerdir. Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre CL-ML olarak isimlendirilen N3 ile N7 ilgili şekillerde dikkate alınmadığı durumda bu bağıntıların da doğrusal olabileceği görülmektedir.

Regresyon katsayılarının bir boyutlu deney sonuçlarında genel olarak 0,97 dolaylarında olduğu Çizelge 8.3’de görülebilmektedir. Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ise eksenel gerilme 100 kPa iken oturma miktarı ile likit limitteki boşluk oranı arasındaki bağıntı dışında diğerlerinin regresyon katsayıları 0.8~0.9 dolaylarındadır. Dolayısıyla sınıflandırma ve oturma özellikleri arasındaki ilgili korelasyonların çok kötü olmadığı söylenebilmektedir.

Bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ayrıca likit limitteki boşluk oranı ile normalize edilen deney başı boşluk oranları (e_0/e_L) ile ön konsolidasyon basıncı arasında olası bağıntıların bulunup bulunmadığı da araştırılmıştır. Üç boyutlu deney aleti ile yapılan ödometre deneyi sonuçlarında Casagrande yöntemi ile belirlenen ön konsolidasyon basınçları ile e_0/e_L arasındaki bağıntı Şekil 8.15’de görülebilmektedir. İlgili korelasyon denklem (8.15)’te tanımlandığı biçimdedir.



Şekil 8.15 : Casagrande Yöntemi ile Belirlenen Ön Konsolidasyon Basıncıları ile e_0/e_L Arasında Bağıntı.

$$\frac{e_0}{e_L} = 0.009(P_c) - 0.430 \quad (8.15)$$

Denklem (8.15)'te bilindiği üzere,

e_0 : konsolidasyon deneyi başlangıç boşluk oranı,

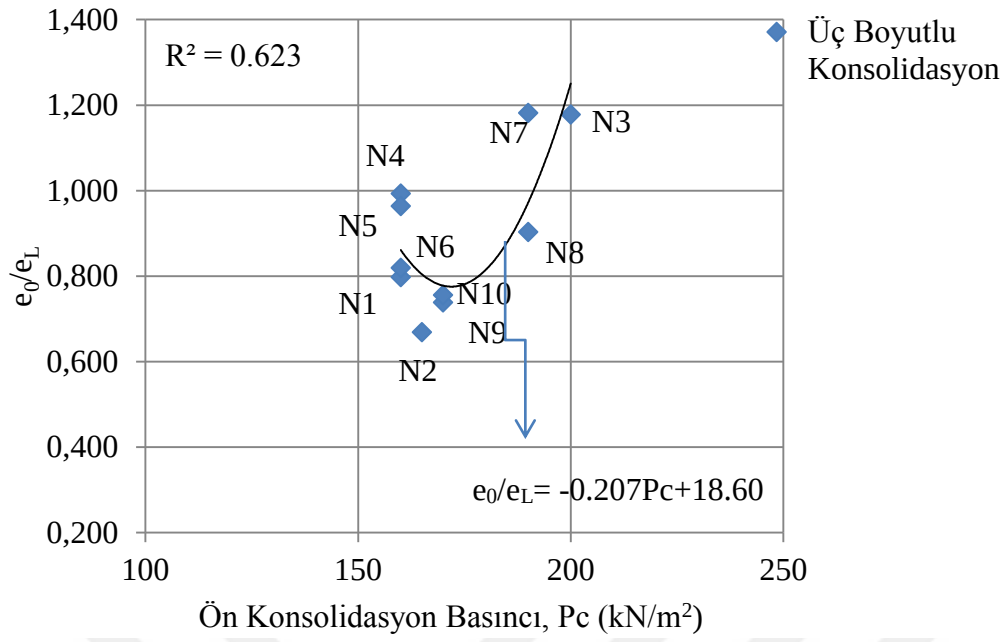
e_L : likit limitte boşluk oranı,

P_c : ön konsolidasyon basıncıdır.

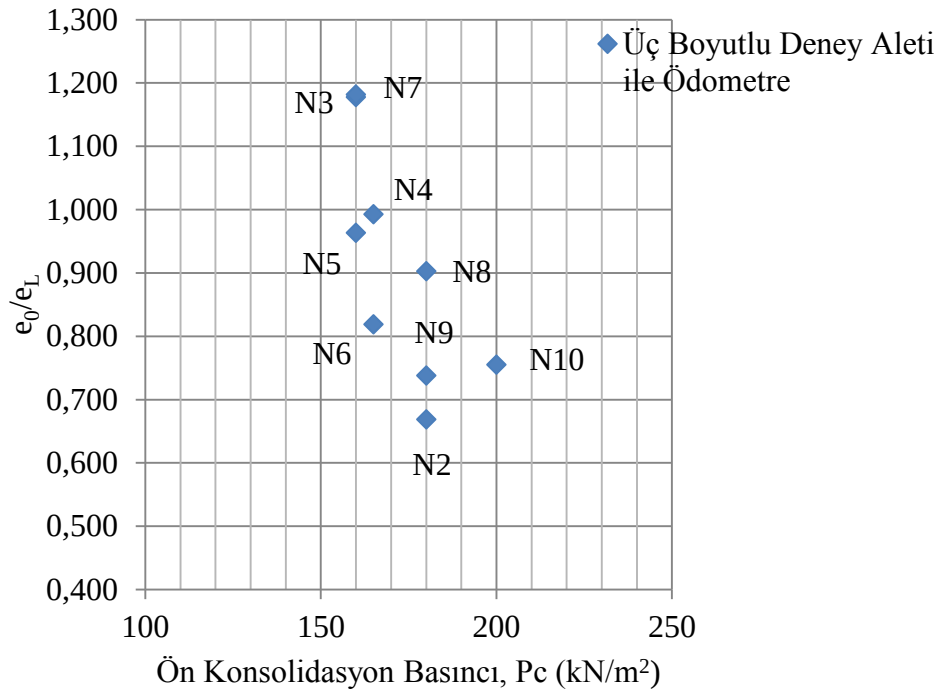
Benzer biçimde üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında Casagrande yöntemi ile belirlenen ön konsolidasyon basınçları ile e_0/e_L arasındaki bağıntı Şekil 8.16'da görülebilmektedir. Açıklanan bağıntı denklem (8.16) ile gösterilmiştir.

$$\frac{e_0}{e_L} = -0.207(P_c) + 18.6 \quad (8.16)$$

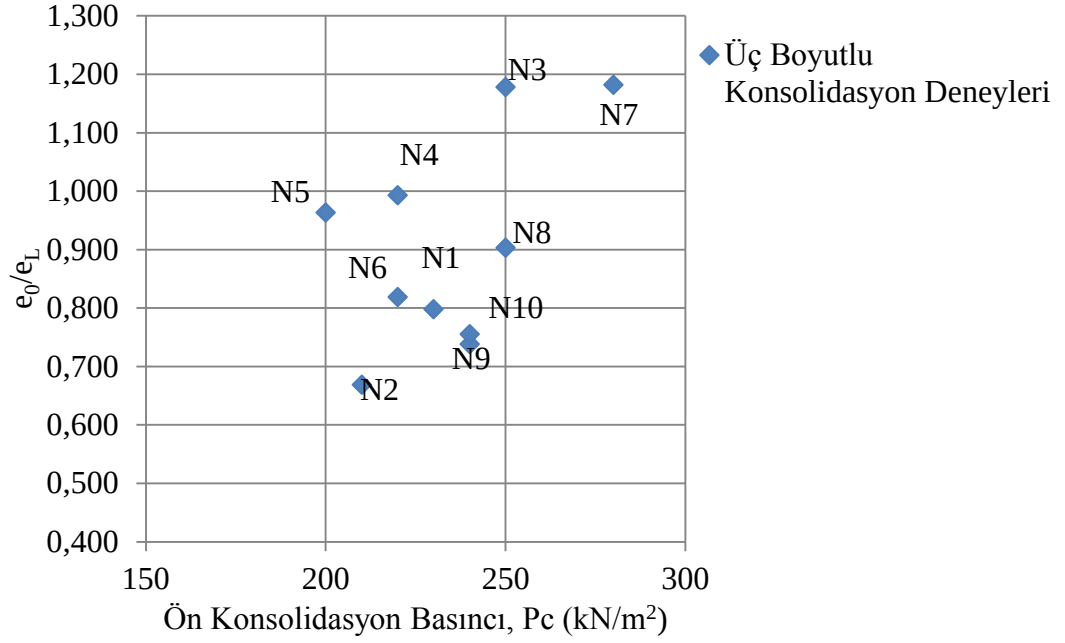
İlgili bağıntının korelasyon katsayısı 0.623 olarak yeterli değildir. Ayrıca korelasyonda kullanılan numune sayısının da yeterli olmadığı kabul edilmektedir. Örnek olması amacı ile üç boyutlu deney aleti ile yapılan ödometre ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemine göre bulunan ön konsolidasyon basınçları ile e_0/e_L arasındaki bağıntılar sırasıyla Şekil 8.17 ve Şekil 8.18'de gösterilmiştir.



Şekil 8.16: Casagrande Yöntemi ile Belirlenen Ön Konsolidasyon Basınçları ile e_0/e_L Arasında Bağntı.



Şekil 8.17: Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Belirlenen Ön Konsolidasyon Basınçları ile e_0/e_L Arasında Bağntı.



Şekil 8.18: Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Belirlenen Ön Konsolidasyon Basıncı ile e_0/e_L Arasında Bağntı.

Sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemi ile belirlenen ön konsolidasyon basınçları ile e_0/e_L arasında düzenli davranışın bulunmadığı Şekil 8.17 ve Şekil 8.18'den görülebilmektedir. Korelasyon sayılarının 0.5 dolaylarında bulunması nedeni ile denklemler grafiklerde gösterilmemiştir.

Benzer biçimde gerek standart ödometre gerekse üç boyutlu deney aleti ile yapılan ödometre deneyi sonuçlarında $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine dayalı belirlenen ön konsolidasyon basınçları ile e_0/e_L arasında olası bağıntıların varlığı da araştırılmıştır. Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde yanal yönde numunenin yer değiştirmesine izin verilmesi dolayısıyla bu grup deney sonuçları boşluk oranına göre değerlendirilmemiştir. Dolayısıyla üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ön konsolidasyon basınçları bilindiği üzere $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine göre belirlenmemiştir. Ön Konsolidasyon Basıncı bölümünde detaylı biçimde açıklandığı üzere her iki deney aleti ile yapılan ödometre deneyi sonuçlarında $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine göre ön konsolidasyon basınçları pek çok numunenin aynı değer olarak bulunmuştur. Açıklamalara bağımlı kalınarak her iki grup deney sonuçlarında $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemi ile belirlenen ön konsolidasyon basınçları ile e_0/e_L arasında da düzenli bağıntılar bulunamamıştır. Dolayısıyla korelasyonların grafikleri ayrıca gösterilmemiştir. Benzer biçimde korelasyon denklemleri ile katsayılarından da söz edilmemiştir.



9. SONUÇLAR

Zemin yapısındaki olası farklılıkların deney sonuçlarını etkileyebileceği düşüncesiyle konsolidasyon deneylerinin yapımında çoğunlukla laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Ayrıca örselenmemiş iki numune ile de bir boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler birleşik zemin sınıflandırma yöntemine göre A doğrusuna yakın bulunmaktadır.

Çamur konsolidasyon aletinde 125 kPa eksenel basınç değerinde konsolide edilerek hazırlanan numuneler ile yeterli sayılarda ödometre ve üç boyutlu konsolidasyon deneyleri üç boyutlu ve standart deney aletleri kullanılarak yapılmıştır. Üç boyutlu deneylerde önceden söz edildiği üzere merkez bölge çapı 50 mm dir. Deney esnasında çevre bölgede arazide var olduğu kabul edilen 100 kPa düşey gerilme bulunmaktadır. Bu durumda merkez bölgeye standart gerilme artımları uygulanmıştır. Deneysel çalışma süresinde plastisite indisleri farklı 10 numune ile yapılan konsolidasyon deneyi sonuçlarından genel olarak numunelerin gruplarına bağımlı kalınarak, yaklaşık 200 kPa~300 kPa basınç değerlerinden daha büyük gerilmelerde üç boyutlu oturma miktarlarının, ödometre oturma miktarlarından daha büyük oldukları bulunmuştur. Düşük plastisiteli siltli numunelerde oturma miktarları, yüksek plastisiteli killi numuneler ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür. Deney başlangıç su muhtevasının likit limit dolaylarında bulunması nedeni ile numune hazırlama aşamasında örselenme olabileceği düşüncesi ile N3 iki defa çamur konsolidasyon aletinde hazırlanarak konsolidasyon deneylerinin yapımında kullanılmıştır. İki ayrı biçimde çamur konsolidasyon aletinde hazırlanan numunelerden benzer oturma davranışları gözlenmiştir. N3'e benzer biçimde N1 ve N2'de çamur konsolidasyon aletinde 2 defa hazırlanıp konsolidasyon deneyleri yapımında kullanılmışlardır. Çamur konsolidasyon aletinde 2 defa hazırlanan bu numunelerden de benzer oturma davranışları bulunmuştur.

Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre N3 ile N7 (CL-ML) aynı grupta olmalarına rağmen bir ve üç boyutlu konsolidasyon davranışlarında farklılık

görülmektedir. N7'nin standart ödometre ve üç boyutlu aletten gözlenen bir boyutlu oturma eğrileri, biri birinin ötelenmesi biçimindedir. Yaklaşık 200 kPa basınç değerinden sonra üç boyutlu oturma miktarları bir boyutlu oturma miktarlarından daha büyüktür. Yine 200 kPa basınç değerinden sonra üç boyutlu oturma grafiğinin eğimi ödometre oturma grafiğinin eğiminden daha büyüktür.

Üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları karşılaştırıldığında, oturma miktarları her basınç kademesinde bir boyutlu deney sonuçlarından bulunan değerlerinden daha büyüktür. Oturma eğrilerinin eğimine bakıldığında, üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında 10 farklı numune sonucuna dayalı olarak yaklaşık 150 kPa~ 200 kPa basınç değerlerinden sonra oturma eğrilerinin eğimleri bir boyutlu oturma eğrileri eğimlerinden daha büyüktür. İlgili sonuçta daha büyük oturma miktarları anlamındadır.

Bilindiği üzere ince daneli zeminlerin plastisite indisleri arttıkça boşluk oranlarının büyük olması sebebi ile oturma miktarları da büyük olmaktadır. Ortalama plastisite indisleri yaklaşık aynı olan N1 ile N6'nın deney sonuçlarından yaklaşık aynı oturma miktarları bulunmuştur. Yüksek plastisiteli numunelerin oturma davranışları, düşük plastisiteli numunelere oranla daha düzenlidir.

Üç boyutlu deney aleti ve standart ödometre deney aleti kullanılarak yapılan bir boyutlu konsolidasyon deneylerinden yalnızca N6'dan aynı sonuç gözlenmiştir. Diğer numunelerin deney sonuçlarında, bir boyutlu oturma eğrilerinin birbirlerinin ötelenmesi biçiminde oldukları görülmüştür.

Araziden değişik yöntemler ile numunelerin alınması, laboratuarlara taşınmaları, laboratuarlarda saklanmaları ve laboratuvar deneyleri için hazırlanmaları aşamalarında istenilirse de örselenmeler olmaktadır. Konu edilen örselenmeler oturma eğrilerini etkilemektedir. Dolayısıyla laboratuvar deney sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrileri eksenel gerilmenin belirli bir değerinden sonra yarı logaritmik eksenlerde doğrudur. Bilindiği üzere yarı logaritmik eksenlerde arazi oturma eğrisi doğrudur.

Bu deneysel çalışmada da bir boyutlu deney sonuçlarında yaklaşık 200 kPa gerilme değerinden sonra, üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ise 300 kPa basınç değerinden daha büyük gerilme değerlerinde oturma eğrileri yarı logaritmik eksenlerde doğrudur. İlgili sonuca bağımlı kalınarak 300 kPa ~500 kPa gerilme değerinde bir ve üç boyutlu konsolidasyon deney sonuçları yardımı ile numunelerin

sıkışma modülleri hesaplanmıştır. 10 farklı ince daneli zeminin kullanıldığı deney sonuçlarından, üç boyutlu sıkışma modüllerinin, ödometre sıkışma modüllerinin 0.5~0.75 katı oldukları görülmüştür. Düşük plastisiteli kil- silt olarak isimlendirilen N3 ile N7 dikkate alınmadığında ilgili oranların literatürde konu ile ilgili verilen katsayılara daha iyi uyum gösterdikleri gözlenmiştir.

Üç boyutlu konsolidasyon deneylerinde çevre bölgede simetrik iki ayrı noktada ölçüm yapılmıştır. Çalışma süresince yapılan tüm üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında çevre bölgede, merkez bölgeye uygulanan gerilme artımları esnasında küçük miktarlarda oturmalar görülürken, merkez bölgeye uygulanan ilave gerilmelerin geri alınması aşamasında ise oturma miktarlarının yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür.

İnce daneli zeminlerin oturma özelliklerinin araştırıldığı deneysel çalışmada örselenmemiş numuneler kullanılarak da bir boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyon eğrileri oturma, logaritma düşey efektif gerilme eksenlerinde çizildiğinde, örselenmemiş numunelerin oturma eğrilerinin laboratuarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin oturma eğrilerinin üzerinde bulundukları gözlenmiştir.

Yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin kabarma indislerinin örselenmemiş numunelerin kabarma indislerine oranı literatürde yapılan çalışmalarda kabarma hassaslığı olarak tanımlanmaktadır. İlgili oran örselenmemiş numunelerde daneler arası bağ kuvvetleri hakkında bilgi vermektedir. Bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında konu edilen oran hesaplanmış ve her iki numunede de 0.5'den büyük olduğu bulunmuştur.

Örselenmemiş numunelerde olası örselenmelerin bulunması dolayısıyla Casagrande yöntemine göre ön konsolidasyon basınçlarının belirlenmesinin kolay olmadığı durumlarda olası diğer yöntemlerin kullanımları çalışmada gözden geçirilmiştir. Yeniden konsolide edilerek hazırlanan numuneler çamur konsolidasyon aletinde konsolide edildikten sonra bu aletten alınıp konsolidasyon deneylerinin yapımında kullanılmışlardır. Dolayısıyla aşırı konsolide davranış görülebilmektedir. Ayrıca arazideki özelliklerini yeniden hazırlama aşamasında tamamen kaybetmemektedirler. Çalışmada hem standart ödometre hem de üç boyutlu deney aleti ile yapılan ödometre deneyi sonuçları $\ln(1+e)$, logaritma düşey efektif gerilme eksenlerinde çizildiğinde oturma eğrilerinin yaklaşık iki doğru oldukları görülmüştür. İki

doğrunun kesim noktası ön konsolidasyon basıncı olarak tanımlanmaktadır. Açıklandığı biçimde her iki grup deney sonuçlarında $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemine dayalı ön konsolidasyon basınçları N7 dikkate alınmadığında genel olarak 125 kPa~150 kPa gerilme aralığında bulunmuştur.

Üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında deney yönteminin ön konsolidasyon basıncına etkisinin görülebilmesi amacı ile Casagrande yöntemine göre ön konsolidasyon basınçları belirlenmiştir. Bir boyutlu deney sonuçlarında Casagrande yöntemine göre ön konsolidasyon basınçları 130 kPa~180 kPa gerilme aralığında bulunurken üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında 160 kPa~200 kPa gerilme aralığında bulunmuştur.

Sıkışma modülü- logaritma düşey gerilme yöntemine göre ön konsolidasyon basınçları, standart ödometre deney aleti ile yapılan bir boyutlu deneylerde 125 kPa~180 kPa olarak bulunurken, üç boyutlu deney aleti kullanılarak yapılan aynı grup deneylerden 160 kPa~200 kPa olarak bulunmuştur. En büyük ön konsolidasyon basınçları sıkışma modülü- logaritma düşey gerilme yöntemine dayalı olarak üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında 200 kPa~280 kPa gerilme aralığında bulunmuştur. Bu yöntemle dayalı belirlenen ön konsolidasyon basınçları, genel olarak $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme ve Casagrande yöntemleri ile belirlenen değerlerinden daha büyüktür. En küçük ön konsolidasyon basınçları $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yönteminden bulunurken bu değerleri Casagrande yöntemi ile belirlenen değerler izlemektedir.

Örselenmemiş numunelerin deney sonuçlarında da ön konsolidasyon basınçları yukarıda açıklanan yöntemler ile belirlenmiştir. Örselenmemiş numunelerin deney sonuçlarında belirlenen ön konsolidasyon basınçlarının, yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin deney sonuçlarından bulunan değerlerinden daha büyük oldukları görülmüştür.

Sıkışma modülü- logaritma düşey gerilme yönteminde eksenel gerilmenin logaritmik çiziminin uygun olmadığı literatürde konu ile ilgili çalışmalarda belirtilmektedir. İlgili yöntemde gerilme eksenini aritmetik eksen olarak dikkate alındığında ön konsolidasyon basıncı gerilme aralığı olarak tanımlanmaktadır. Yapılan deney sonuçları aritmetik eksenlerde çizilip ilgili ön konsolidasyon basıncı gerilme aralıkları bulunmuştur. $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme, Casagrande ve sıkışma modülü-logaritma düşey gerilme yöntemleri ile bulunan ön konsolidasyon

basınçlarının tanımlanan aralıkta bulundukları gözlenerek sonuçların uygun olduğu kabul edilmektedir. $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemi bilindiği üzere oturma eğrisinin düzeltilmesine olanak sağlamamaktadır. Ön konsolidasyon basıncının bulunmasında en uygun yöntemin Schmertman düzeltmesi olduğu kabul edilerek iki örselenmemiş numune ile yapılan ödometre deneyi sonuçlarında Schmertman yöntemi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına bağımlı çizilen oturma eğrilerinin sıkışma indislerinin Schmertman yöntemi ile düzeltilen oturma eğrilerinin sıkışma indislerinden oldukça küçük oldukları görülmüştür.

Dolayısıyla ön konsolidasyon basıncı ile ilgili açıklamalara bağımlı olarak, ön konsolidasyon basıncının, deneylerde kullanılan numunelerin tiplerine, deney yöntemlerine ve hesaplama yöntemlerine bağımlı olduğunu söyleyebiliriz.

Zeminlerin sınıflandırma özellikleri kullanılarak oturma özelliklerinin matematiksel formüller yardımı ile belirlenebildiği bilinmektedir. Dolayısıyla çalışmada sınıflandırma ve oturma özellikleri arasında da korelasyonların varlığı araştırılmıştır. Ödometre deneyi sonuçlarında düşey gerilme 100 kPa iken hesaplanan boşluk oranı ile likit limitteki boşluk oranı arasında ve yine likit limitteki boşluk oranı ile sıkışma indisi arasında olası bağıntıların varlığı araştırılmıştır. Bunlara ilave olarak plastisite indisi ile sıkışma indisi, sıkışma indisi ile likit limit ve sıkışma modülü ile plastisite indisi arasında da korelasyonların varlığı her iki grup deney sonucunda araştırılmıştır. Bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında ilgili bağıntılar doğrusal olarak bulunmuştur. Her iki grup deney sonucunda da sıkışma modülü ile plastisite indisi arasındaki bağıntılar lineer değildir. Korelasyonların uyumlu olduğu, korelasyon katsayılarının yeterli büyüklükte olması dolayısıyla söylenebilmektedir. Ancak pratik te kullanılabilimleri için daha fazla sayıda numunenin ilgili korelasyonda kullanıldığı bağıntıların tercih edilmesi gerektiğine inanılmaktadır.

Üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında boşluk oranı yerine merkez bölge oturma miktarları ilgili korelasyonlarda kullanılmıştır. Bir boyutlu bağıntıların regresyon katsayıları üç boyutlu deney sonuçlarından bulunan regresyon katsayılarından daha büyüktür. Uygulamada kullanılabilimleri için olanaklar müsait olduğunda deney yapılarak ilgili zeminin oturma özelliklerinin bulunması gerektiğine inanılmaktadır.

Ayrıca Burland (1990)'da tanımlanan boşluk indisi parametresi ile bir ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçları normalize edilmiştir. Oturma eğrilerinin normalize

edilmesinin gerek bir gerekse üç boyutlu deney sonuçlarında uygun olduğu söylenebilir. Numunelerin deney başlangıç boşluk oranları likit limitteki boşluk oranları ile normalize edilmiştir. Yukarıda açıklanan üç farklı yöntem ile belirlenen ön konsolidasyon basınçları ile e_0/e_L arasında da olası bağıntıların varlığı araştırılmıştır. En iyi bağıntılar üç boyutlu deney aleti ile yapılan ödometre ve üç boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarında Casagrande yöntemi ile belirlenen ön konsolidasyon basınçları ile e_0/e_L arasında bulunmuştur. Sıkışma modülü ve $\ln(1+e)$ -logaritma düşey gerilme yöntemleri ile belirlenen ön konsolidasyon basınçları ile e_0/e_L arasında araştırılan bağıntıların korelasyon katsayıları yeterli büyüklükte bulunamamıştır.



KAYNAKLAR

- Adıyaman, İ. B.** (2005). *Üç Boyutlu Konsolidasyon Deney Sistemi*, (Yüksek Lisans Tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alshibli, K. A. ve Sture, S.** (2000). Shear Band Formation in Plain Strain. Experiments of Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6) pp 495-503.
- Atkinson, J.** (2007). *The Mechanics of Soils and Foundations*, 2nd Edition, Taylor & Francis. London and New York.
- Baek, W. ve Moriwaki, T.** (2004). Internal Behavior of Clayey Ground Improved by Vertical Drain in 3D Consolidation Process. *Soils and Foundations*,. Vol. 44, No3, pp. 25-37.
- Baydoğan, H.** (2007). *Üç Boyutlu Konsolidasyon*, (Yüksek Lisans Tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Biot, M. A.** (1941). General Theory of Three Dimensional Consolidation, *Reprinted from Journal of Applied Physics*, Vol.12, No. 2, pp155-164.
- Bishop, A. ve Henkel, D. J.** (1953). Pore Pressure Changes During Shear in Two Undisturbed Clays, *Proc. Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Switzerland, Vol. 1, 94-99.
- Brown S. F.** (1996). Soil Mechanics in Pavement Engineering, *Geotechnique* 46, No. 3, pp 383-426.
- Burland, J. B.** (1990). On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays, *Geotechnique* 40, No. 3, pp 329-378.
- Butterfield, R.** (1979). A Natural Compression Law for Soils, *Geotechnique* 29, No. 4, 469-480.
- Butterfield, R. ve Baligh, F.** (1996) A New Evaluation of Loading Cycles in an Oedometer, *Geotechnique* 46, No3, pp 547-553.
- Casagrande, A.** (1936). The Determination of the Pre-Consolidation Load and Its Practical Significance, Discussion D-34, *Proceeding of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, Mass., Vol. 3, pp. 60-64.
- Caquot, A. ve Kerisel, J.** (1956), *Traité de Mécanique des Sols*, 3e édition, Gauthier- Villars, Paris
- Chai, J. C., Matsunaga, K., Sakai, A. ve Hayash, S.** (2009). Comparison of Vacuum Consolidation with Surcharge Load Induced Consolidation of a two-layer System, *Geotechnique* 59, No. 7, pp.637-641.
- Ching, S. ve Chang, A. M.** (1985). Uncertainty of One- Dimensional Consolidation

Analysis, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. Vol.111, No.12, pp 1411-1424.

- Clayton C. R. I., Hight D. W. ve Hopper R. J.** (1992). Progressive Destructuring of Bothkennar Clay: Implications for sampling and reconsolidation procedures, *Geotechnique* 42, No. 2, pp 219-239.
- Craig, R. F.** (1983). *Soil Mechanics*, 3rd Edition, Van Nostrand Reinhold, UK.
- Delage, P., Marcial, D., Cui, Y. J. ve Ruiz, X.** (2006). Ageing Effects in a Compacted Bentonite, A Microstructure Approach, *Geotechnique* 56, No 5, pp 291- 304.
- Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. ve Mazerolle, F.** (1996). Void Ratio Evolution Inside Shear Bands in Triaxial Sand Specimens Studied by Computed Tomography, *Geotechnique* 46, No3, pp 529-546.
- Duncan, J. M.** (1993). Limitations of Conventional Analysis of Consolidation Settlement, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.119, No. 9, pp. 1333-1359.
- Finno, R., Harris, W., Mooney, M. ve Viggiani, G.** (1997). Shear Bands in Plane Strain Compression of Loose Sand, *Geotechnique* 47, No. 1, 149-165.
- Freeze, R. A.** (1977). Probabilistic one- Dimensional Consolidation, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. Vol.103,(GT7), pp 725-741.
- Garcia-Bengochea, I., Lovell, C. W. ve Altschaeffl, A. G.** (1979). Pore Distribution and Permeability of Silty Clays, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. Vol. 105, (GT7), pp 839-856.
- Gareau, L. F., Molenkamp, F. ve Sharma, J.** (2006). An Improved Oedometer Apparatus to Measure Lateral Stress During Testing, *Geotech. Testing J. Vol. 29, No. 3*, pp. 1-7.
- Germaine, J. T.** (1985). *Laboratory Measurements of Clay Behavior*, MIT, Special Summer Course, Cambridge.
- Graham, J. ve Li, C. C.** (1985). Comparison of Natural and Remolded Plastic Clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. Vol.111, No.7, pp. 865-880.
- Griffiths, F. J. ve Joshi, R. C.** (1989). Change in Pore Size Distribution due to Consolidation of Clays, *Geotechnique* 39, No.1, pp. 159-167
- Griffiths, D. V. ve Li, C. O.** (1993). Analysis of Delayed Failure in Sloping Excavations, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 119, No.9, pp 1360- 1378.
- Habib, P. ve Puyo, A.** (1953). Évaluation des Contraintes Transversales Pendant la Consolidation, *Proc. Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerland, Vol.1*, 32-34.
- Habib, P.** (1953). Influence de la Variation de la Contrainte Principale Moyenne sur la Résistance au Cisaillement des Sols, *Proc. Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerland, Vol. 1*, pp. 131-136.
- Habib, P.** (1953). Étude de L'orientation du Plan de Rupture et de la L'angle de

- Frottement Interne de Certaines Argiles, *Proc. Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Switzerland, Vol.1, pp. 28-31.
- Hansbo, S., Jamiolkowski, M. ve Kok, L.** (1981). Consolidation by Vertical Drains, *Geotechnique*, Mar., pp. 45-66.
- Hight, D. W., Böese, R., Butcher, A. P., Clayton, C. R. I. ve Smith, P. R.** (1992). Disturbance of the Bothkennar Clay Prior to Laboratory Testing, *Geotechnique* 42, No2, pp 199-217.
- Holtz, R. D. ve Kovacs, W. D.** (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Holtz, R. D., Jamiolkowski, M. B. ve Lancellotta, R.** (1986). Lessons from Oedometer Tests on High Quality Samples, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.8, pp 768-776.
- Hong, Z.-S., Yin, J. ve Cui, Y.-J.** (2010). Compression Behaviour of Reconstituted Soils at High Initial Water Contents, *Geotechnique* 60, No. 9, pp 691-700.
- Huang, J. ve Griffiths, D. V.** (2010). One-Dimensional Consolidation Theories for Layered Soil and Coupled and Uncoupled Solutions by the Finite-Element Method, *Geotechnique* 60, No.9 pp. 709-713.
- Janbu, N.** (1969). The Resistance Concept Applied to Deformations of Soils, *Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico 1, pp. 191-196.
- Janbu, N. ve Sennehet, K.** (1979). Interpretation Procedures for Obtaining Soil Deformation Parameters, *Proc. 7th ECSMFE*, Brighton, Vol. 1, pp. 185-188.
- Kjellman, W. ve Jakobson, B.** (1955). Some Relations Between Stress and Strain in Coarse Grained Materials, *Proc. Royal Swedish Geotechnical Institute*, Stockholm.
- Kumbasar, V. ve Kip, F.** (1999). *Zemin Mekaniği Problemleri*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Mckinley, J. D. ve Sivakumar, V.** (2009). Coefficient of Consolidation by Plotting Velocity Against Displacement, *Geotechnique* 59, No. 6, pp. 553-557.
- Mesri, G. ve Godlewski, P. M.** (1977). Time and Stress Compressibility Interrelationship, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE. Vol.103 (GT5), pp. 417-430.
- Monroy, R., Zdravkovic, L. ve Ridley, A.** (2010). Evolution of Microstructure in Compacted London Clay During Wetting and Loading, *Geotechnique* 60, No. 2, pp. 105-119.
- Muang, M. J., Griffiths, D. V. ve Fenton, G. A.** (2010). Probabilistic Analysis of Coupled Soil Consolidation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 3, pp 417-430.
- Nakase, A., Kamei, T. ve Kusakabe, O.** (1988) Constitutive Parameters Estimated by Plasticity Index, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No7, pp.844-858.

- Nash D. F. T., Sills G. C. ve Davison L. R.** (1992). One-Dimensional Consolidation Testing of Soft Clay from Bothkennar, *Geotechnique* 42, No. 2, pp 241-256.
- Olson, R. E. ve Ladd, C. C.** (1979). One Dimensional Consolidation Problems, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, (GT1), pp.11-29.
- Onitsuka, K., Hong, Z., Hara, Y. ve Yoshitake, S.** (1995). Interpretation of Oedometer Test Data for Natural Clays, *Soils Foundation*, Vol. 35, No. 3, pp. 61-70.
- Pyrah, I. C.** (1996) One Dimensional Consolidation of Layered Soils, *Geotechnique* 46, No 9, pp 555-560.
- Rohe, A., Gareau, L. F. ve Molenkamp, F.** (2009). Lateral Oedometer Testing of Anisotropic Clay as Affected by Surface Roughness, *Geotechnique*. 59, No.8, pp 703-715.
- Rowe, P. W.** (1972). The Relevance of Soil Fabric to Site Investigation Practice, *Geotechnique* 22, No. 2, pp. 195-300.
- Sadrekarami, A. ve Olson, S. M.** (2010). Shear Band Formation Observed in Ring Shear Tests on Sandy Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 2, pp 366-375.
- Schiffman, R. L., Chen, A. T. F. ve Jordan, J. C.** (1969). An Analysis of Consolidation Theories, *Journal of Soil Mechanics ve Foundations, Division ASCE*, Vol. 95, No.SM1, pp. 285-312.
- Schmertmann, J. H.** (1991). The Mechanical Aging of Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.9, pp.1288-1330.
- Schmertmann, J. H.** (1983). A Simple Question About Consolidation, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 119-122.
- Seed, H. B.** (1979). Soil Liquefaction and Cyclic Mobility of Evaluation for Level Ground During Earthquakes, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 105, (GT2), pp. 201-255.
- Skempton, A. W.** (1970). The Consolidation of Clays by Gravitational Compaction *Q. J. Geol. Soc. London*, Vol. 125, pp. 373-411.
- Sultan, N., Cui, Y.-J. ve Delage, P.** (2010). Yielding and Plastic Behaviour of Boom Clay, *Geotechnique* 60, No.9, pp657-666.
- Taiebat, H. A. ve Carter, J. P.** (2010). A Failure Surface for Circular Footings on Cohesive Soils, *Geotechnique* 60, No.4, pp.265-273.
- Tavenas, F., Des Rosiers, J.-P., Leroueil, S., LaRochelle, P. ve Roy, M.** (1979). The Use of Strain Energy as a Yield and Creep Criterion for Lightly Overconsolidated Clays, *Geotechnique* 29, No. 3, pp. 285-303.
- Taylor, D. W.** (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley and Sons Inc, New York, N. Y.
- Terzaghi, K.** (1923). Die Berechnung der Durchlassigkeitiziffer des Tones aus dem Verlauf der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen, *Akademie der Wissenschaften in Wien. Sitzungsberichte, Mathematisch*

Naturwissenschaftliche Klasse, Part Ila, Vol. 132, No. 3/4, pp. 125-138.

- Tschebotarioff, G. P.** (1948). Effect of Boundary Conditions on Lateral Earth Pressures, *Proc. Comtes Rendus de la deuxième Conférence International de Mécanique des Sols*, tenue á Rotterdam, t.3, pp. 308-310.
- Verigin, N. N.** (1961). Consolidation of Soil Under a Flexible Foundation (Plane Problem), (In Russian). *Osnovaniya i Fundamenti*, Vol. 5, pp. 20-23.
- Walker, R. ve Indraratna, B.** (2009). Consolidation Analysis of A Stratified Soil with Vertical and Horizontal Drainage Using the Spectral Method”, *Geotechnique* 59, No. 5, 439-449.
- Weber, W. G.** (1969). Performance of Embankments Constructed over Peat, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 75, pp.53-76.
- Yıldırım, H. ve Sezen, A.** (2010). Yeni Geliştirilen Deney Aleti ile Laboratuarda Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi, *Tübitak*, Araştırma Projesi.
- Yin, J. H. ve Graham, J.** (1996) Elastic Visco- Plastic Modelling of one-Dimensional Consolidation, *Geotechnique* 46, No3, pp 515-527.



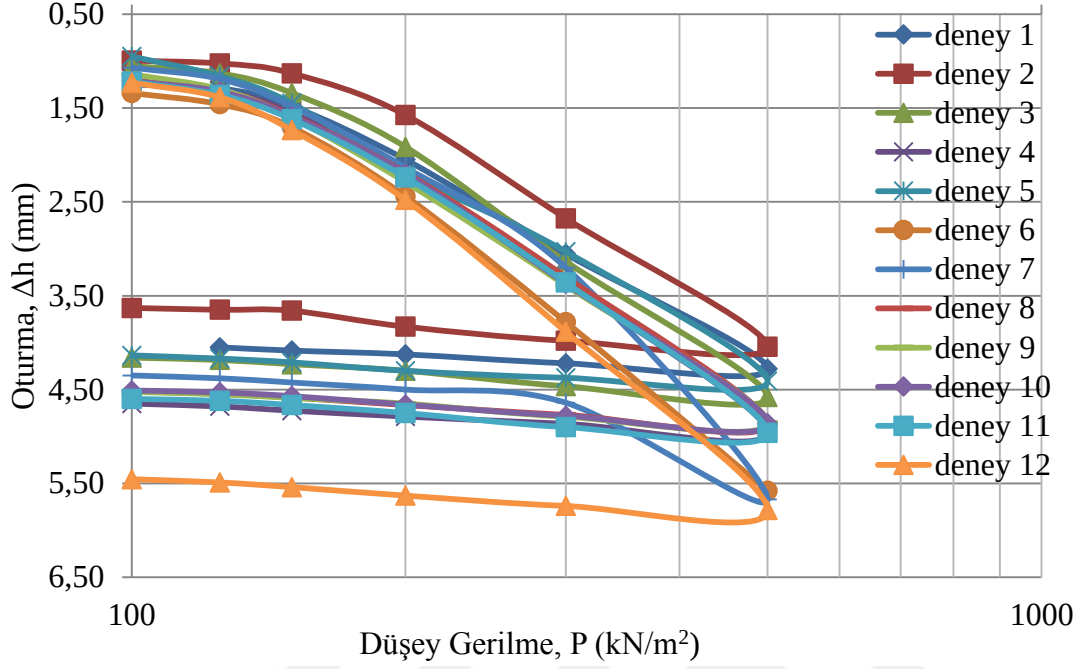
EKLER

EK A : Standart ve Üç Boyutlu Deney Aletleri Kullanılarak Yapılan Deneyler.

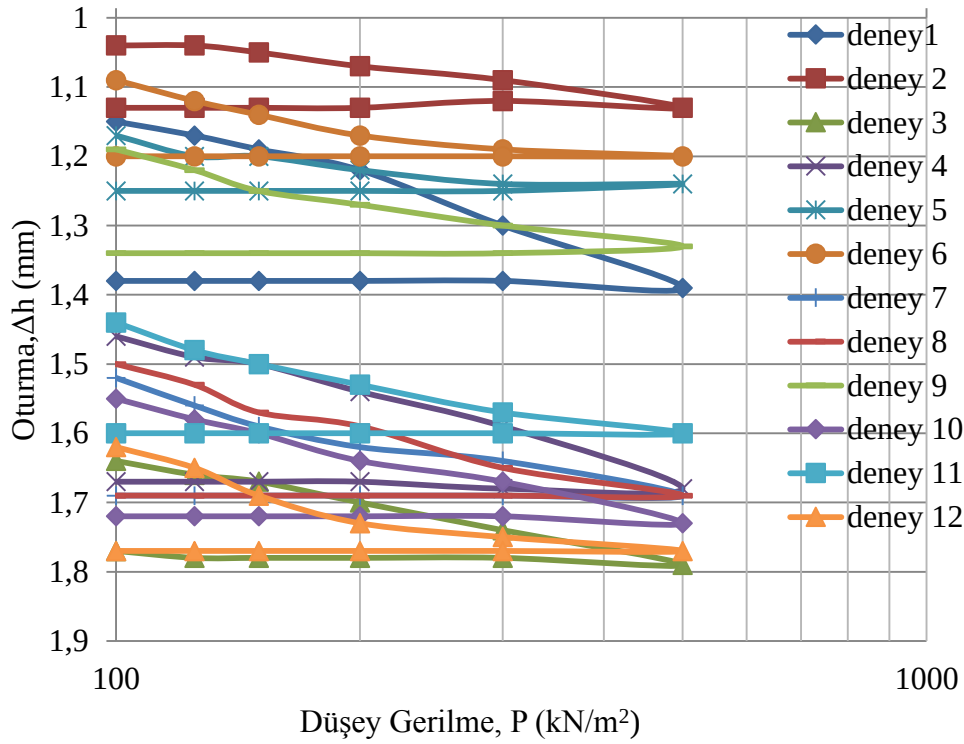
EK B : Ön Konsolidasyon Basıncının Farklı Yöntemler Kullanılarak Bulunması.



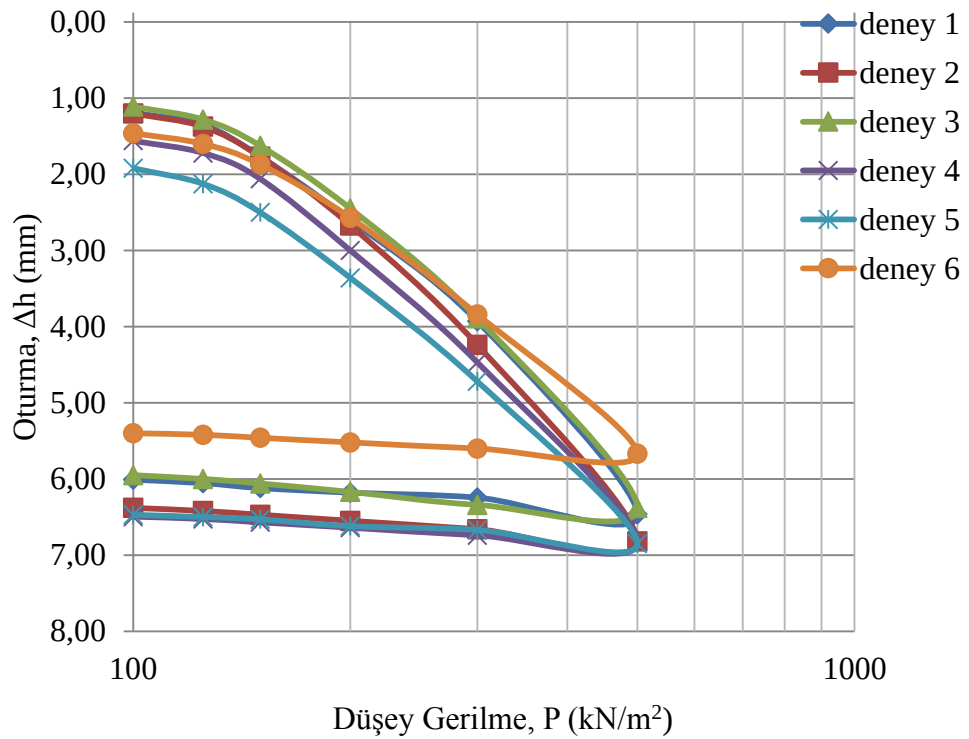
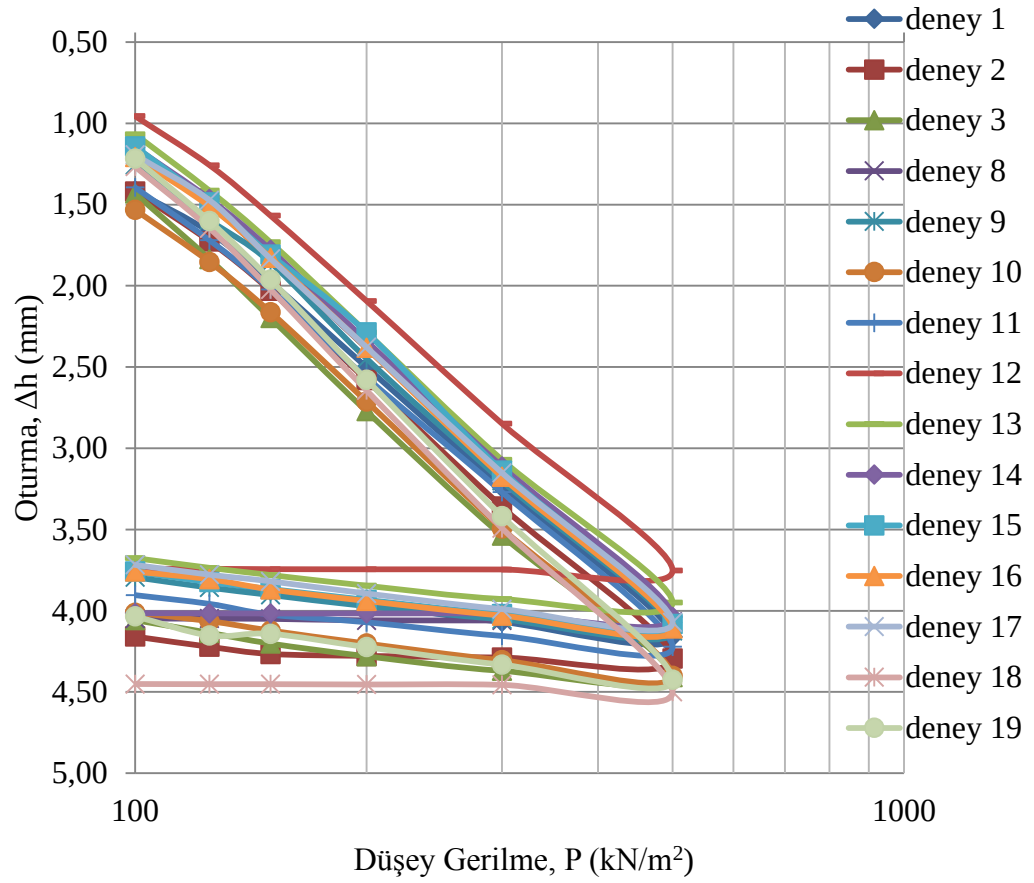
EK A : Standart ve Üç Boyutlu Deney Aletleri Kullanılarak Yapılan Deneyler

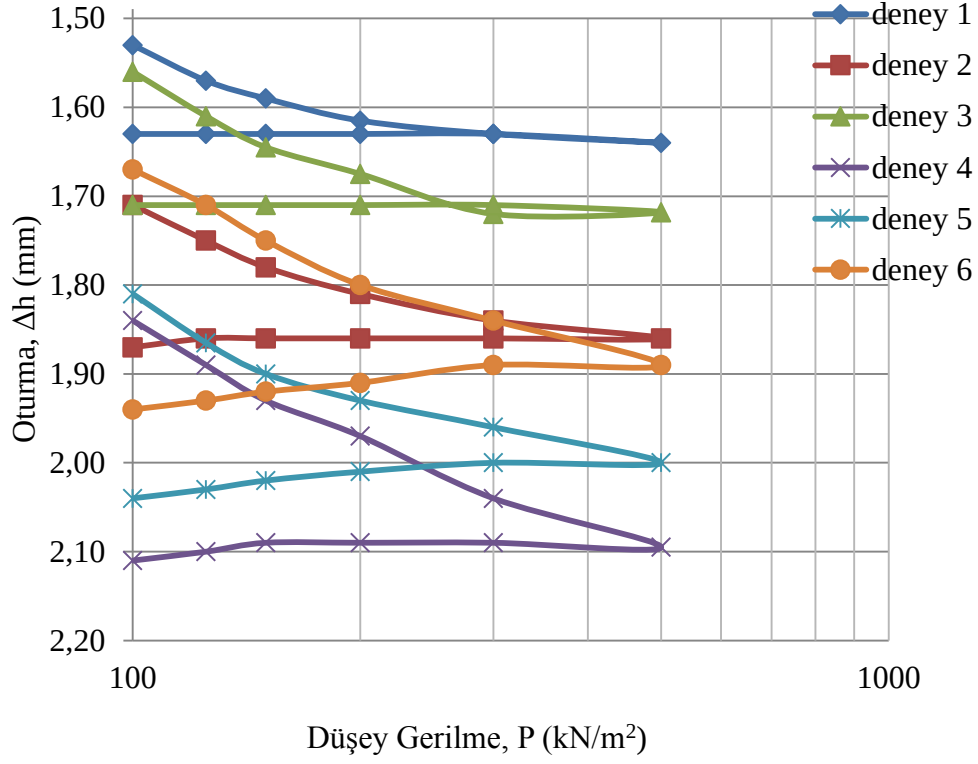


Şekil A.1 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları Merkez Bölge, N1.

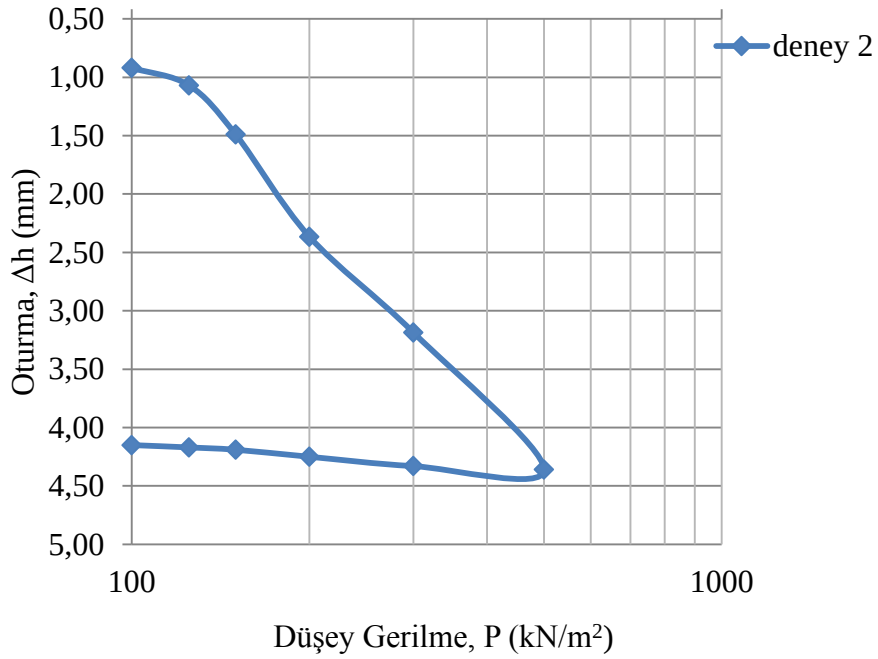


Şekil A.2 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları Çevre Bölge N1.

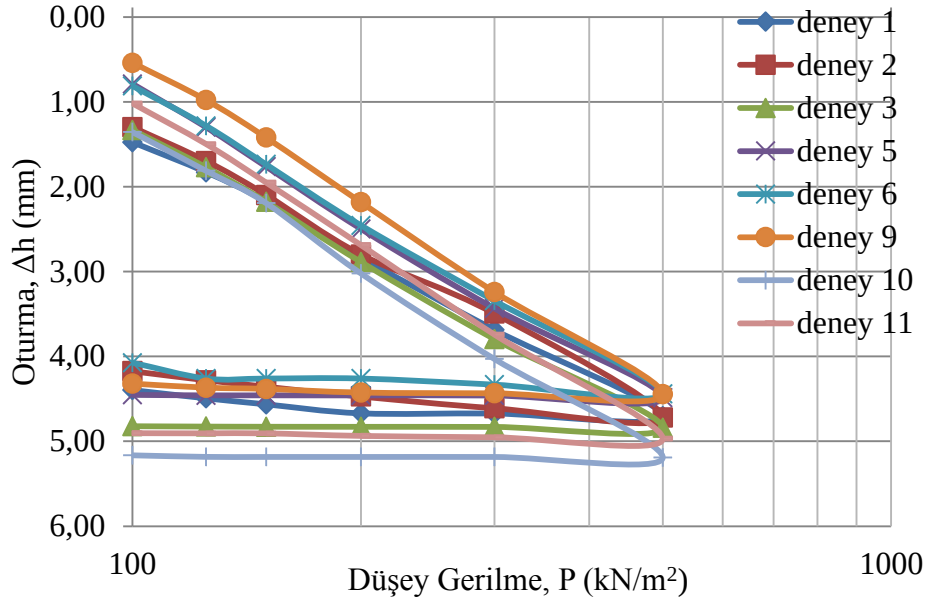




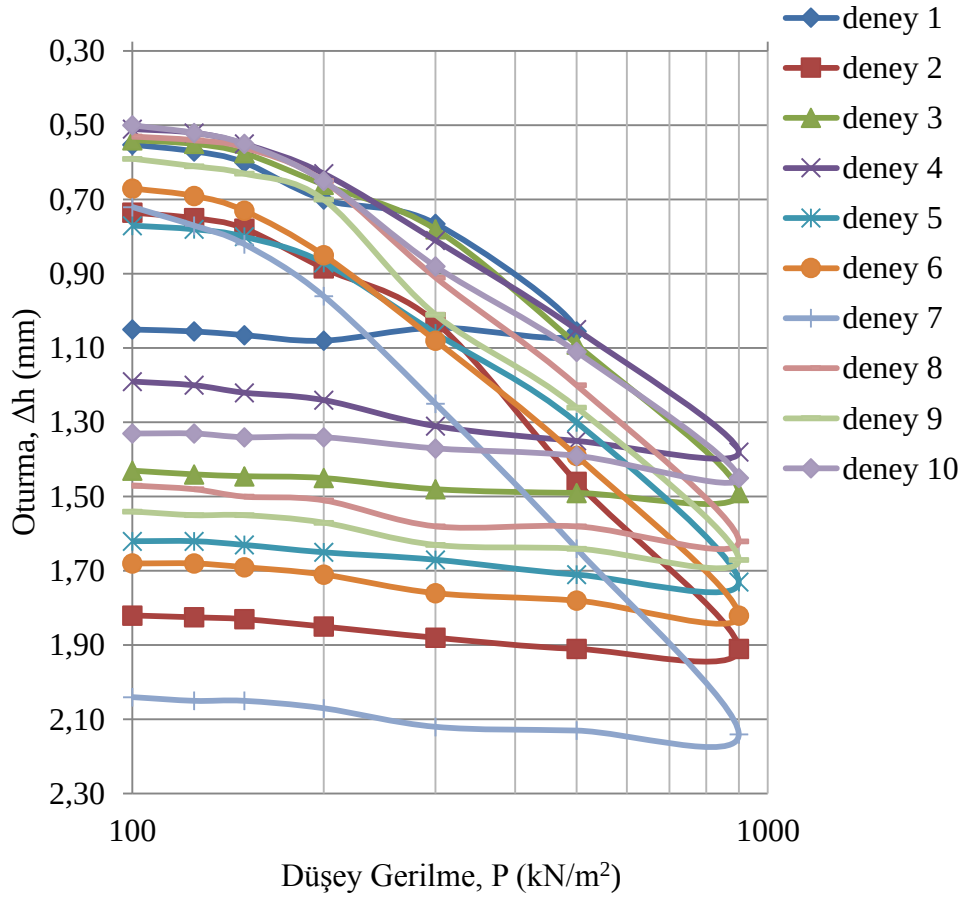
Şekil A.5 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N2.



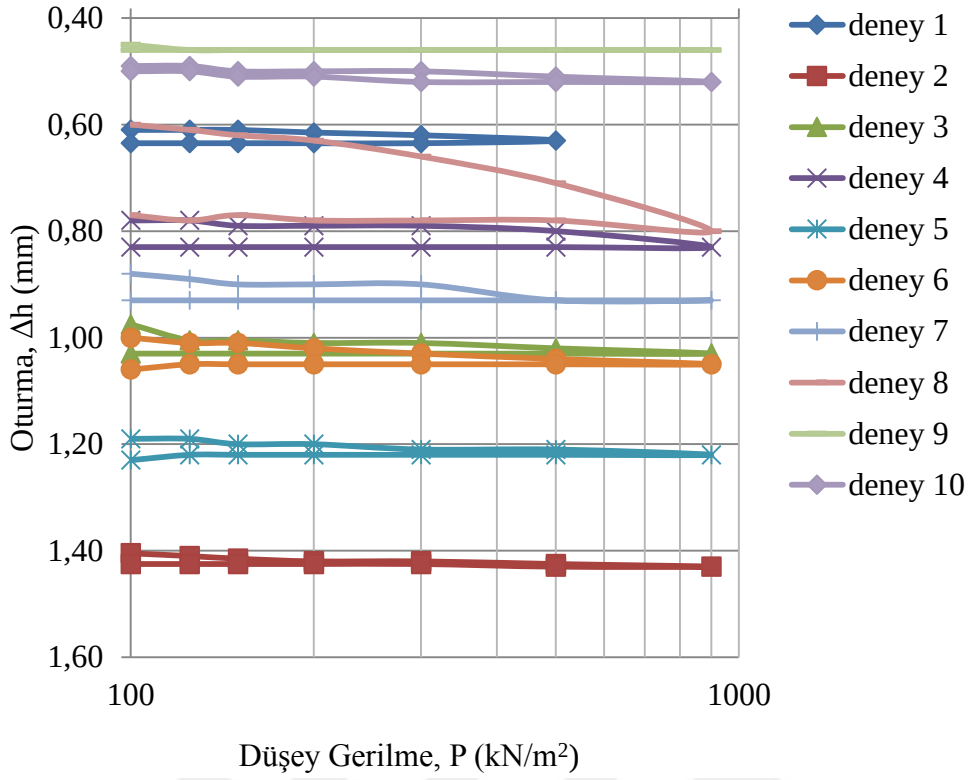
Şekil A.6 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonucu, N2 (CH).



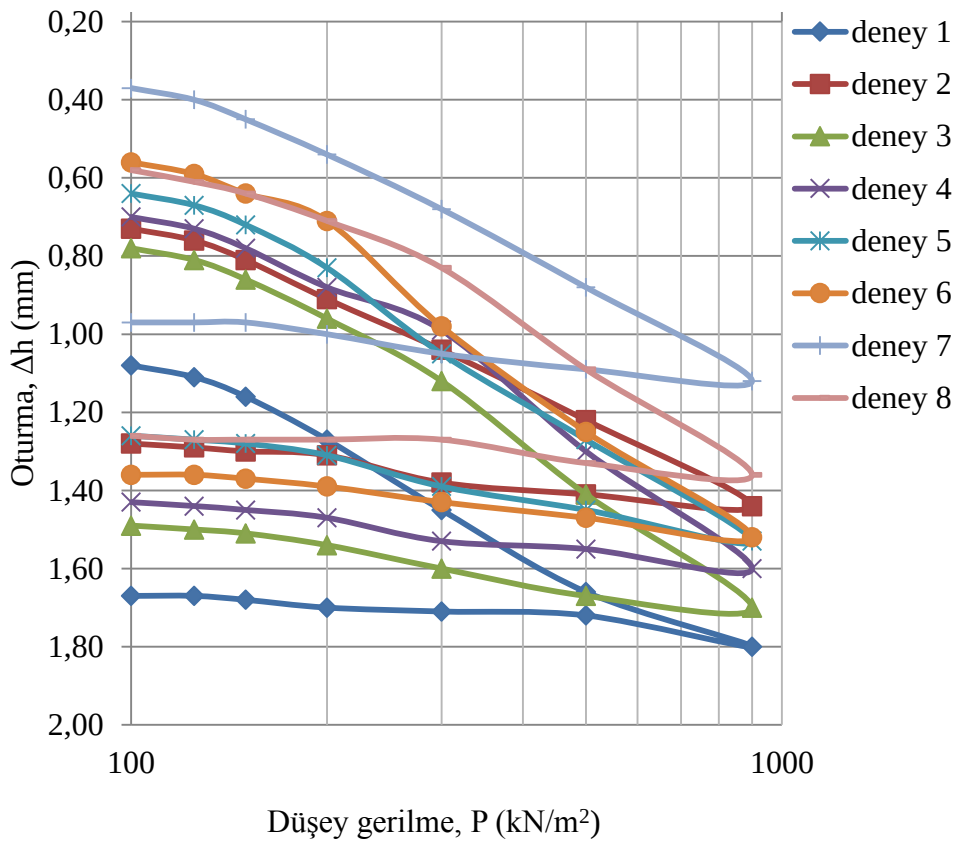
Şekil A.7 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları, N2 (CH).



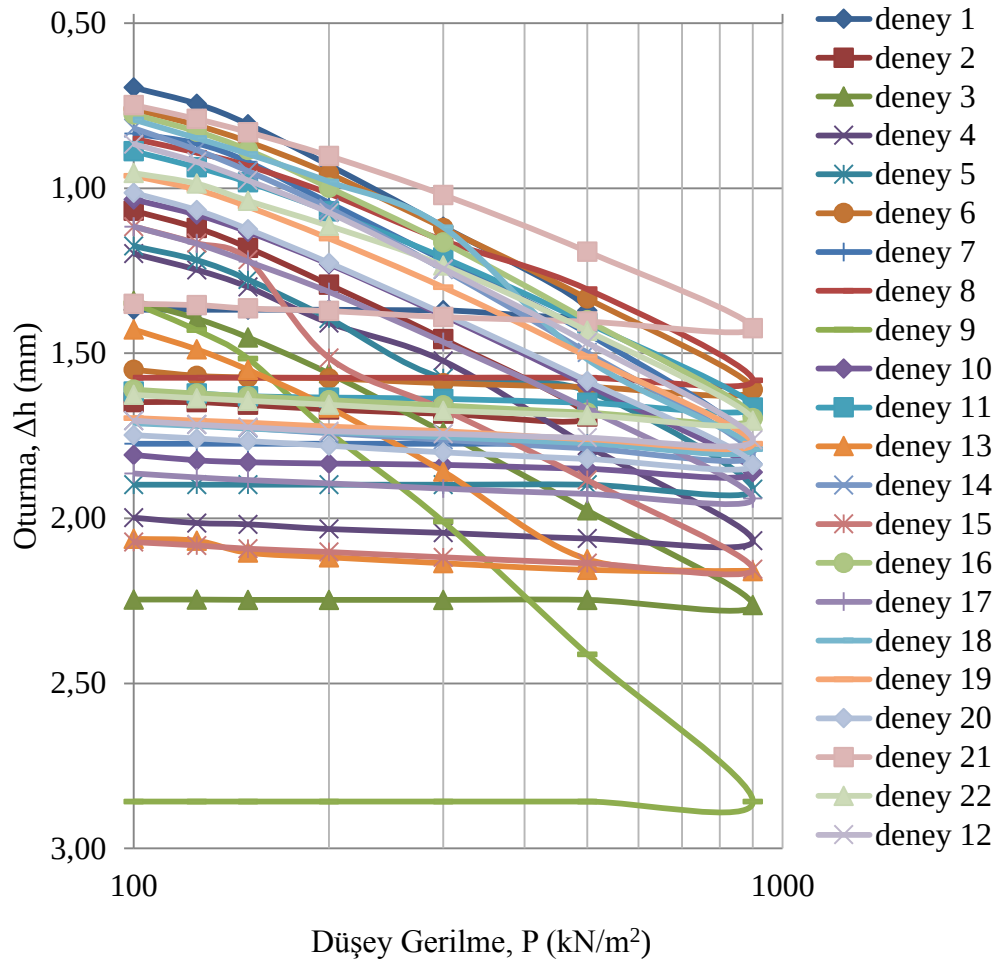
Şekil A.8 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N3.



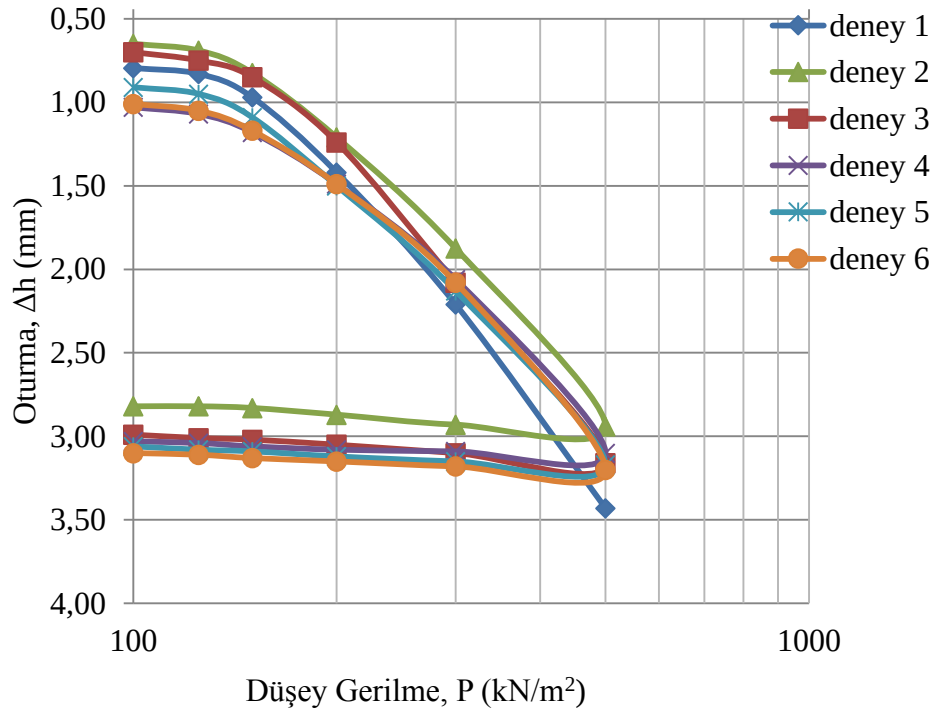
Şekil A.9 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N3.



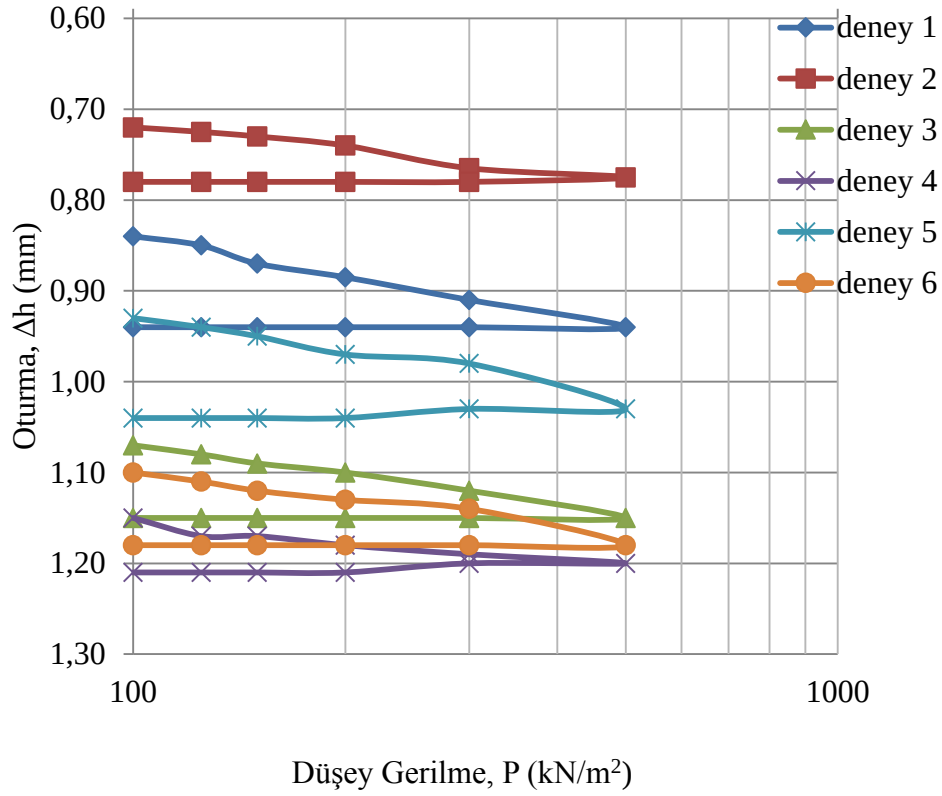
Şekil A.10 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları, N3.



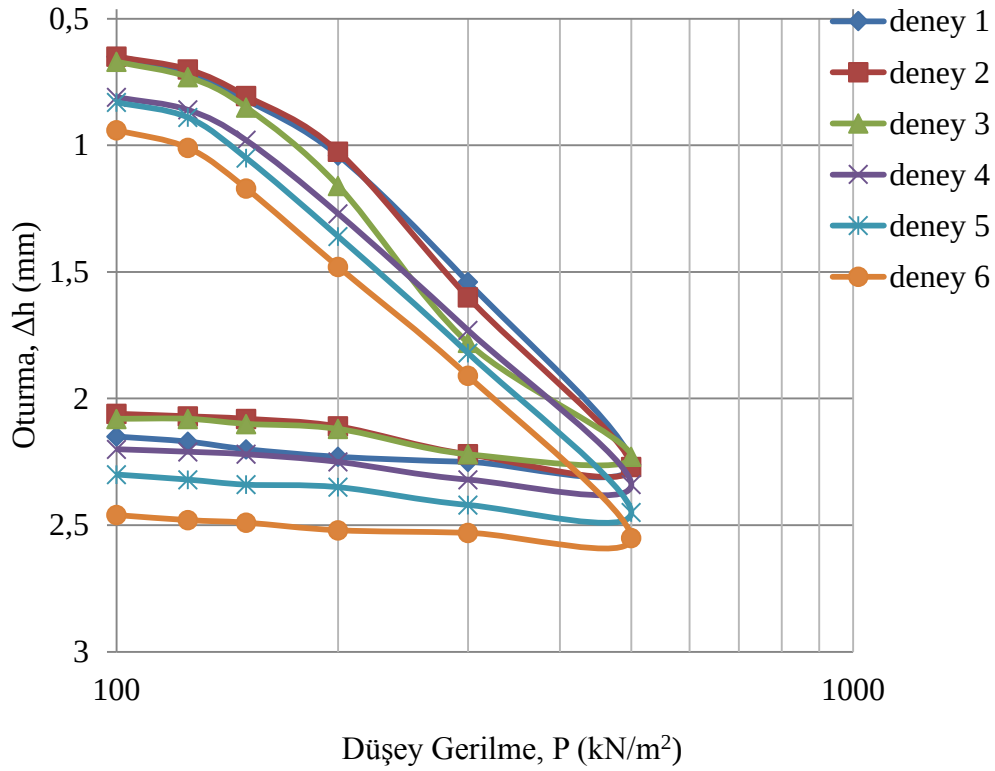
Şekil A.11 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları, N3 (CL-ML).



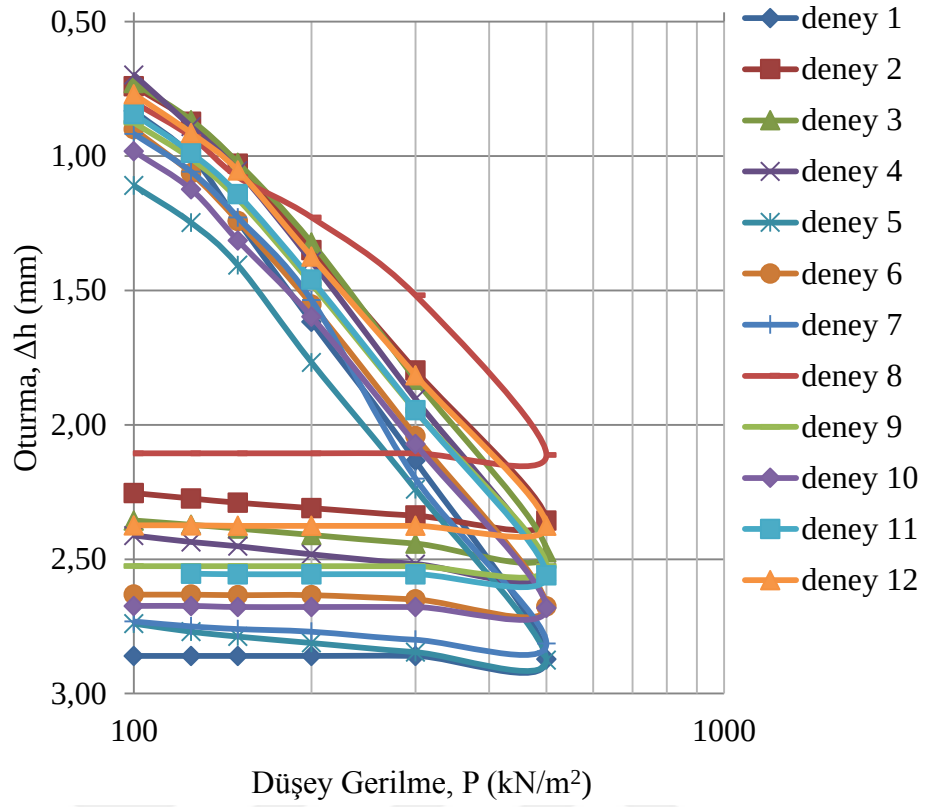
Şekil A.12 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N4.



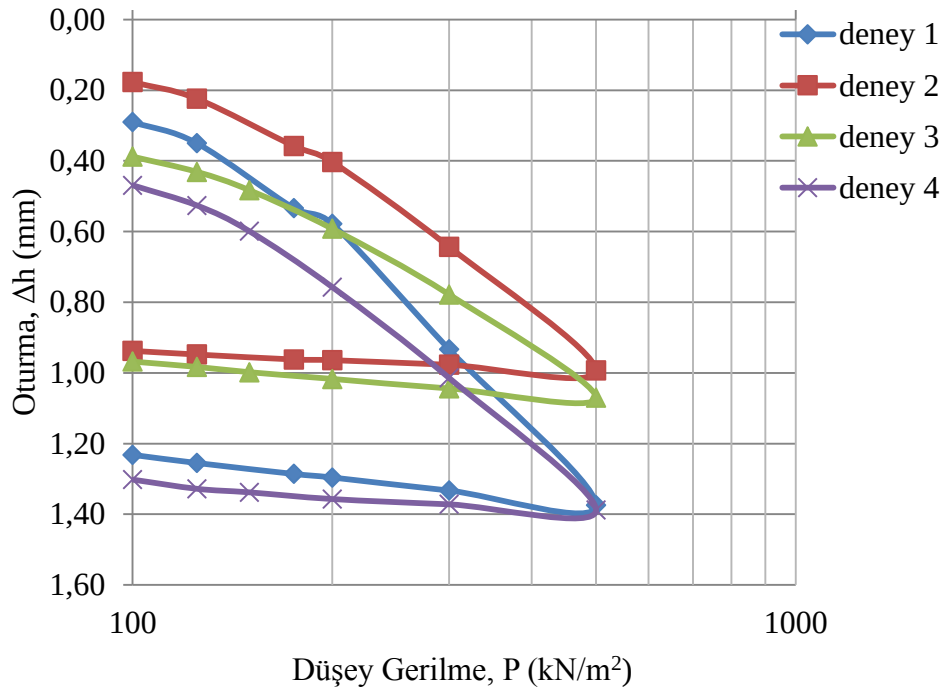
Şekil A.13 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N4.



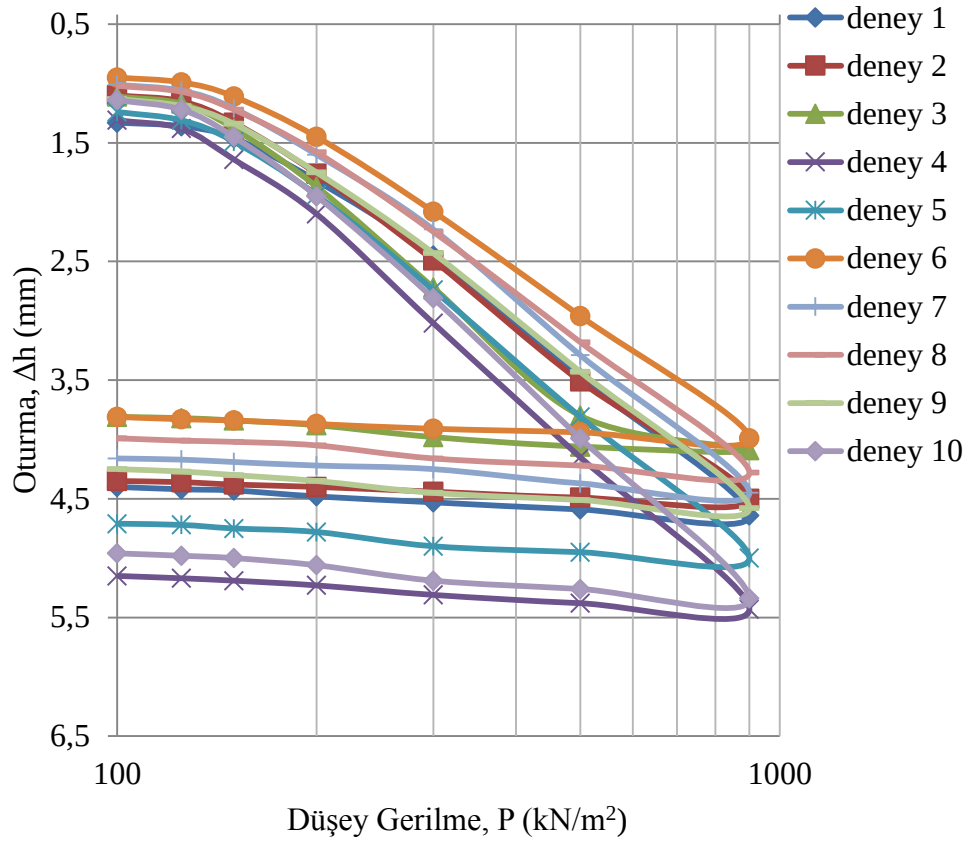
Şekil A.14 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları, N4 (CL).



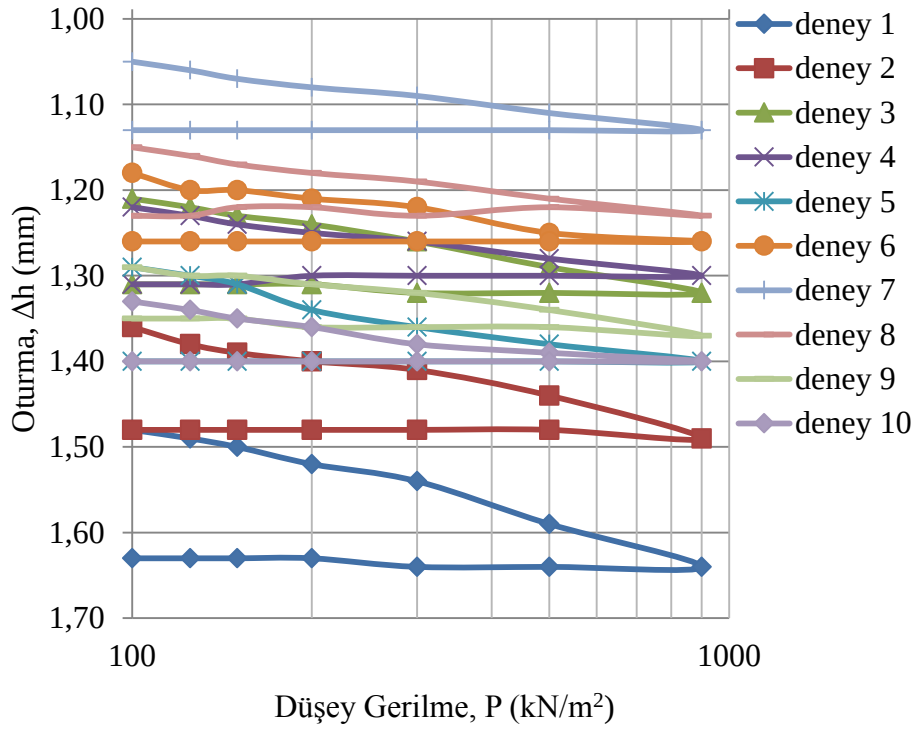
Şekil A.15 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları, N4 (CL).



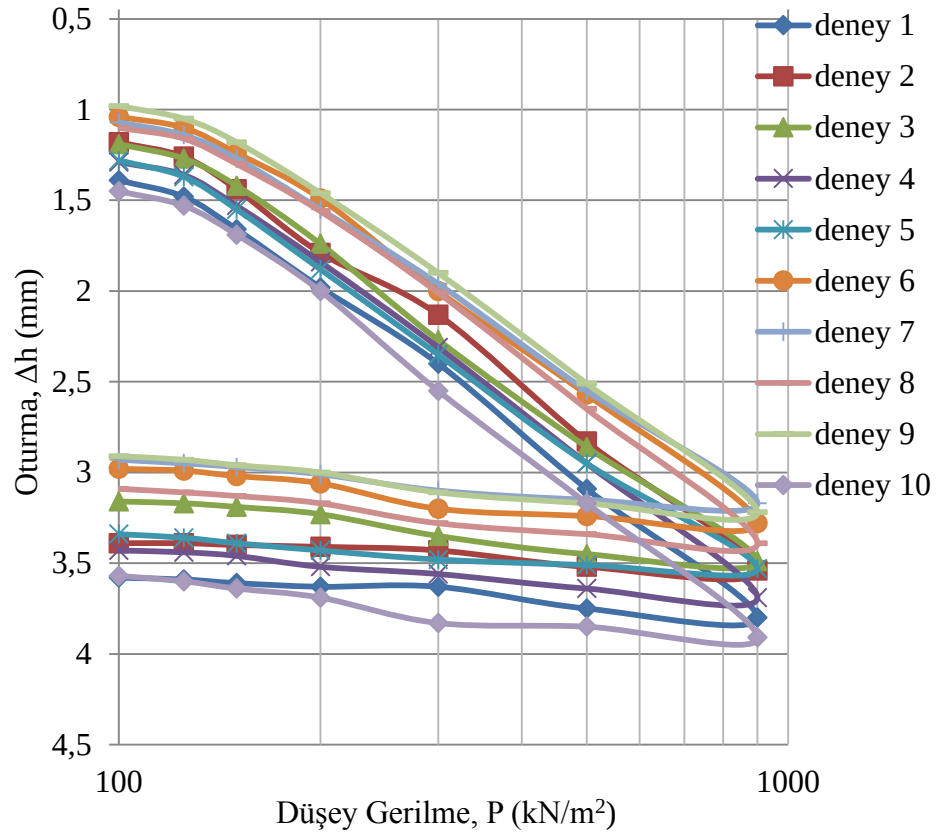
Şekil A.16 : Örselenmemiş Numune ile Ödometre Deneyleri, N4 (CL).



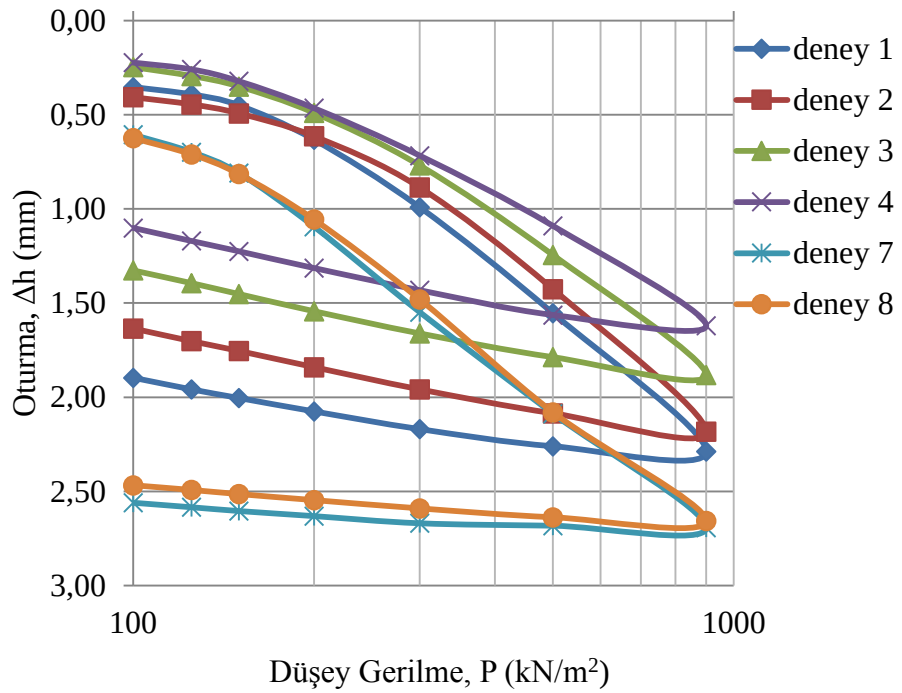
Şekil A.17 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N5.



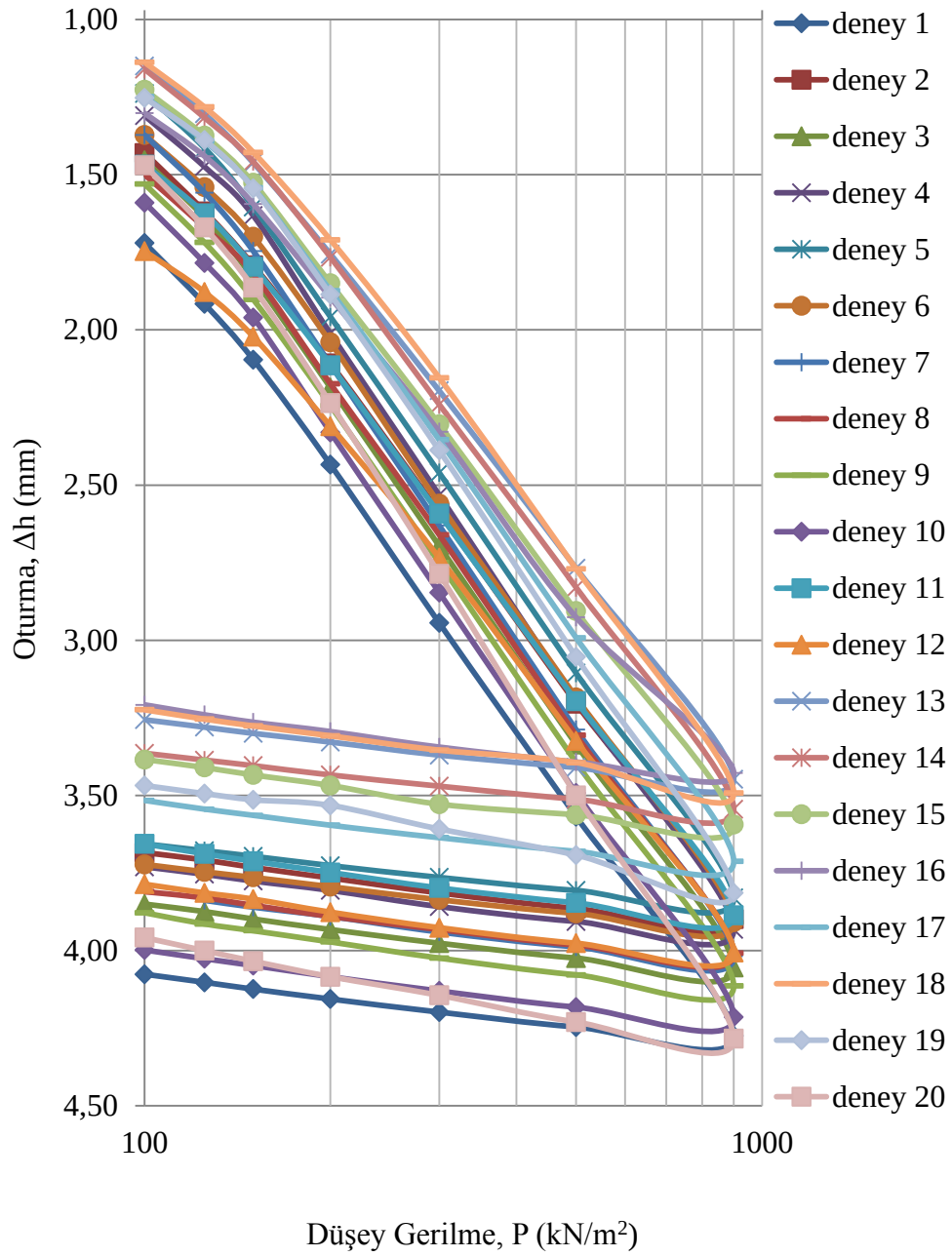
Şekil A.18 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölgesi N5.



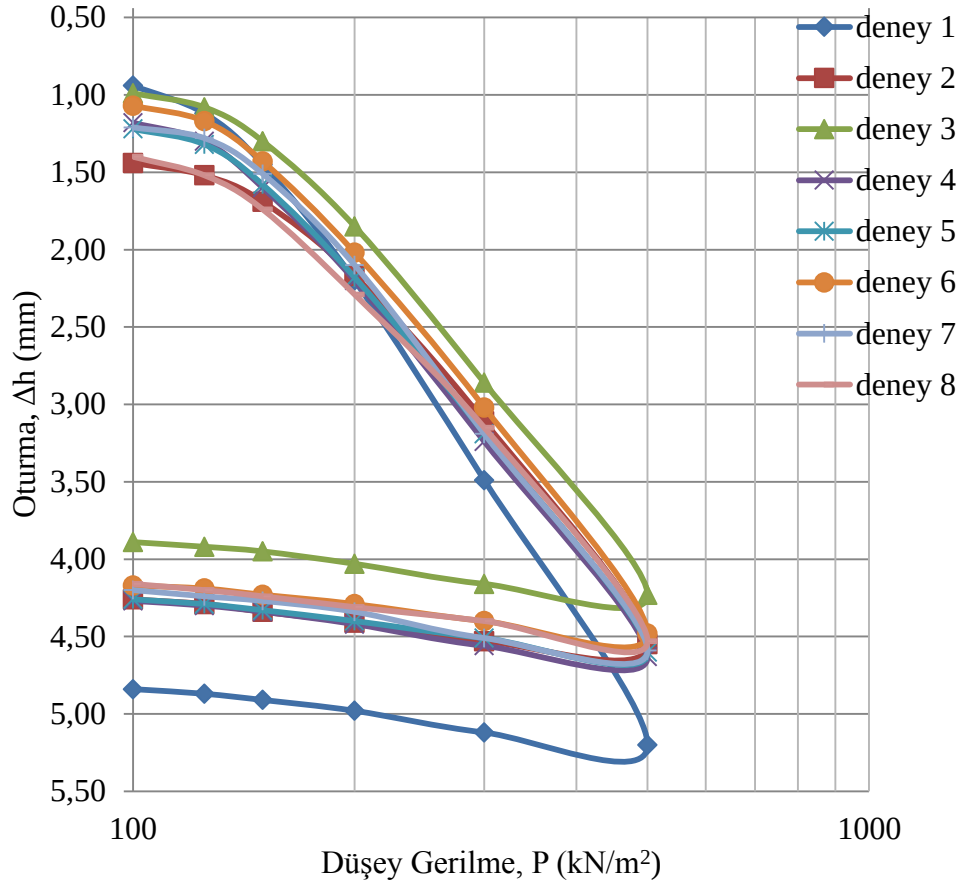
Şekil A.19 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N5 (CL).



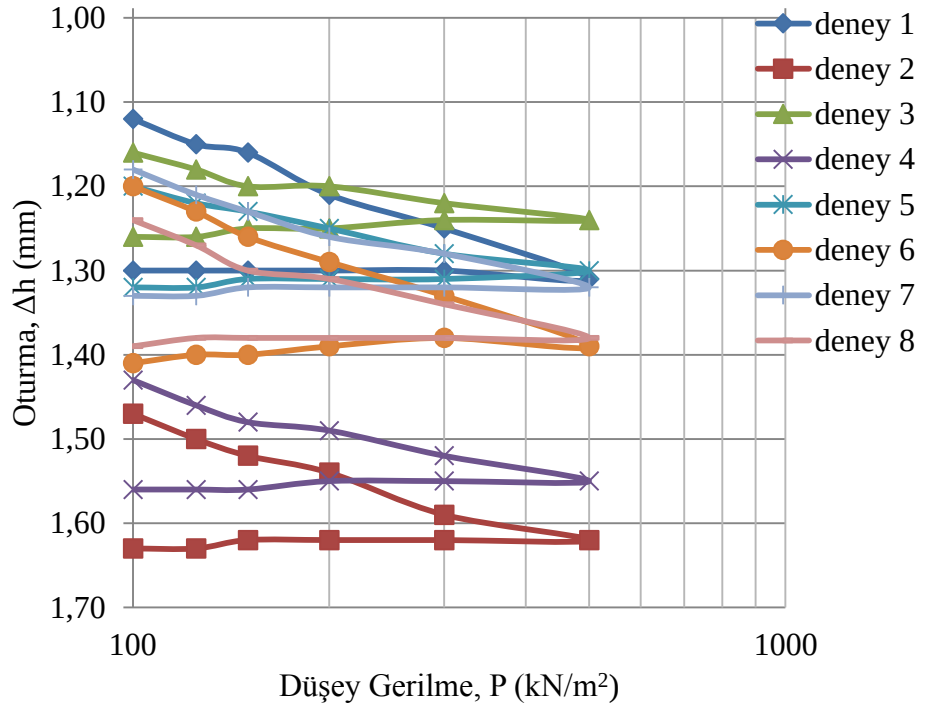
Şekil A.20 : Örselenmemiş Numune ile Ödometre Deneyi Sonuçları N5.



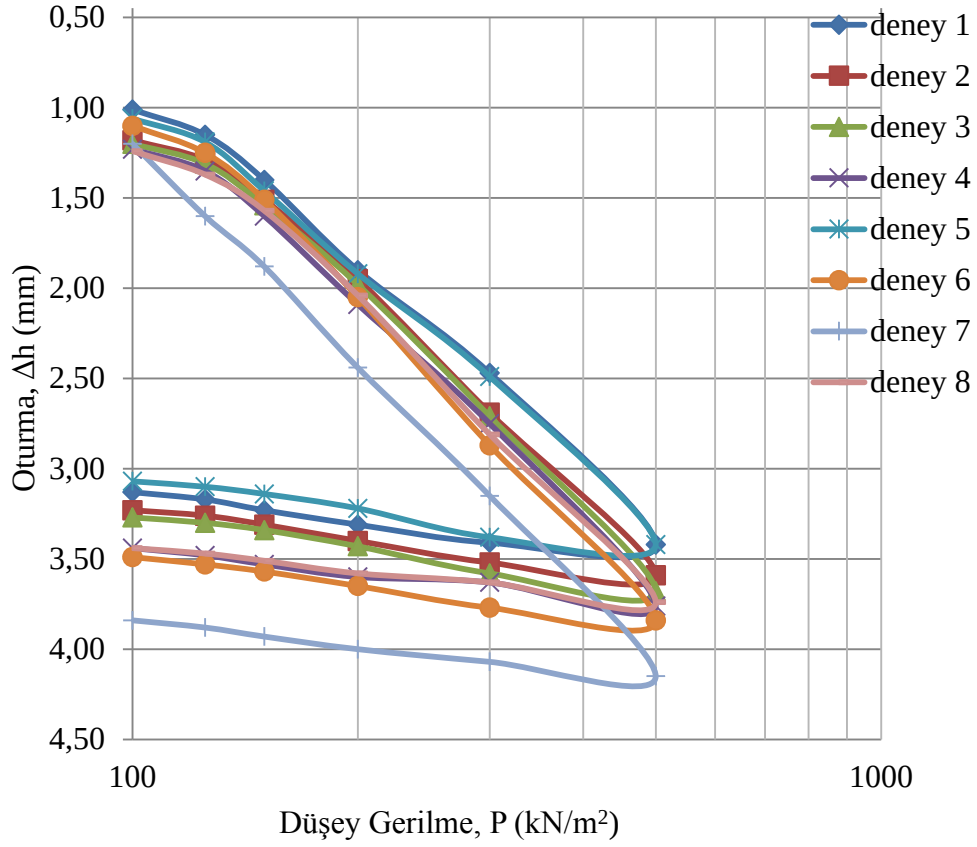
Şekil A.21 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları, N5 (CL).



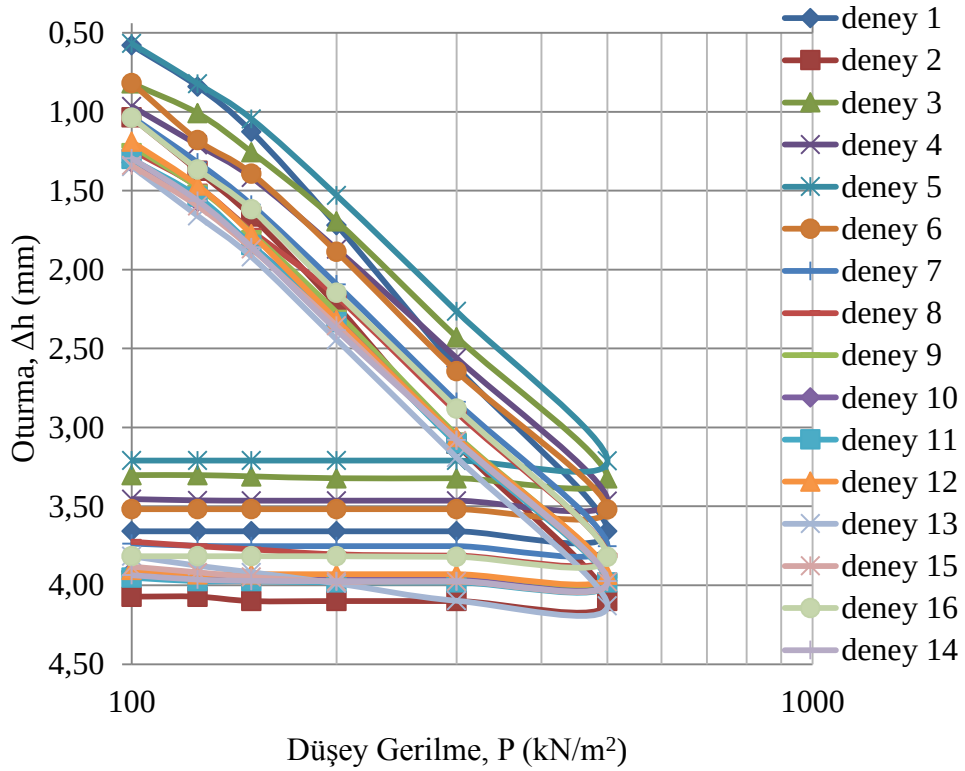
Şekil A.22 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N6.



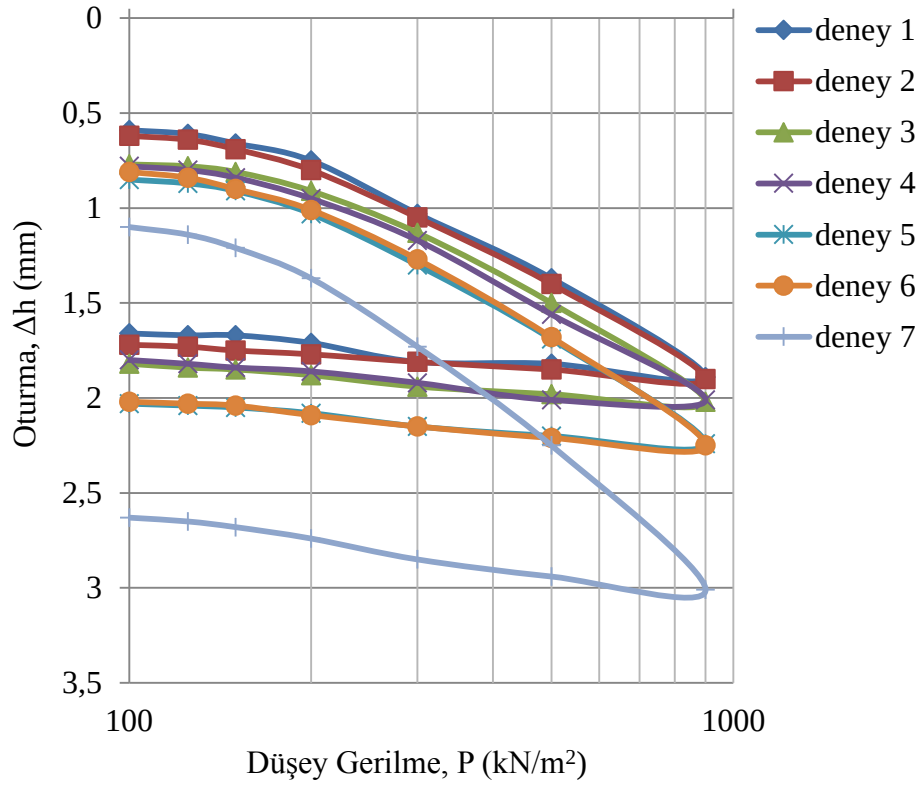
Şekil A.23 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N6.



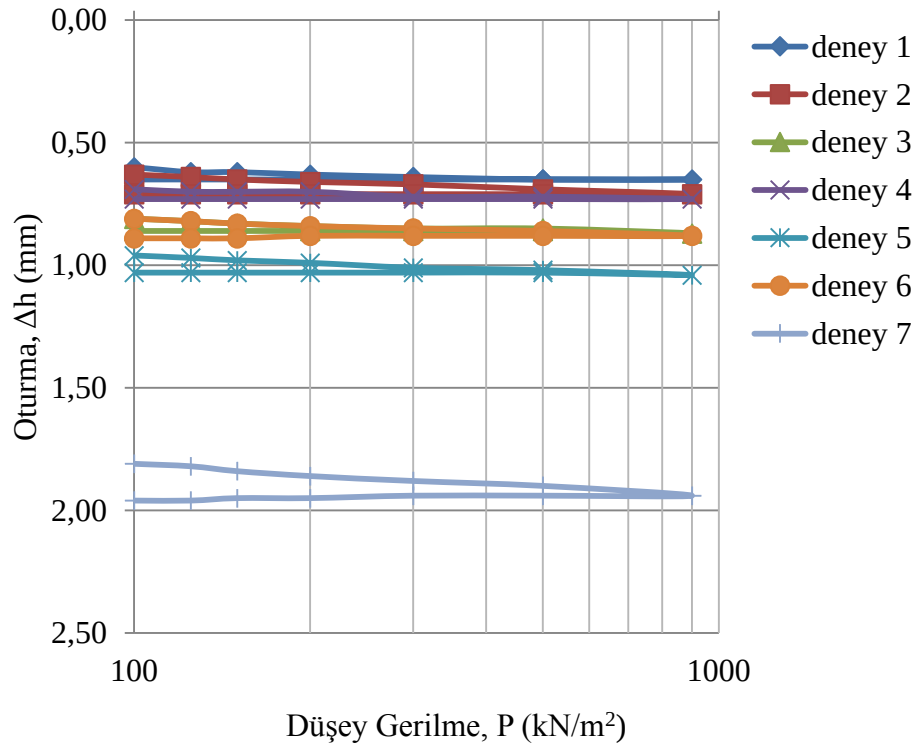
Şekil A.24 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N6 (MH).



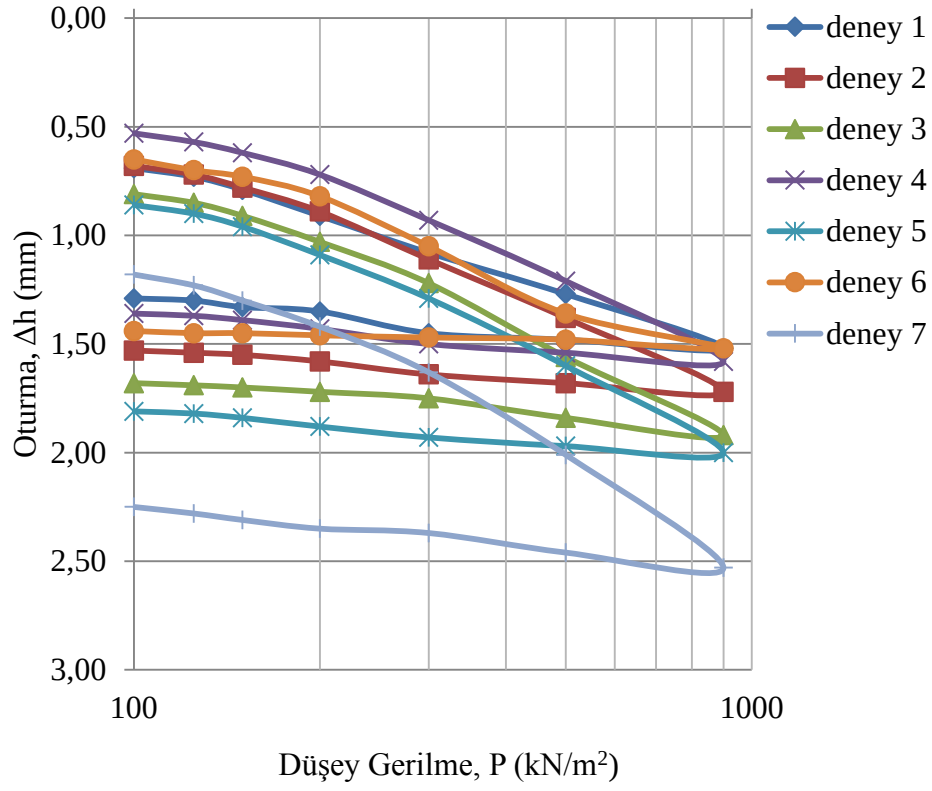
Şekil A.25 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları N6 (MH).



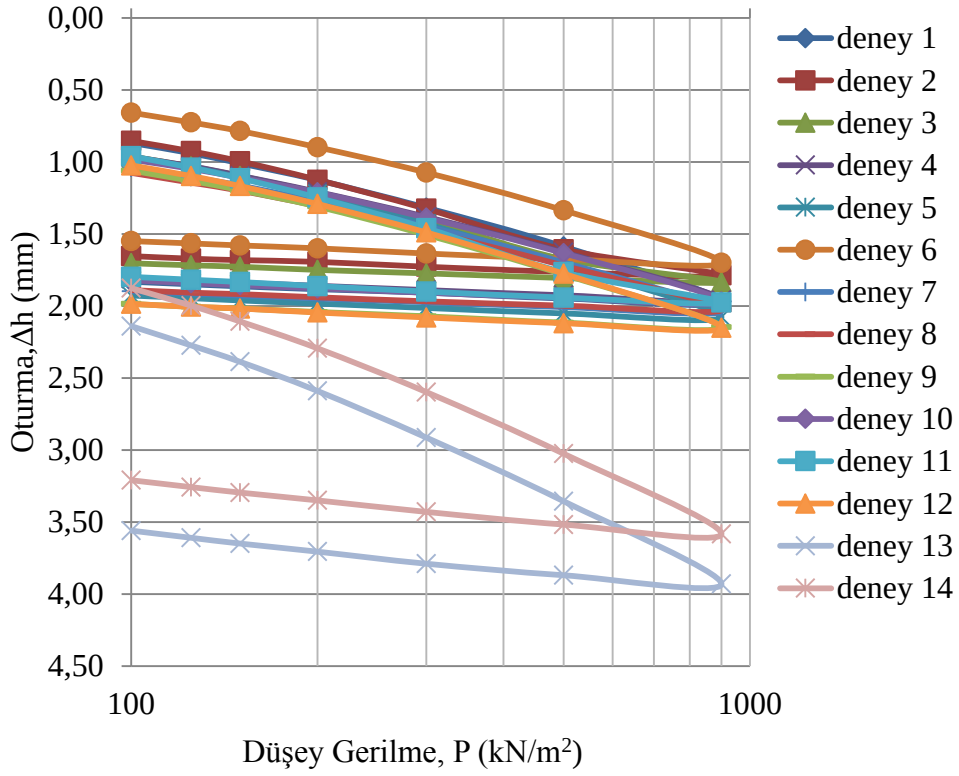
Şekil A.26 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N7.



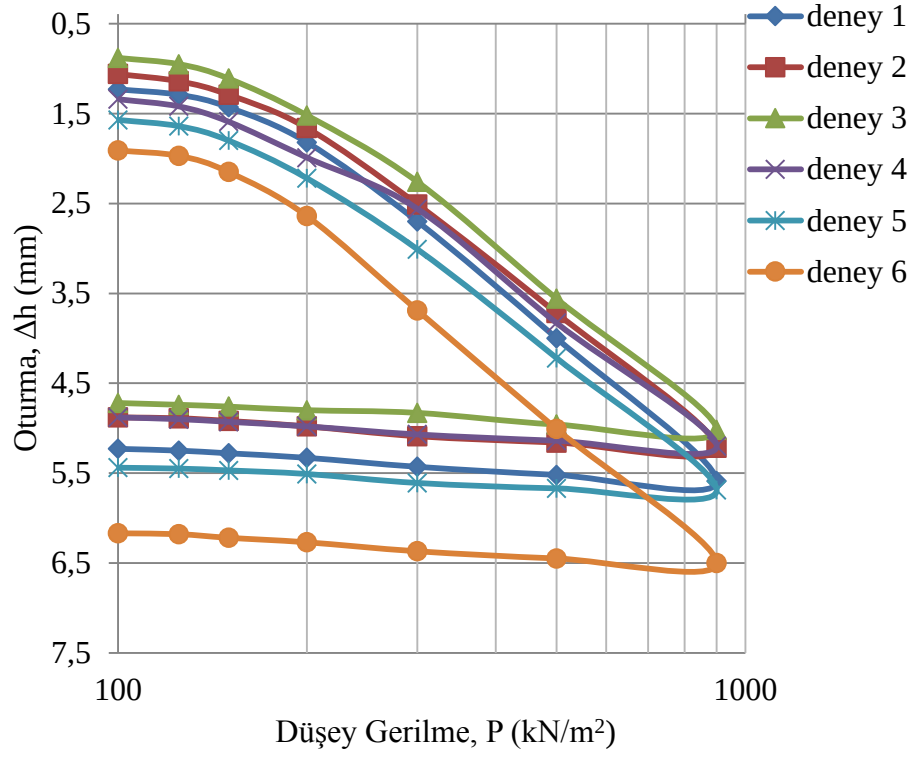
Şekil A.27 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölgesi N7.



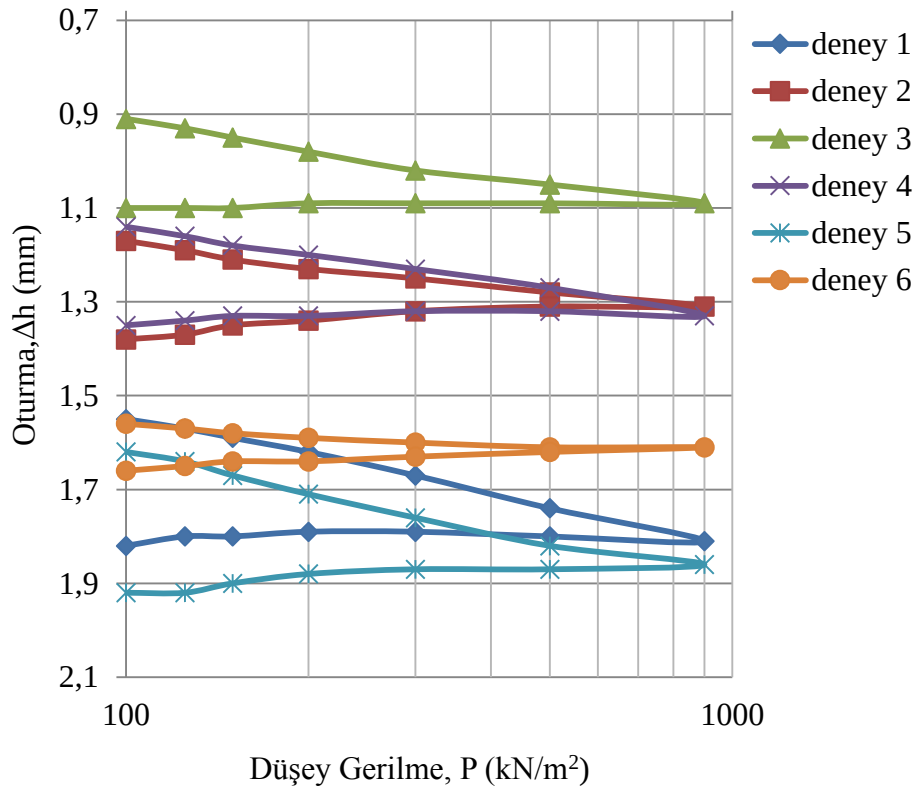
Şekil A.28 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N7.



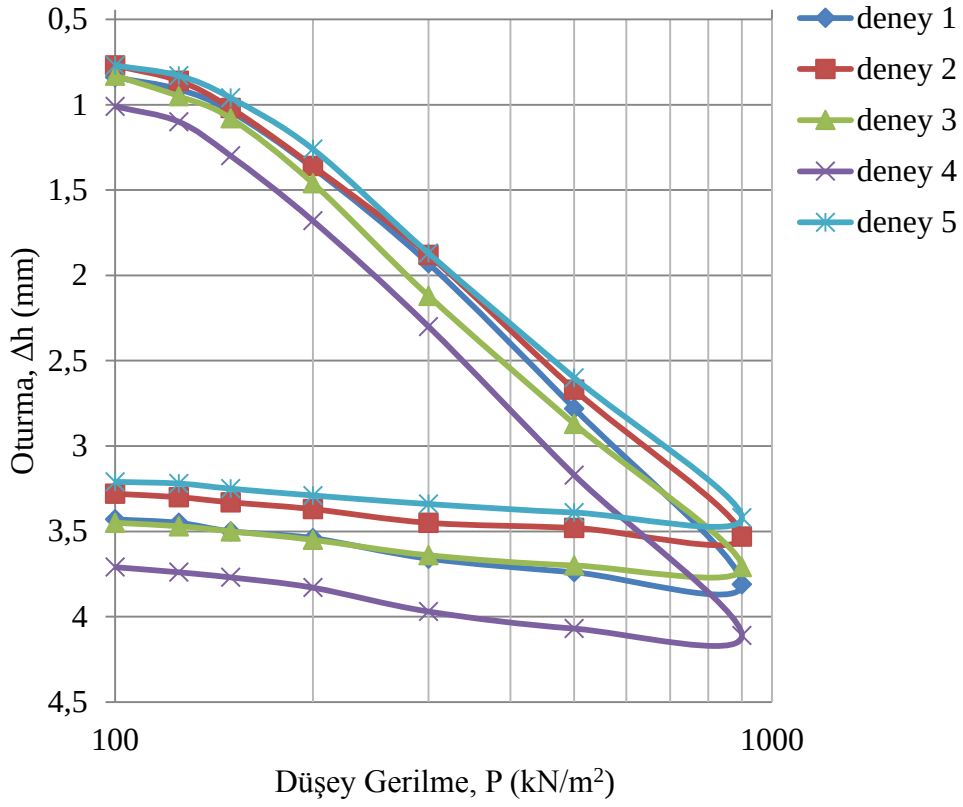
Şekil A.29 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları, N7 (CL-ML).



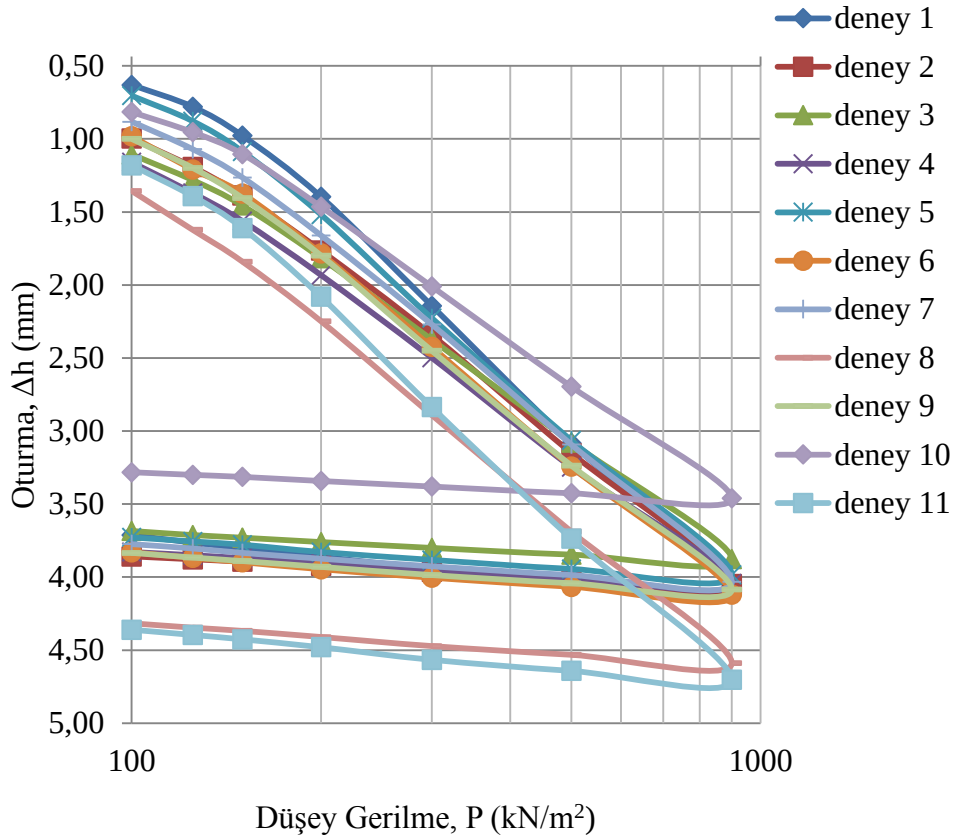
Şekil A.30 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N8.



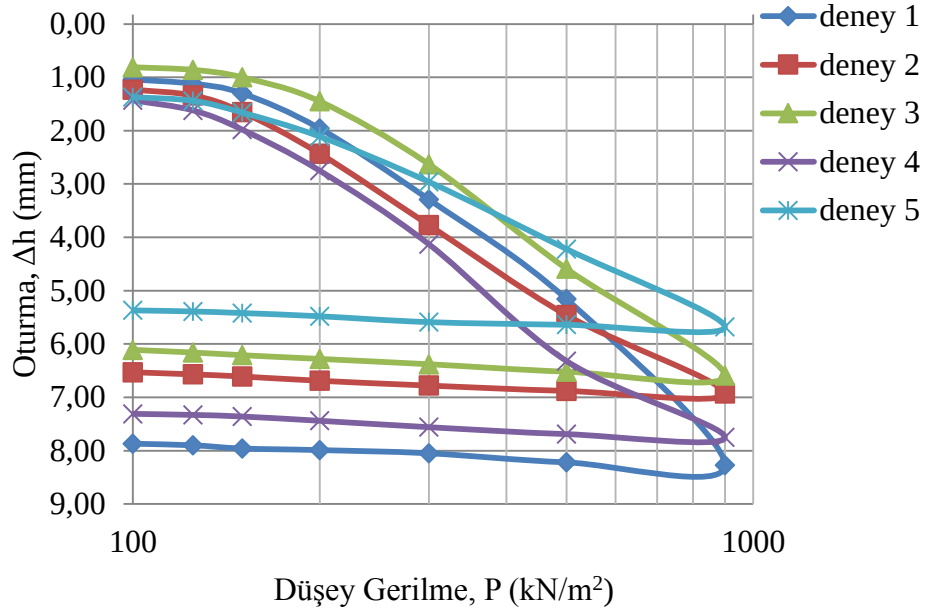
Şekil A.31 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N8.



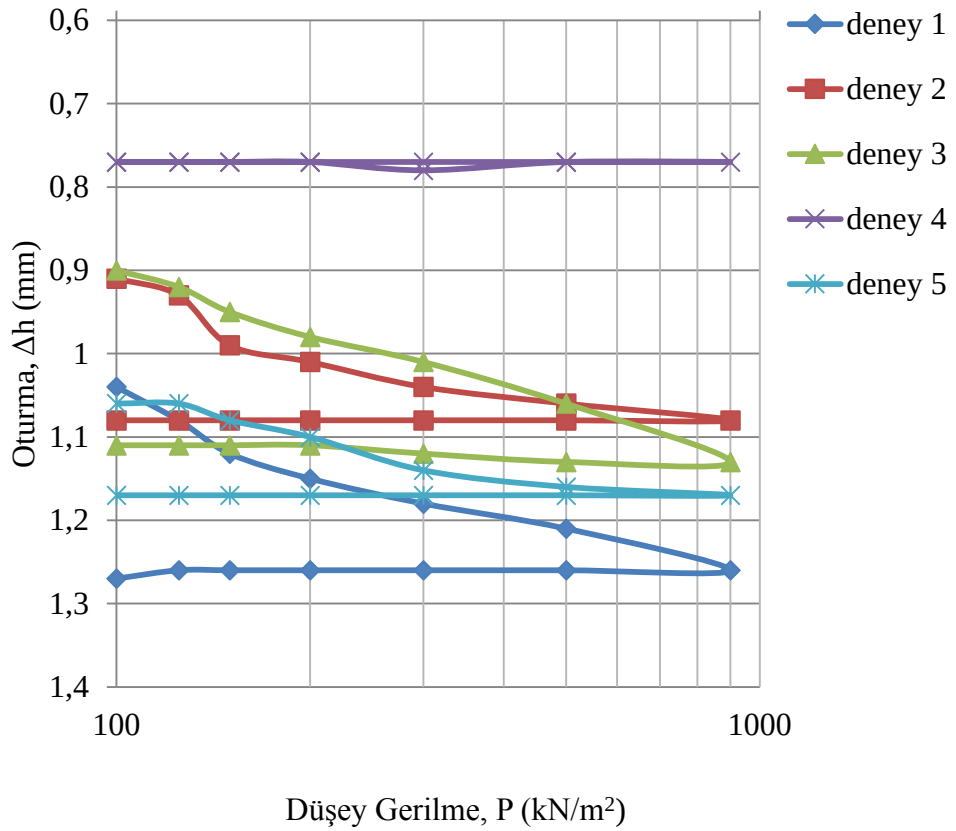
Şekil A.32 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları, N8 (CL).



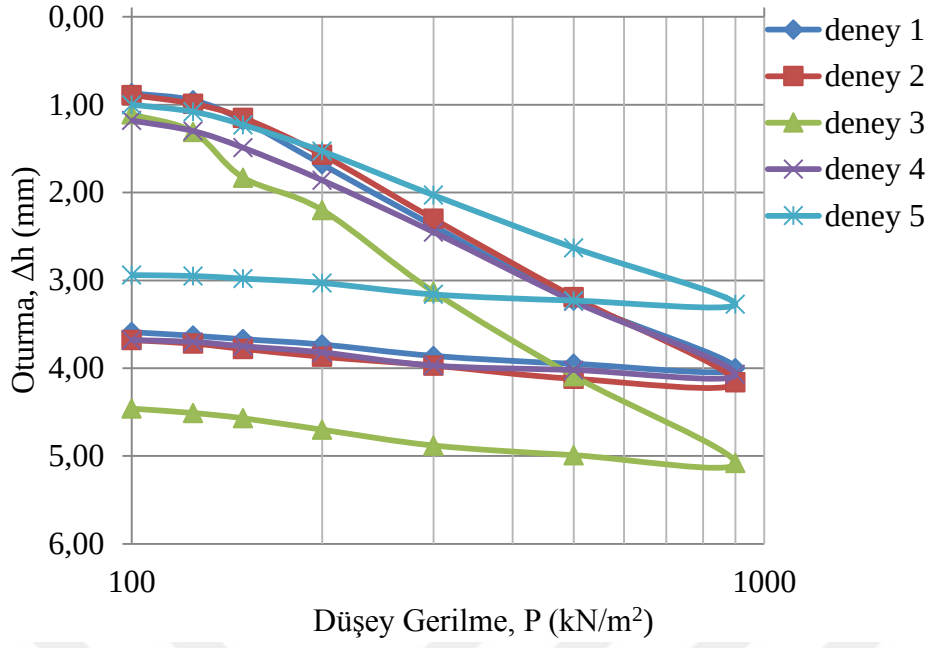
Şekil A.33 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları, N8 (CL).



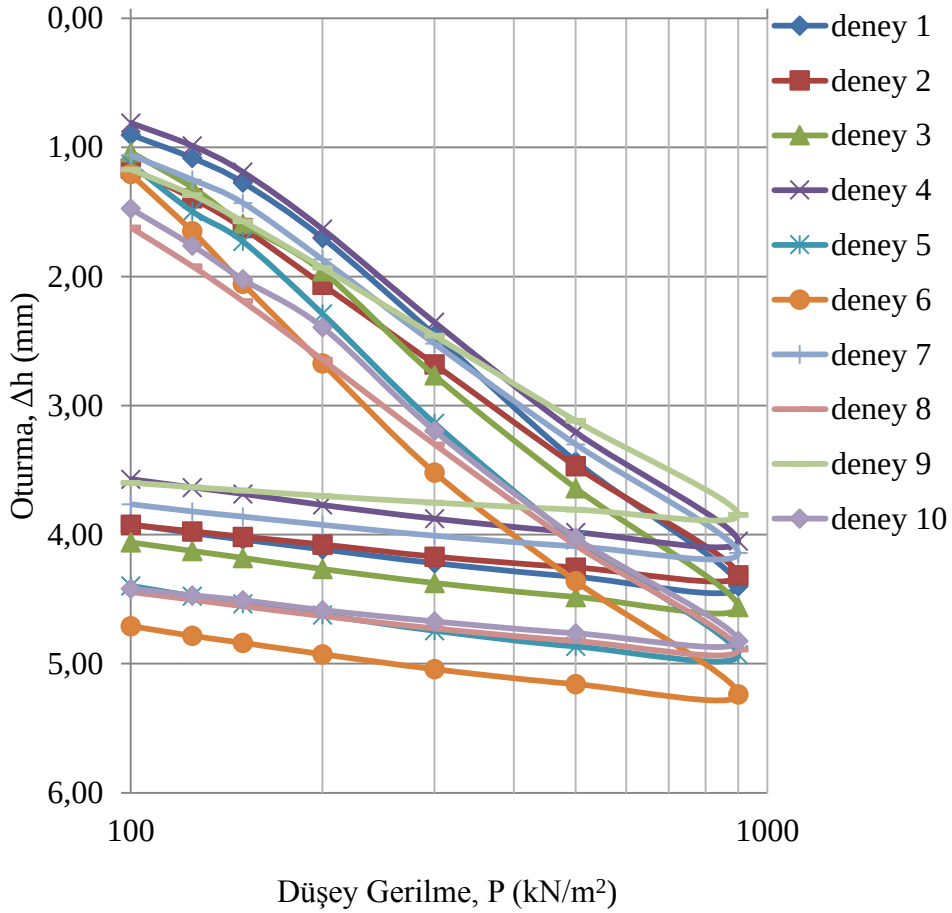
Şekil A.34 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N9.



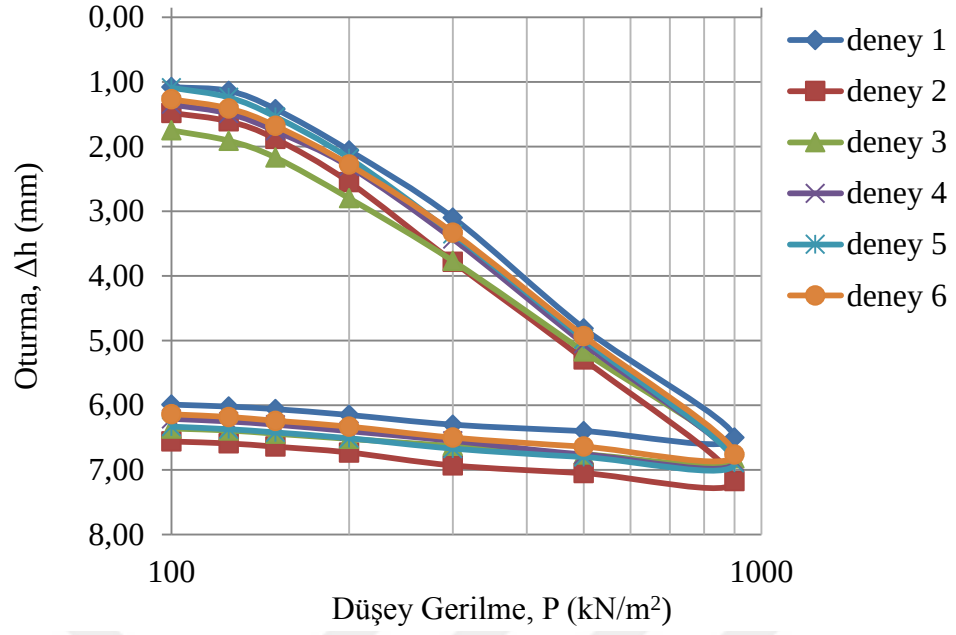
Şekil A.35 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N9.



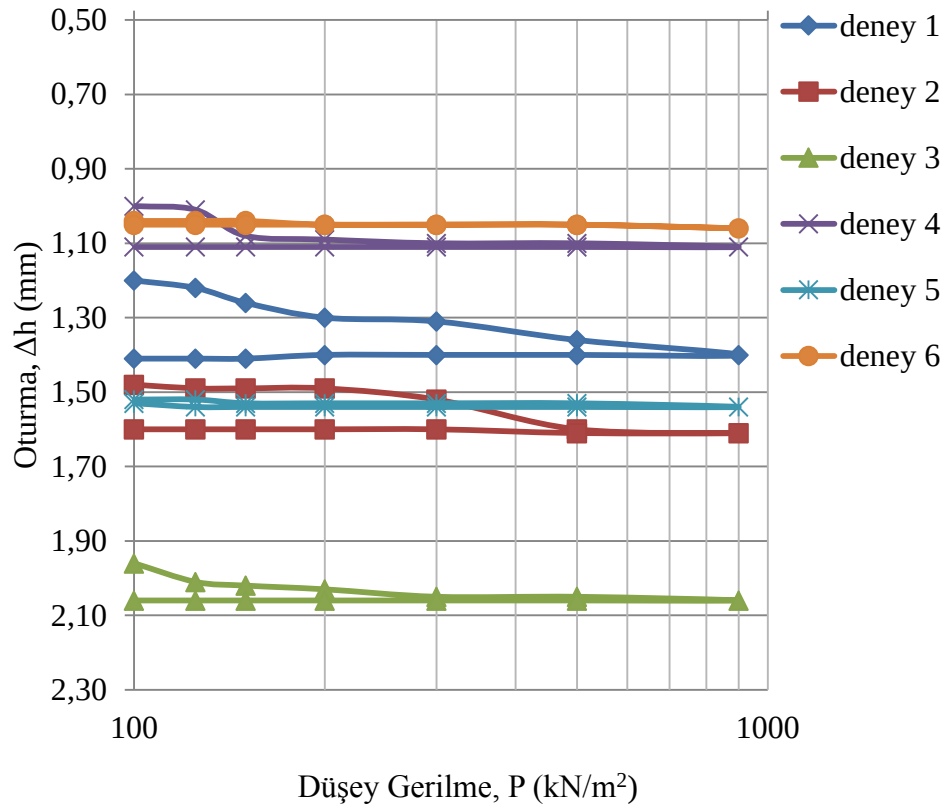
Şekil A.36 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları N9, (CH).



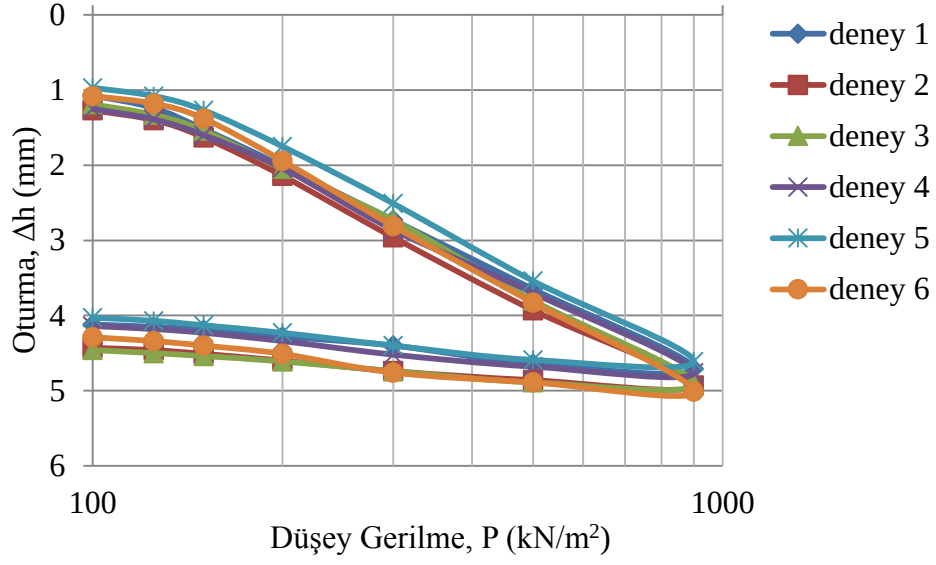
Şekil A.37 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları, N9 (CH).



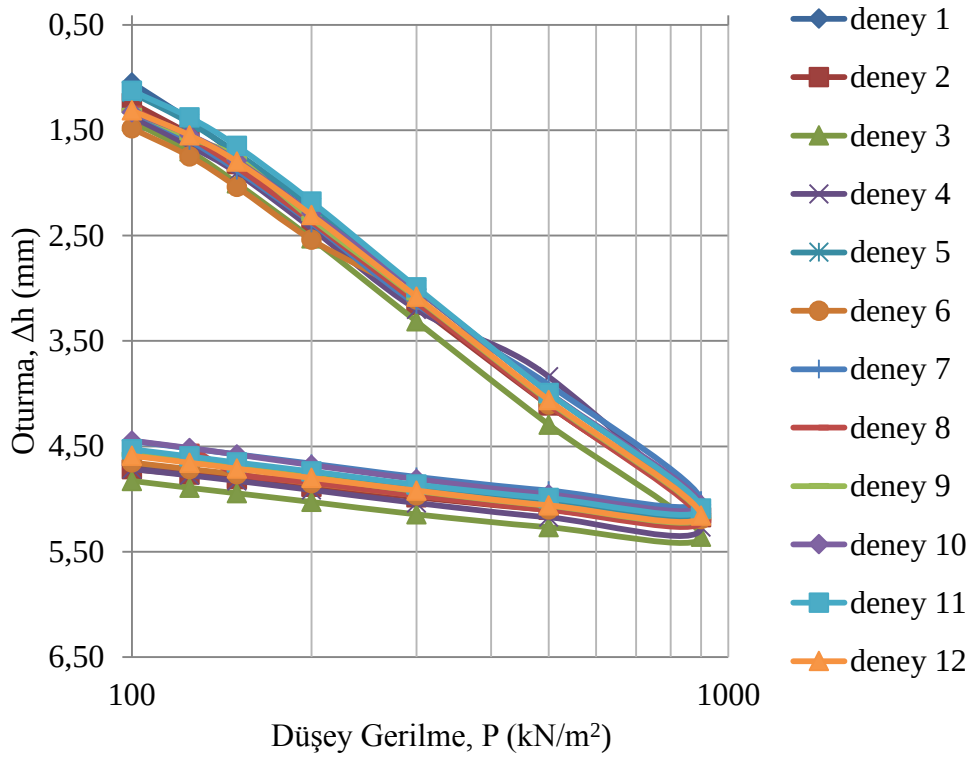
Şekil A.38 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Merkez Bölge N10.



Şekil A.39 : Üç Boyutlu Konsolidasyon Deneyi Sonuçları, Çevre Bölge N10.

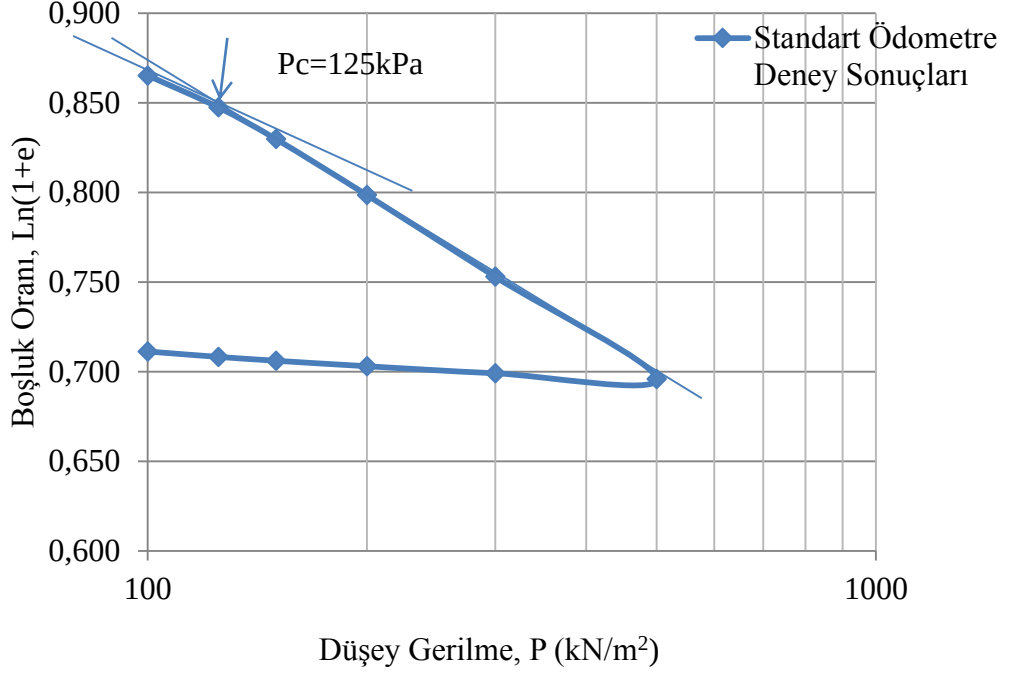


Şekil A.40 : Üç Boyutlu Alet ile Yapılan Ödometre Deneyi Sonuçları, N10.

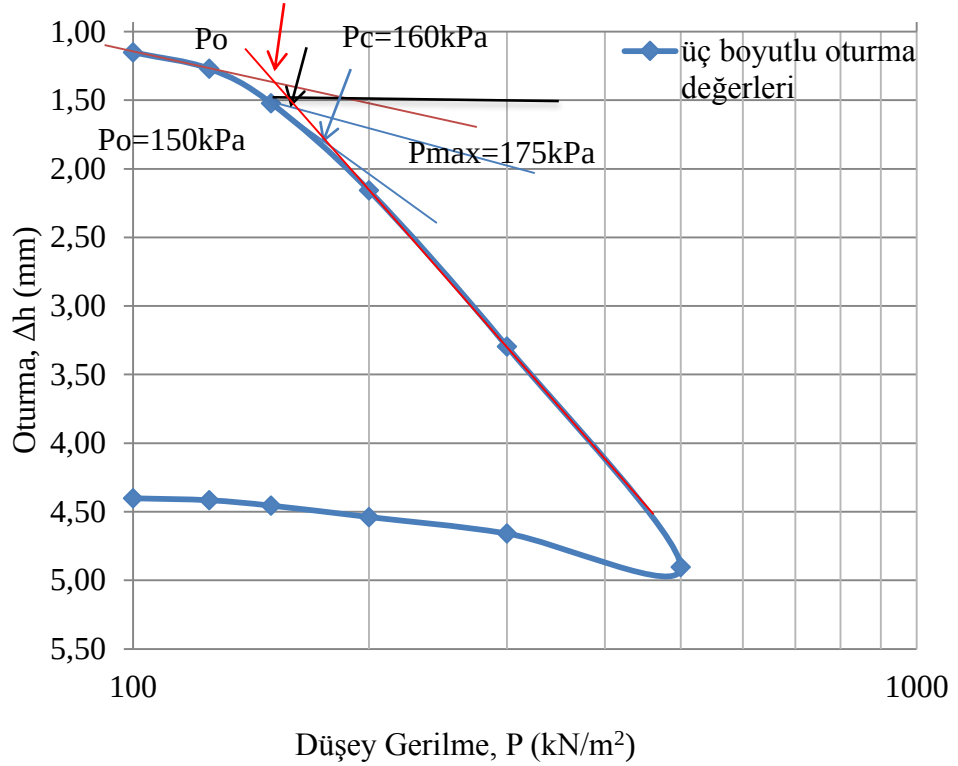


Şekil A.41 : Standart Ödometre Deneyi Sonuçları, N10 (MH).

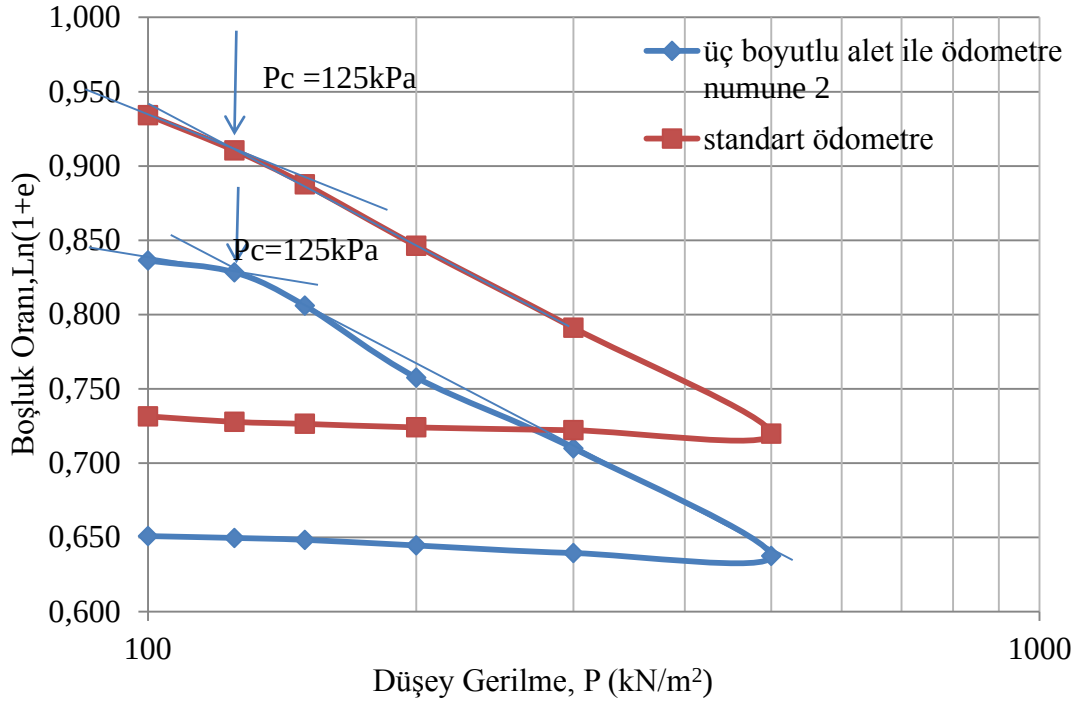
EK B : Ön Konsolidasyon Basıncının Farklı Yöntemler Kullanılarak Bulunması.



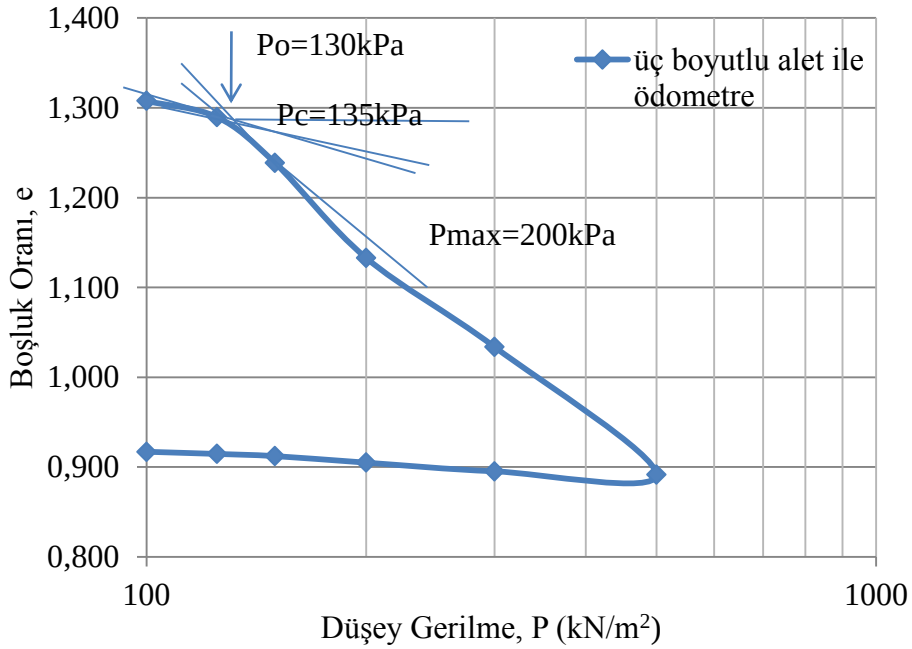
Şekil B.1 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N_1 (MH).



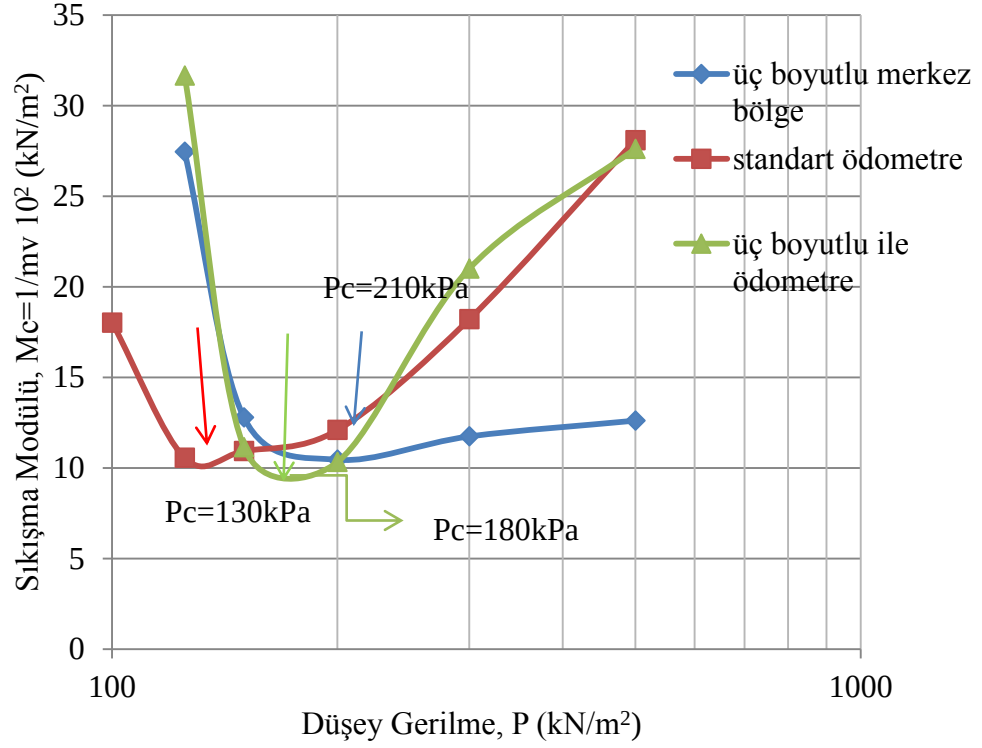
Şekil B.2 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N_1 .



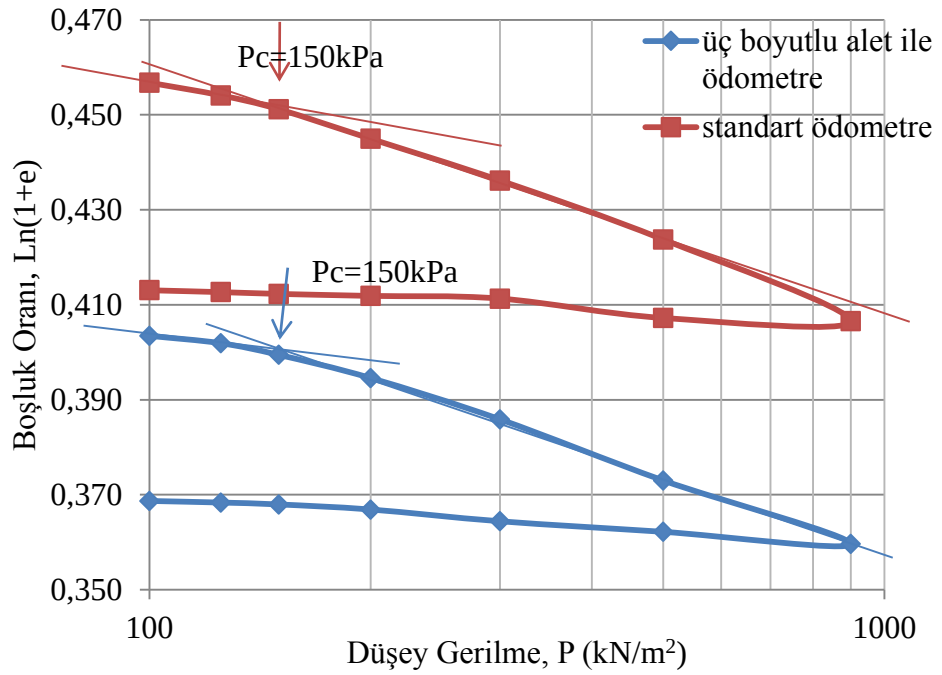
Şekil B.3 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N2 (CH).



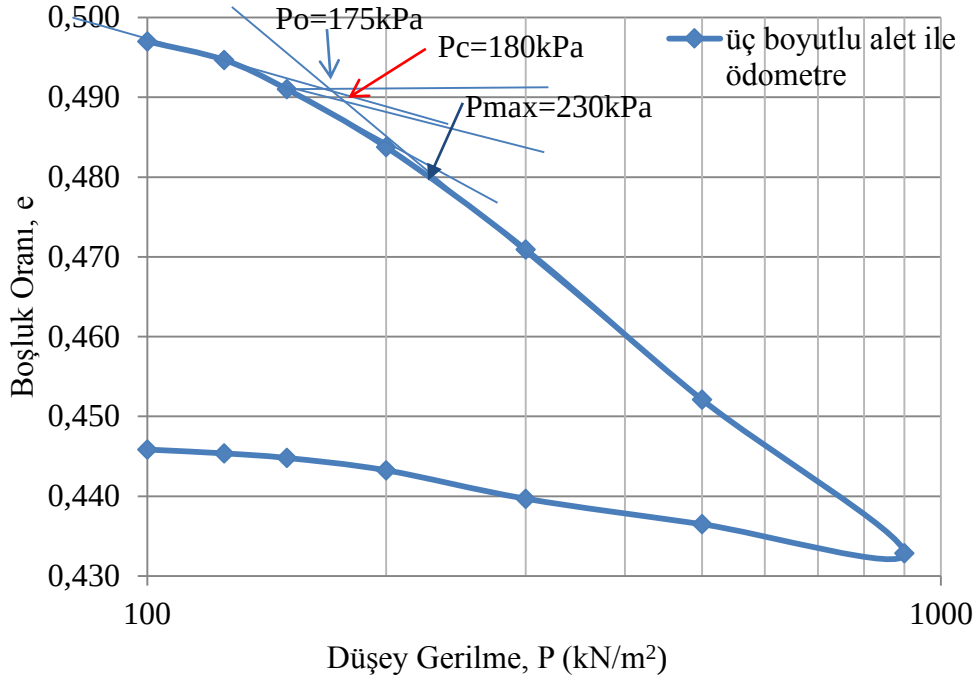
Şekil B.4 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N2.



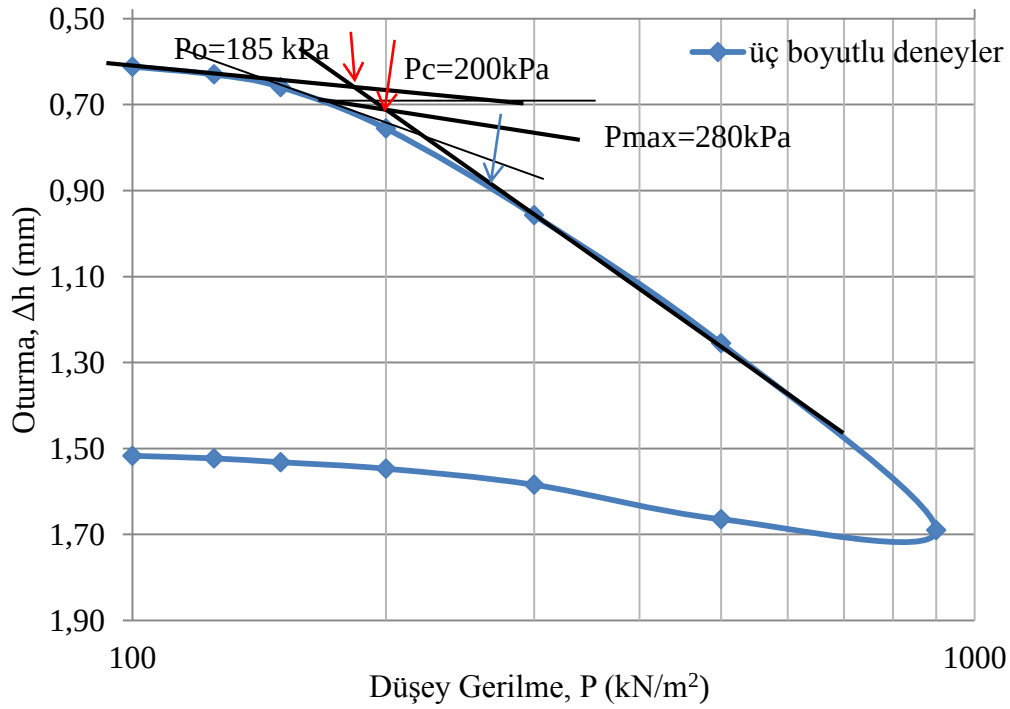
Şekil B.5 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N2.



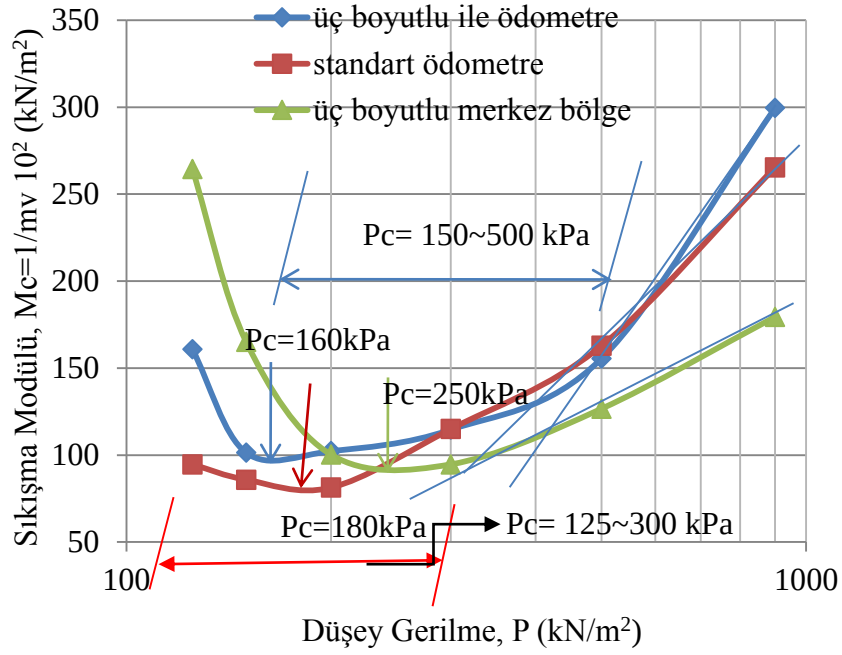
Şekil B.6 : Ln(1+e)-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N3 (CL-ML).



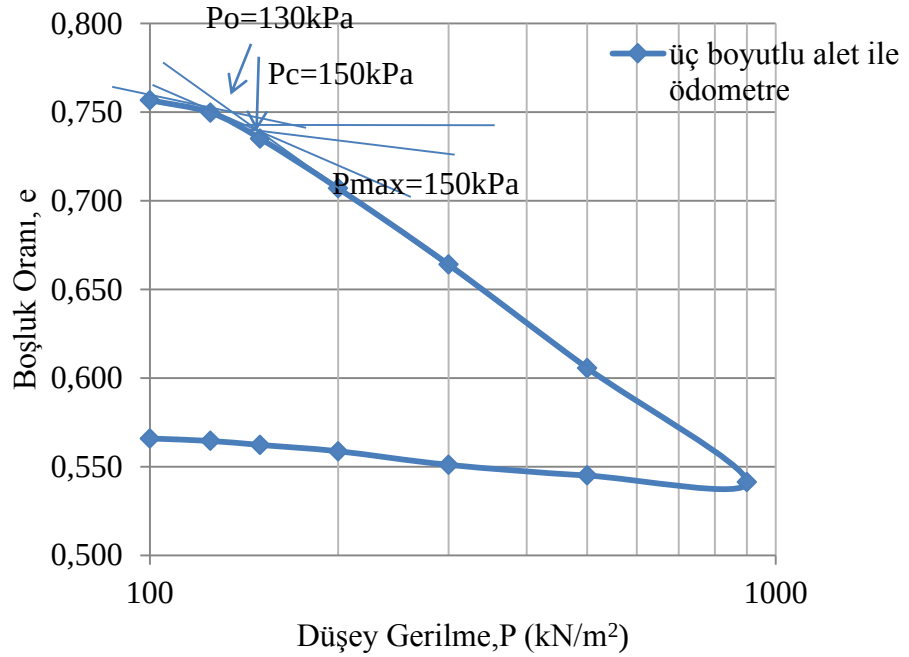
Şekil B.7 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N3.



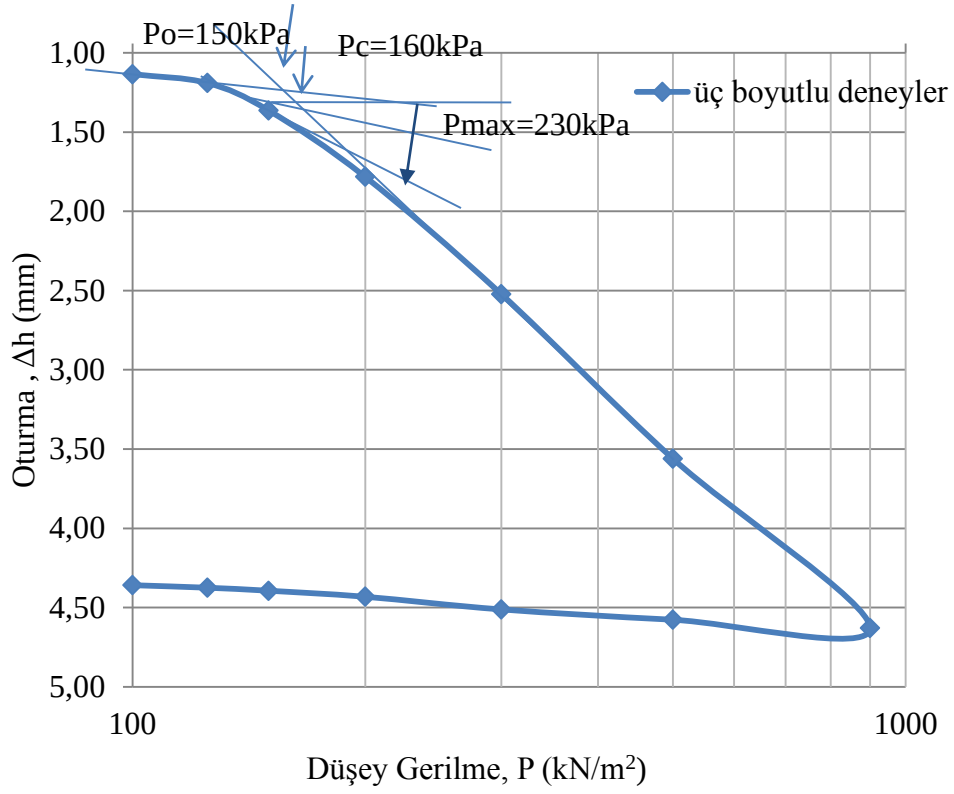
Şekil B.8 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N3.



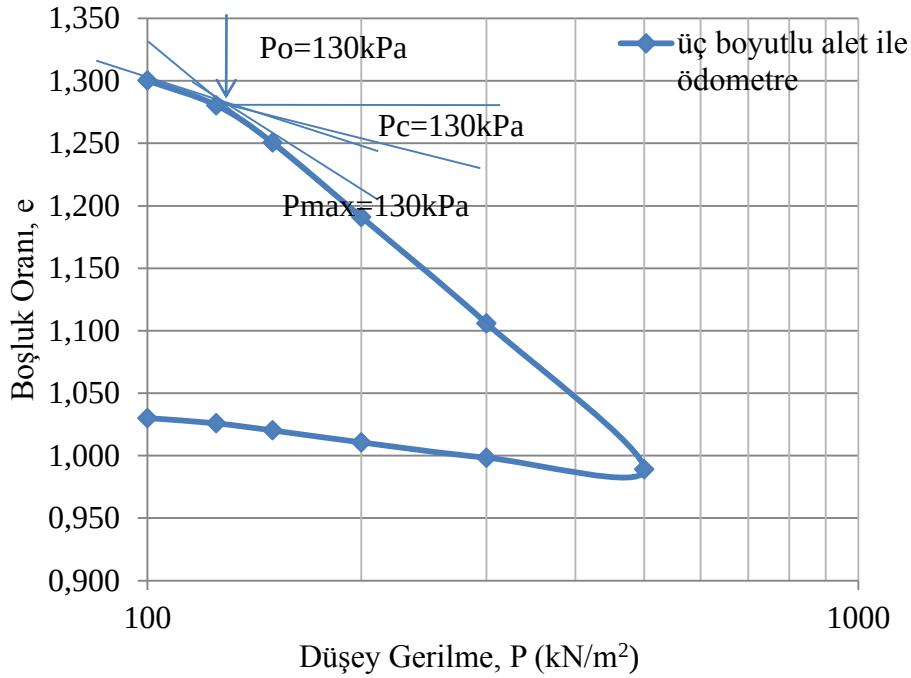
Şekil B.9 : Sıkışma Modülü- Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N3 (CL-ML).



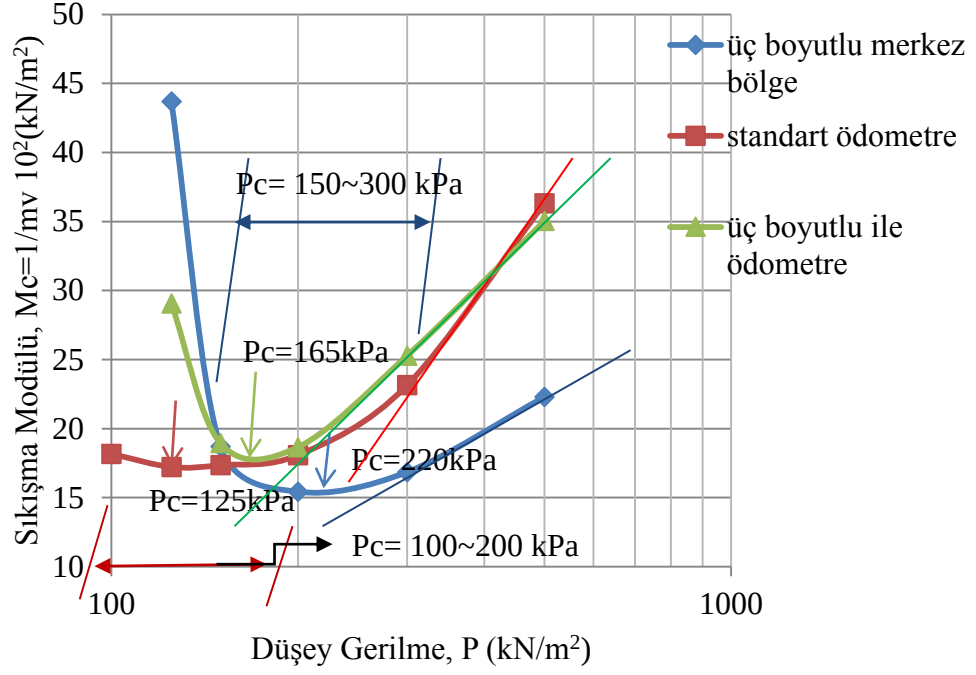
Şekil B.10 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N5 (CL).



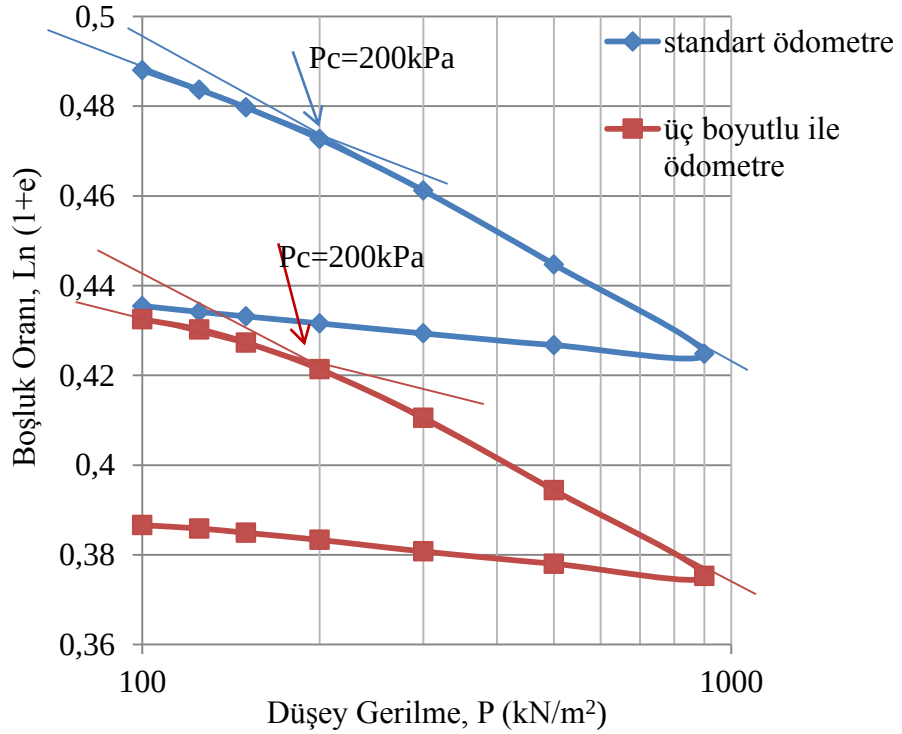
Şekil B.11 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N5.



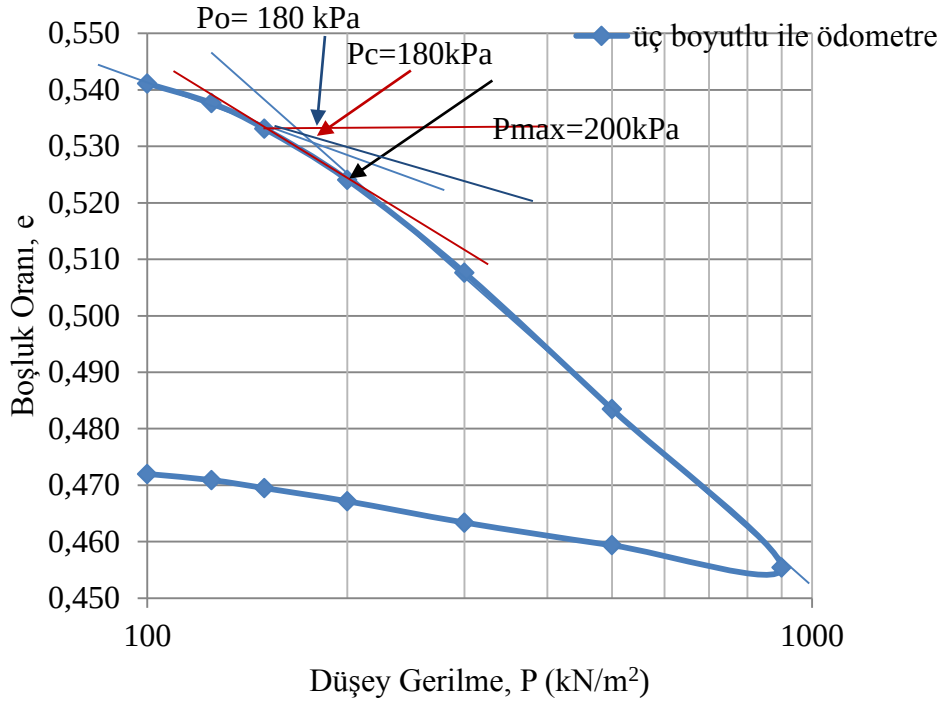
Şekil B.12 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N6 (MH).



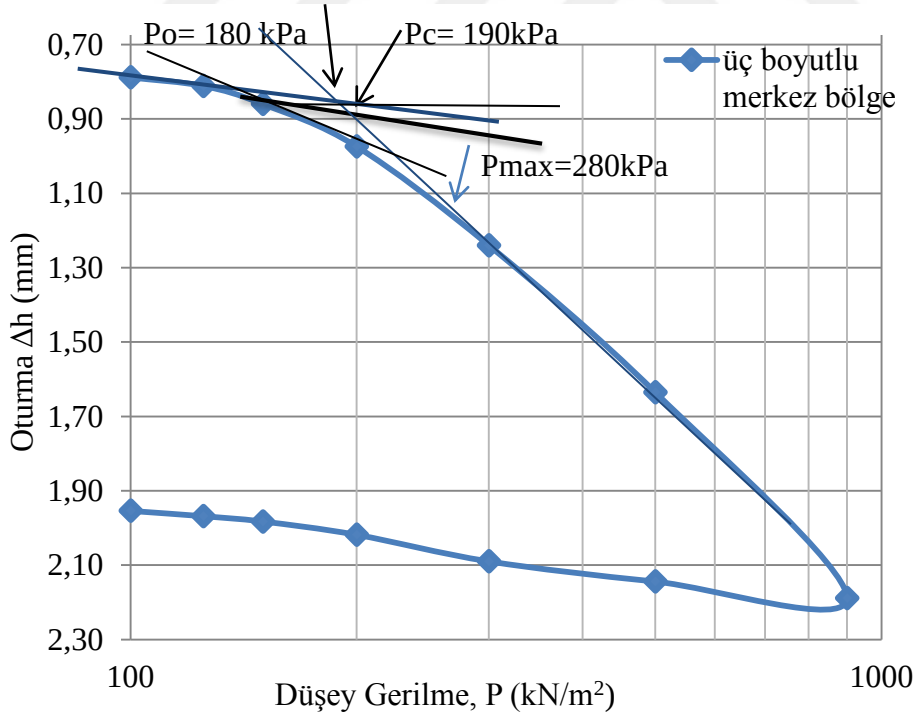
Şekil B.13 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N6 (MH).



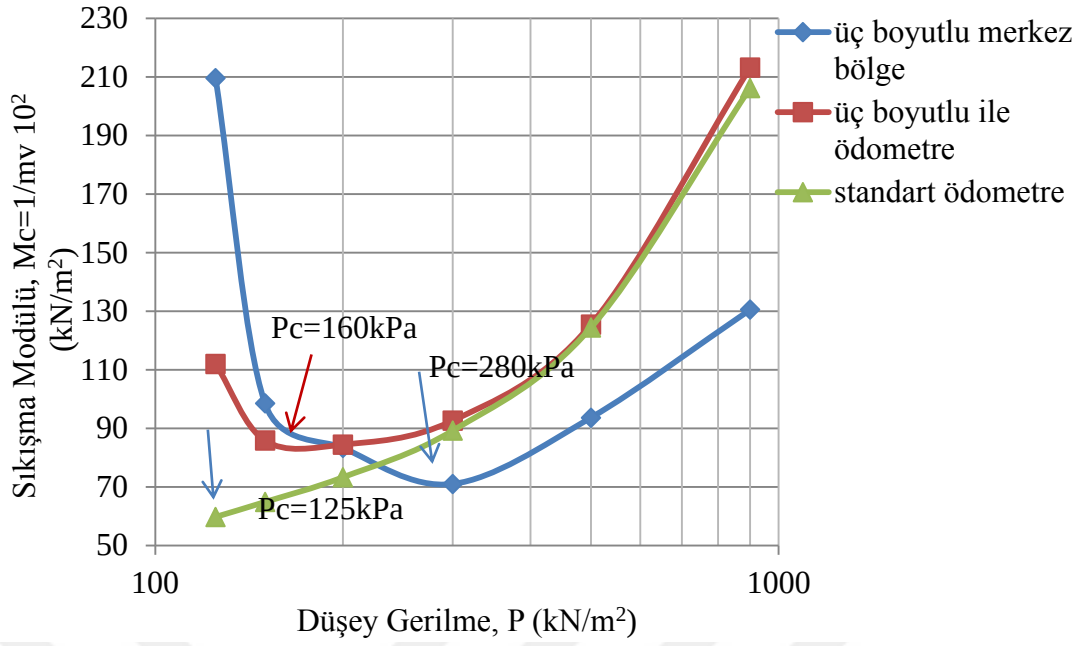
Şekil B.14 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N7 (CL-ML).



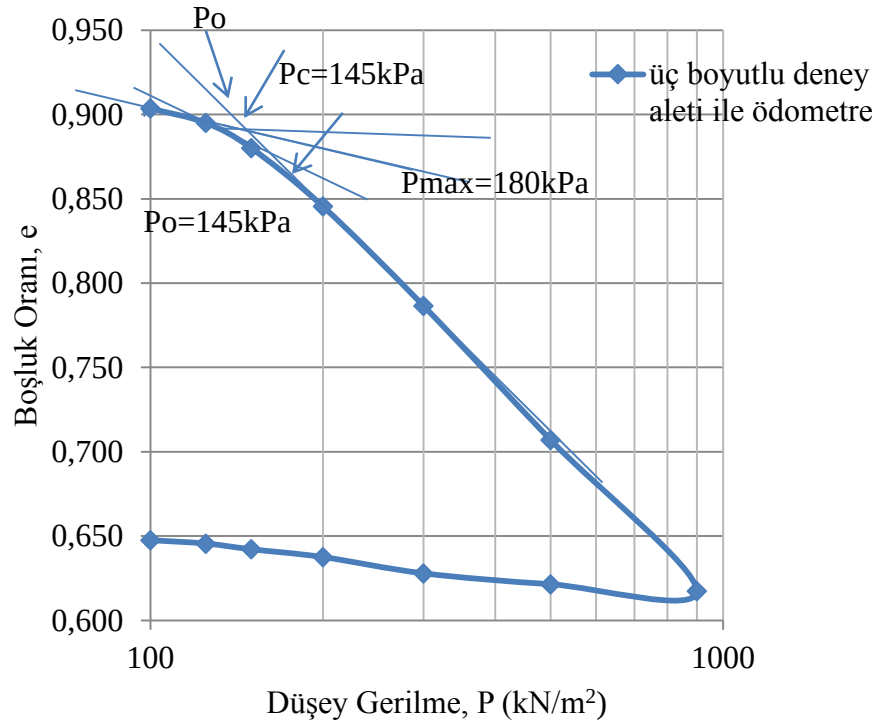
Şekil B.15 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncının Bulunması, N7.



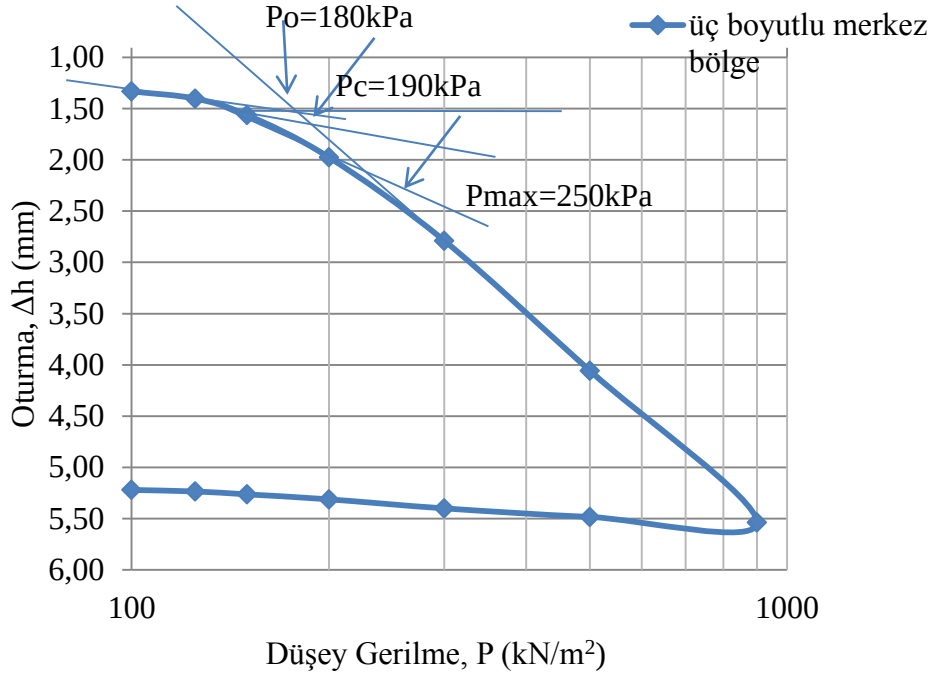
Şekil B.16 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N7.



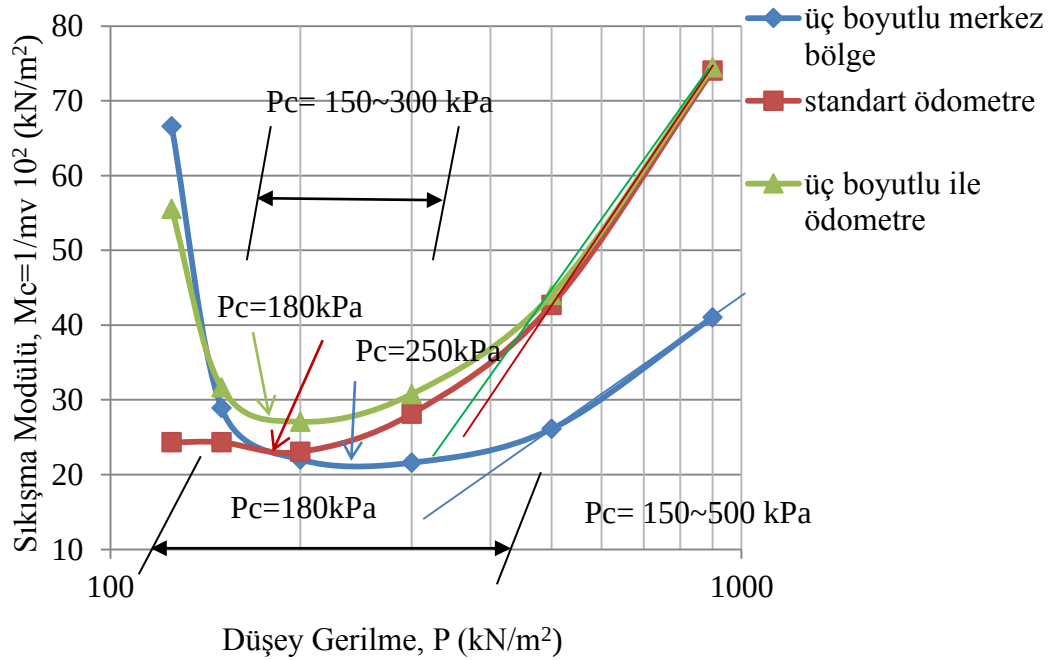
Şekil B.17 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları, N7.



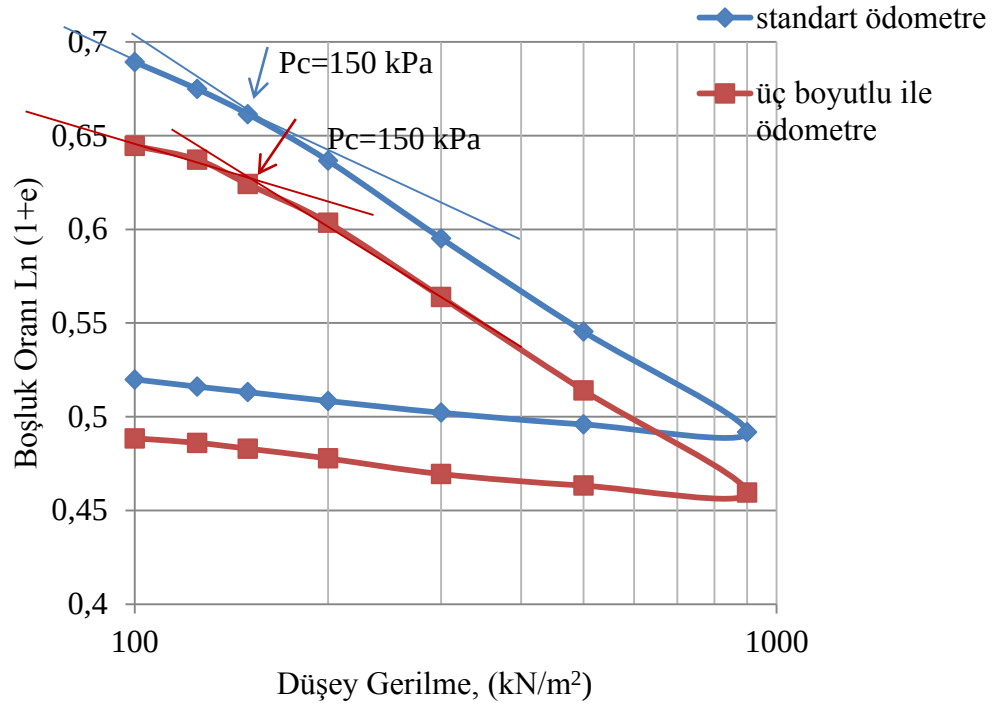
Şekil B.18 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N8.



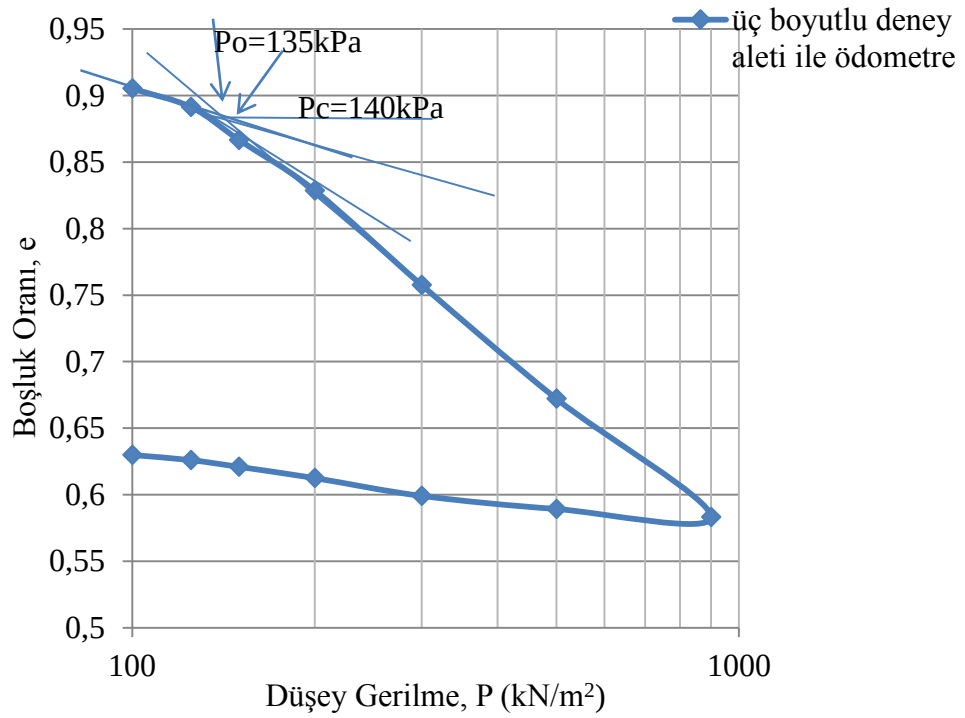
Şekil B.19 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N8.



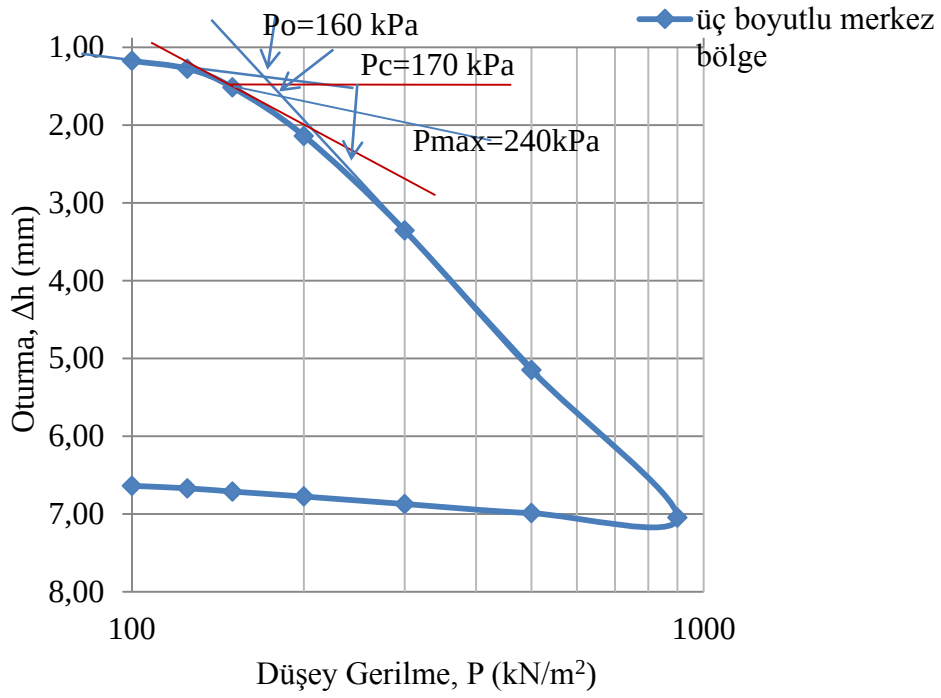
Şekil B.20 : Sıkışma Modülü- Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncıları. N8 (CL).



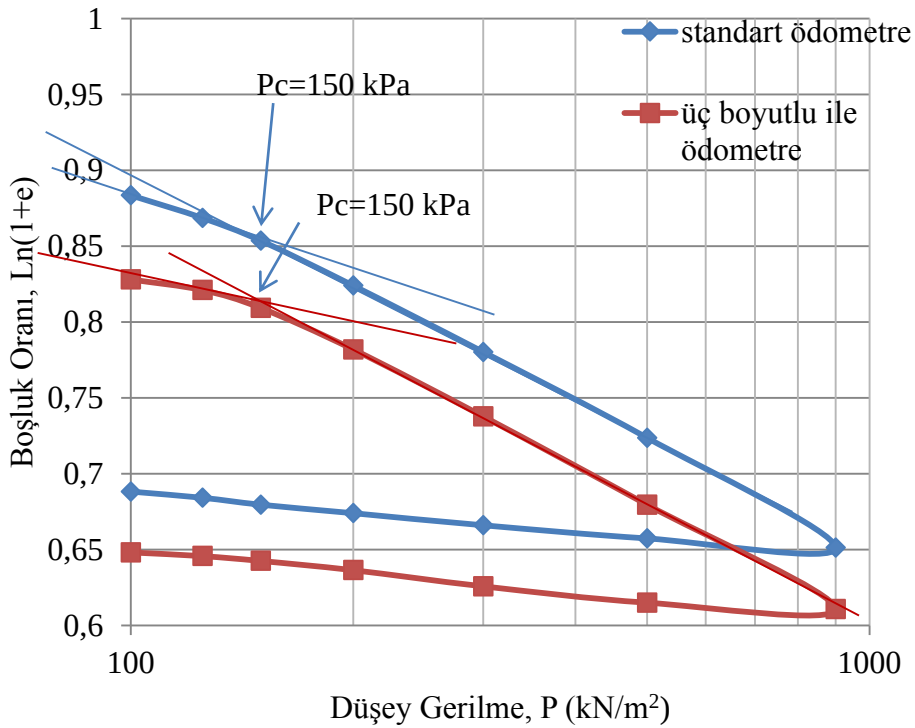
Şekil B.21 : $\ln(1+e)$ -Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncıları. N9.



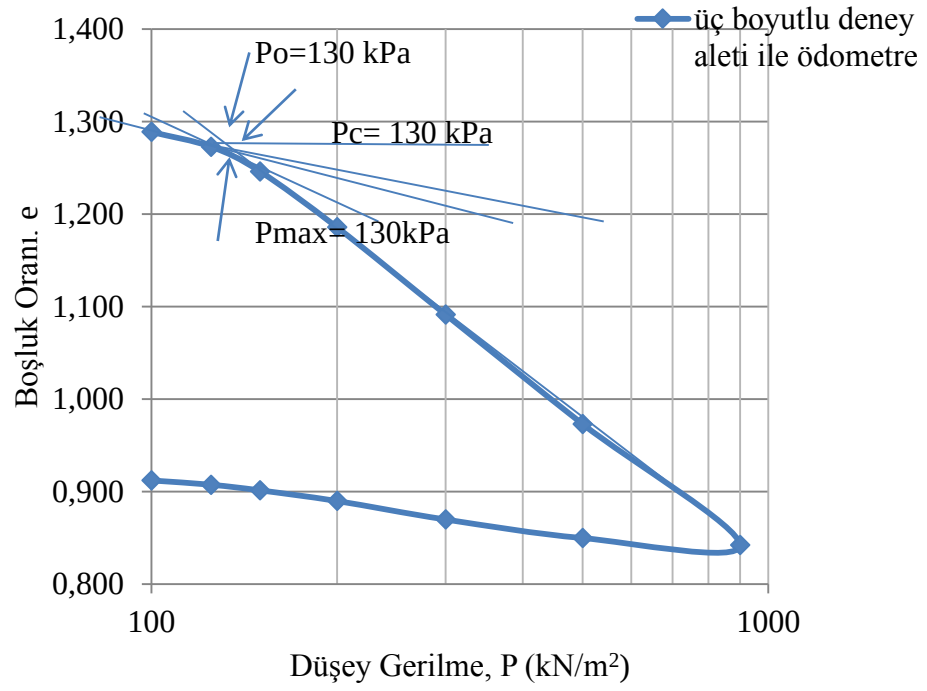
Şekil B.22 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N9.



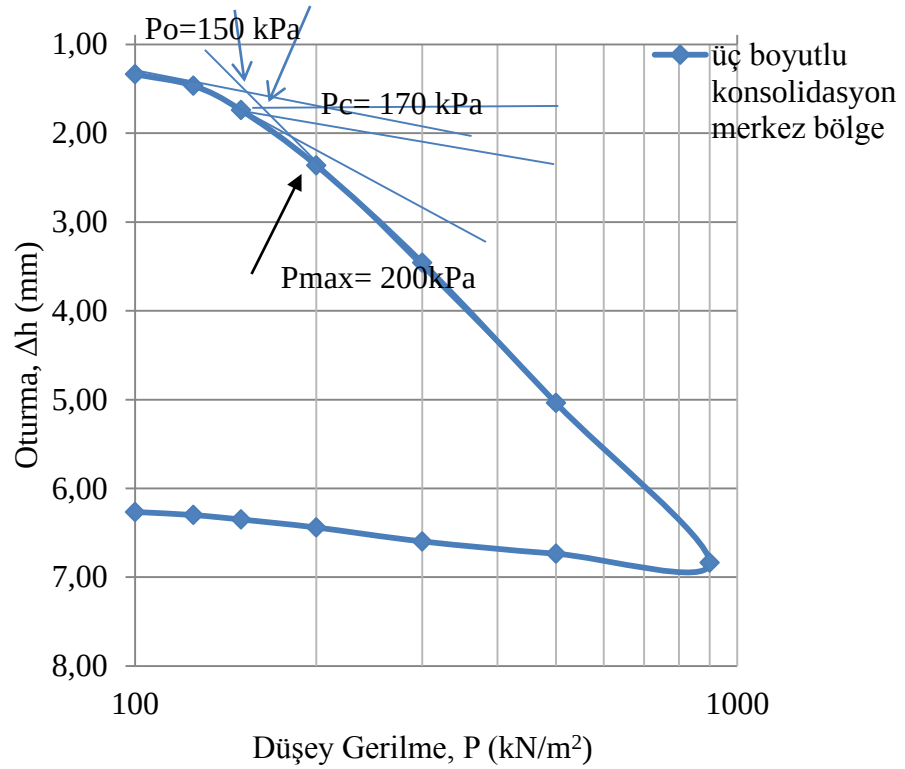
Şekil B.23 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N9.



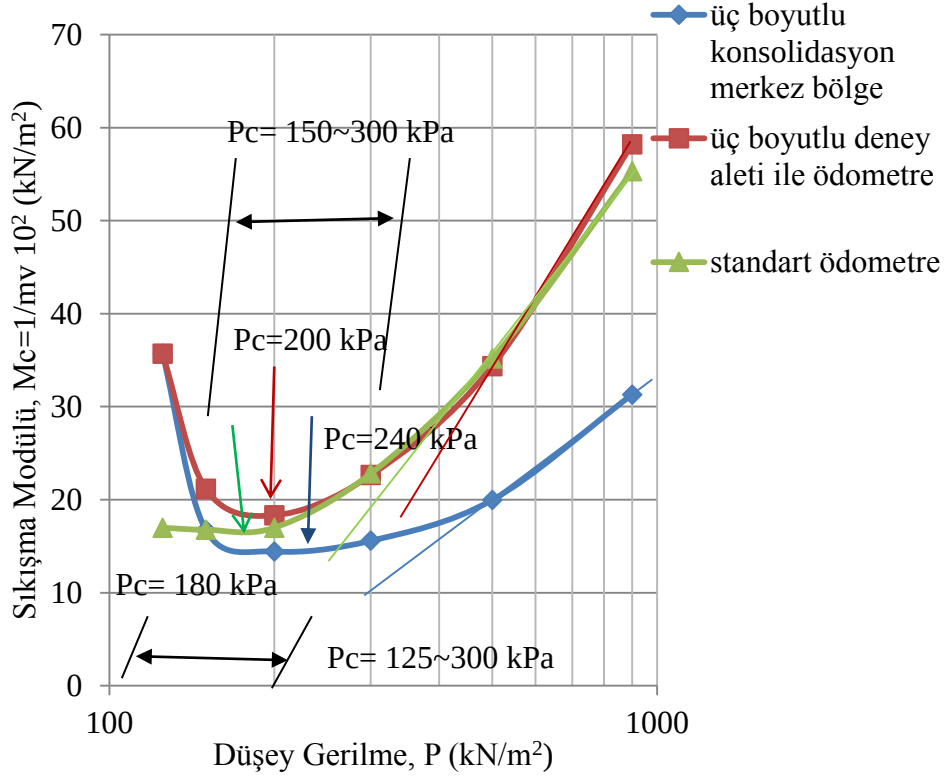
Şekil B.24 : Ln(1+e)-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncıları, N10.



Şekil B.25 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon basıncı, N10.



Şekil B.26 : Casagrande Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basıncı, N10.



Şekil B.27 : Sıkışma Modülü-Logaritma Düşey Gerilme Yöntemi ile Ön Konsolidasyon Basınçları N10.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Ayşen Çelebi
Doğum Yeri ve Tarihi : Balıkesir/Burhaniye 10/04/1965
E- Posta : aysen.aysen06@mynet

ÖĞRENİM DURUMU

Lisans : 1985, Uludağ Üniversitesi, Balıkesir Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

Yüksek lisans : 1988, İTÜ. İnşaat Mühendisliği, Yapı-Geoteknik Programı

TÜRETİLEN YAYINLAR

- Yıldırım, H. ve **Çelebi, A.** (2010), Üç Boyutlu Konsolidasyon, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi*, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul
- Yıldırım, H. ve **Çelebi, A.** (2012), Normal Konsolide Killi Zeminlerde Sınıflandırma Özellikleri ile Oturma Özellikleri Arasında Korelasyon, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta
- Yıldırım, H. ve **Çelebi, A.** (2013), Aşırı Konsolidasyon Oranı Düşük Killi Zeminlerin Ön Konsolidasyon Basıncı, *5. Geoteknik Sempozyumu*, Adana
- Yıldırım, H. ve **Çelebi, A.** (2013), Yeniden Konsolide Edilerek Hazırlanan Normal Konsolide Killi Zeminlerde Sınıflandırma Özellikleri ile Oturma Özellikleri Arasında Korelasyonlar, *5. Geoteknik Sempozyumu*, Adana
- Yıldırım, H. ve **Çelebi, A.** (2014), Ön Konsolidasyon Basıncı, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Vol. 29, No. 2, pp 39-53.