Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

FARKLI DEFORMASYON ORANLARI İLE CRS DENEYLERİ VE KORELASYONLAR

CRS TESTS WITH DIFFERENT STRAIN RATES AND CORELATIONS

Ayşen ÇELEBİ[1], Atilla ANSAL[2]

ÖZET

Bilindiği üzere standart ödometre deneyi sonucuna bağımlı oturma eğrilerinde iki deney noktası arasındaki mesafe fazladır. Genel olarak oturma eğrilerinin çiziminde 24 saat sonundaki deney verileri kullanılmaktadır. Bu değerlerin sabit efektif gerilmelerde oluşan ikincil oturmaları içerdiği bilinmektedir. Sabit deformasyon oranı ile ödometre deneylerine dayalı eğrilerde ise deneysel noktalar çok daha fazladır. Deney hızının seçimi numune tabanında oluşmasına izin verilen ilave boşluk suyu basınçları açısından önemlidir. Büyük hızlar kullanıldığında numune kesitlerinde hidrolik eğimler büyük olacaktır. Bu da üniform olmayan gerilme dağılımına neden olacaktır. Çok küçük hızlar ise deney süresinin fazla olmasının yanı sıra numune tabanında ilave boşluk suyu basıncının oluşmamasına sebep olacaktır. Bu durumda deney sonucuna bağımlı zeminin oturma – zaman davranışı hakkında bilgi temin edilemeyecektir. Bu çalışmada farklı deformasyon oranları ile CRS deneyleri yapılmış ve deney hızının konsolidasyon parametrelerine etkisi çalışılmıştır. Çalışmada yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminler ile standart proktor yöntemine dayalı optimum su içeriğinden daha fazla su içeriğinde hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Likit limitte zeminler yüzde yüz suya doygun kabul edilerek likit limitte boşluk oranları belirlenmiştir. Likit limitteki boşluk oranları ile sıkışma indisleri arasında bağıntının bulunup bulunmadığı da değerlendirilmiştir. Ayrıca oturma eğrileri Burland (1990) yayınında tanımlanan boşluk indisi ile normalize edilmiştir.
Anahtar kelimeler: *sabit deformasyon oranı, oturma eğrileri, sıkışma indisi, likit limitte boşluk oranı*

ABSTRACT

As it is known, the space between the two test points is large on the settlement curves obtained from the standard oedometer test. Generally, the test values obtained at the end of 24 hours are used to draw the settlement curves, These values are known to contain secondary compression. There are large number of test points in the settlement curves of CRS oedometer tests. The selection of the test rate is important becauce of the excess pore pressures allowed to set up at the bottom of the sample. When the high test rates are used the large hydraulic gradients will occur in the sections of the sample. This will cause the non uniform stress distribution. On the other hand, the slow test – speed will cause not only too much time to finish the test but also negligible excess pore pressure. Depending on, no information will be obtained about the consolidation characteristics of the sample. Using different strain rates, CRS oedometer tests were carried out and the effect of test speed on the consolidation properties was studied in this study. The reconsolidated samples and the samples prepared based on proctor procedure, whose water contents are higher than their optimum were used in this study. The soils at the liquid limit were supposed to be hundred percent saturated with water: at this state the void ratios were determined. The relationship between the void ratios and the compression indexes were evaluated. In addition, the settlement curves were normalized with the void index defined Burland (1990).
Keywords*: constant strain rate, settlement curves, compression index, void ratio at the liquid limit.*

[1] Dr. Özyeğin Üniversitesi, aysen.celebi@ozyegin.edu.tr (sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr. Özyeğin Üniversitesi, atilla.ansal@ozyegin.edu.tr

1. GİRİŞ

Standart ödometre deneyinde numuneye gerilme artımı uygulandığında ilave boşluk suyu basınçları başlangıçta büyüktür ve geçen zaman ile azalmaktadır. Genel olarak 24 saat sonunda ilave boşluk suyu basınçlarının sıfırlandığı kabul edilerek oturma eğrilerinin çiziminde 24 saatteki yer değiştirmeler kullanılmaktadır. Standart gerilme artımları kullanıldığında iki deney noktası arasındaki mesafe fazladır. Bu durumda oturma eğrileri iyi tanımlanmayacaktır. Standart ödometre deneyinin eksiklerinin giderilmesi amacı ile literatürde sabit deformasyon oranı (CRS) ile ödometre deney aleti geliştirilmiştir. CRS ile ödometre deneyinde deney hızının seçimi: deney anında numune tabanında oluşmasına izin verilen ilave boşluk suyu basıncının o anda ölçülen toplam gerilmenin belirli bir değerinden küçük olmasına bağımlıdır. Bilindiği üzere oturma eğrileri zeminlerin bileşenlerine bağımlıdır. Literatürde deney hızının seçimi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Amerikan standartlarında zeminlerin likit limitlerine bağımlı hız değerleri bulunmaktadır. CRS deneyi 1982 yılında Amerikan standartlarına alınmıştır. Geliştirdikleri matematiksel formülün kullanılabilirliği ve uygun deney hızının seçimi konusunda çalışma Lee vd., (1993) tarafından yapılmıştır. İlgili çalışmada β katsayısı tanımlanmıştır ve katsayının 0,1'den küçük olması önerilmektedir. Sabit gerilme artımının uygulandığı diğer bir çalışma Janbu vd., (1981) tarafından yapılmıştır. İlgili çalışmada deney esnasında numune tabanında ölçülen ilave boşluk suyu basıncının o andaki toplam gerilmeye oranı olarak tanımlanan λ katsayısı tanımlanmıştır. Farklı λ değerlerinde ve konsolidasyon esnasında λ sabit olacak biçimde deneyler yapılmıştır. Diğer bir çalışma Kassim vd., (2016) tarafından Lee vd., (1993)'te tanımlanan β katsayısı kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışmada N2 ve N8 zeminleri dışında diğer zeminlerin likit limitlerinin %30~60 aralığında bulunması dolayısıyla CRS deneyleri 0,004 (%/dk) deformasyon oranında yapılmıştır (Çelebi ve Ansal, 2024). Bütün deneylerde ilave boşluk suyu basıncının o andaki toplam gerilmeye oranının en büyük değeri ($\Delta u/\sigma$) 0,3 kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında bu çalışmada deney esnasında ilgili oran sabit değildir. Konsolidasyon esnasında $\Delta u/\sigma$ oranı 0,3'e yaklaştığında program o andaki hız değerini 2 kat azaltarak deneye devam etmektedir. CRS deney aleti ve N2, N8 zeminleri dışındaki zeminlerin deney sonuçları Çelebi ve Ansal (2024, 2025)' te bulunmaktadır. Bu çalışmada N2 ve N8 zeminleri ile farklı deformasyon oranları kullanılarak deneyler yapılmış ve farklı deformasyon oranının oturma eğrilerine etkisi çalışılmıştır. Ayrıca deney sonuçlarının karşılaştırılabilmesi amacı ile kullanılan zeminler ile standart ödometre deneyleri de yapılmıştır.

Zeminler likit limitte yüzde yüz suya doygun kabul edilmiş ve likit limitteki boşluk oranları ile sıkışma indisleri arasında olası bağıntının bulunup bulunmadığı da değerlendirilmiştir. Konsolidasyon eğrilerinin benzer olması nedeni ile oturma eğrileri Burland (1990)'da tanımlanan boşluk indisi (I_v) ile normalize edilmiştir.

2. DENEYLERDE KULLANILAN ZEMİNLER

Standart ve CRS ile ödometre deneylerinde laboratuvarda iki farklı yöntem ile hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Birinci grupta numuneler standart proktor metoduna dayalı optimum su içeriklerinden daha fazla su içeriklerinde hazırlanmıştır. Dolayısıyla numunelerin kompaksiyon parametreleri ilgili deney yapılarak belirlenmiştir. Bu gruptaki zeminler çalışmada N ile gösterilmiştir. İkinci grup numuneler (S) suya daha doygun ve daha

homojen numune temin edilebilir görüşü ile yeniden konsolide edilerek hazırlanmıştır. Bütün zeminler etüvde kurutulduktan sonra dövülerek danelerine ayrılmıştır. Standart proktor ile hazırlanan zeminler 4 numaralı elekten, yeniden konsolide edilerek hazırlananlar ise 40 numaralı elekten elenmiştir. Standart proktor yönteminde kuru ağırlığı belirlenen zeminlere su içeriği optimum su içeriğinden fazla olacak biçimde su ilave edilerek homojen karışım hazırlanmıştır. Karışım proktor kalıbına 3 eşit kalınlıkta ve her kalınlığa 25 vuruş uygulanarak yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler kalıptan alındıktan sonra deneylerin yapımında kullanılmıştır. Yeniden konsolide edilerek numune hazırlama işleminde 40 numaralı elekten geçen malzemeden yeterli miktar zemin alınmış ve ilgili zeminin likit limiti dolaylarında su içeriği olacak biçimde su ilave edilerek karışım hazırlanmıştır. Karışım karıştırılarak danelerin kabın tabanına çökelmesine izin verilmemiştir. Hazırlanan karışım kapta 3 gün bekletildikten sonra iç çapı 29 cm olan çamur konsolidasyon aletine alınmıştır. Karışımın su içeriğinin büyük olması dolayısıyla olası numune kaybını önlemek için ağırlıklar yükleme askısına belirli zaman aralıklarında kademeli olarak ilave edilmiştir. S1 yaklaşık 0,7 kg/cm^2 de 19 ay konsolide edilmiştir. S2 ise yaklaşık 0,8 kg/cm^2 de 7 ay konsolide edilmiştir. Yeniden bir boyutlu konsolide edilen numuneler çamur konsolidasyon aletinden alınarak ödometre deneylerinde kullanılmıştır

Kullanılan zeminler ile likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmış ve zeminler birleşik zemin sınıflandırma metoduna bağımlı isimlendirilmiştir. Oturma eğrilerinin zeminlerin içerdikleri kil miktarlarına ve kil minerallerinin türlerine bağımlı oldukları dikkate alınarak hidrometre deneyleri de yapılmıştır. Sözü edilen deneylerden belirlenen zemin parametreleri Tablo 1' de açıklanmıştır.

Tablo 1. Zeminlerin indeks ve kompaksiyon parametreleri.

Numune no	Likit limit (w_L)	Plastik limit (wp)	Plastisite indisi (Ip)	Kil miktarı	ρ_d^{mak}	w_{opt}	ρ_s	Zemin grubu
	(%)	(%)	(%)	(%)	(Mg/m^3)	(%)	(Mg/m^3)	
S1	46	20	26	36	-	-	2,8	CL
S2	44	26	18	32	1,82	17	2,76	CL
N1	56	28	28	49	1,63	22	2,76	CH
N2	99	47	52	68	1,35	20	2,76	MH
N4	32	18	14	34	1,58	18	2,75	CL
N5	36	20	16	38	1,77	16	2,76	CL
N5a	44	26	18	32	1,82	17	2,76	CL
N8	48	29	19	46	1,77	17,5	2,76	ML

Standart ödometre deneylerinde kullanılan ringin dış çapı 70 mm. ve yüksekliği 20 mm. dir. CRS deneylerinde kullanılan ringin iç çapı 62,5 mm. iken yüksekliği 25,4 mm. dir. Deneyler için numuneler: öncelikle ring boyutlarına yakın boyutlara getirilmiştir. Daha sonra ring zemine batırılarak ring çevresindeki zeminler temizlenerek hazırlanmıştır.

3. FARKLI DEFORMASYON ORANLARINDA CRS DENEYLERİ

CRS deneylerinde numune tabanında ölçülen ilave boşluk suyu basıncının o anda ölçülen toplam gerilmenin belirli bir değerinden küçük olması gereklidir. Büyük hızlarda normal gerilme kısa sürede çok artacaktır. Dolayısıyla numune tabanında ölçülen ilave boşluk suyu basınçları da büyük olacaktır. Küçük hızlarda ise numune tabanında ilave boşluk suyu basınçları oluşmayacaktır. Zeminin konsolidasyon ve permeabilite katsayıları hakkında bilgi temin edilemeyecektir. Uygun deneyin yapılabilmesi amacı ile deney programı literatüre bağımlı $\Delta u/\sigma$ oranına maksimum sınır değeri kullanmaktadır. İlgili değer çalışmada 0,3

olarak kullanılmıştır. ASTM-D-4186-82 standardında zeminlerin likit limitlerine bağımlı deformasyon oranları açıklanmaktadır. N2 isimli zeminin likit limiti Tablo 1'de görüldüğü üzere %99 dur. ASTM-D-4186-82 ye bağımlı deformasyon oranı 0,001(%/dk) dır. N2 zemini ile 0,001 (%/dk) kullanılarak 3 adet deney yapılmıştır. Ayrıca farklı deformasyon değerlerinin oturma eğrilerine etkilerinin görülebilmesi amacı ile 1 ve 0,0001 (%/dk) değerleri ile de deneyler yapılmıştır. Deformasyon oranının 1 (%/dk.) kullanıldığı deneyde doygunluk aşamasında numune basıncı sıfırdır. Numune ilk olarak 150 kPa başlangıç gerilmesinde 5 saat konsolide edilmiştir. Başlangıç gerilmesinin 150 kPa kullanılması numunenin kabarma eğiliminden dolayıdır. Numunelerin etkisinde bulundukları düşey gerilme miktarlarına, içerdikleri kil miktarlarına ve kil minerallerinin türlerine, deney başı su içeriklerine, kalıba yerleştirilme enerjilerine bağımlı kalınarak kabarma basınçları değişmektedir. Konu ile ilgili bilgi Ansal ve Çelebi (2017)'de bulunmaktadır. Deney başı su içeriği w_0 = %27,43 Tablo 1' den görüldüğü üzere optimum değerinden daha fazladır. Daha sonra aynı gerilme etkisinde iken hücre alt ve üst başlıkları arasında bağlantıyı sağlayan vana kapatılarak konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Dolayısıyla ilave boşluk suyu basınçları numune tabanında ölçülürken drenaja üst başlıktan izin verilmektedir. Yaklaşık 7 dk. sürede toplam gerilmeler 0,1857 (mm/dk.) ortalama yer değiştirme hızı ile 846 kPa artarak 998 kPa ulaşmıştır. Deformasyon oranının 0,0001 (%/dk.) olduğu deney 2'de ise başlangıç gerilmesi 150 kPa olarak programda kullanılmasına karşın başlangıç aşamasında ilgili toplam düşey gerilme 174 kPa' a ulaşmıştır. Numunelerin her ikisinde de Tablo 2'den görüleceği üzere deney başı su içerikleri aynıdır. Deney aleti başlangıç aşamasında programa yazılan toplam gerilme değerini yaklaşık 1,5~2 dk sürede artımsal biçimde numuneye uygulamaktadır. Deney 2'de doygunluk aşamasında numune basıncı 15 kPa kullanılmıştır. Numune bu basınç etkisinde 25 saat doygun duruma getirilmiştir. Daha sonra konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Deney hızının küçük olması dolayısıyla bu aşamada yer değiştirmeler belirli zaman aralıklarında sabit kalmış hatta küçük miktarlarda azalmalar görülmüştür. Yer değiştirmelerde azalmaların görüldüğü durumlarda deformasyon oranları negatif olarak kaydedilmiştir. Tablo 2'de ortalama deformasyon oranlarının belirlenmesinde sözü edilen değerler de kullanılmıştır. Ortalama 0,000023 mm/dk yer değiştirme hızı ile toplam gerilmeler 173,86 kPa'dan 876,12 kPa'a 40 gün 13 saatte ulaşmıştır. Likit limit değerleri derinlikle %50 ile %85 aralığında değişen Bothkennar kili ile 0,015~0,00015 mm/dk sabit hızlarda CRS deneyleri Nash vd., (1992)' de yapılmıştır. İlk hız ile yapılan deney 10 saate tamamlanırken ikinci hız ile yapılan deney 45 günde tamamlanmıştır. Buradaki çalışmada 1 (%/dk) deformasyon oranın kullanıldığı deney sonuçlarında küçük miktarlarda ilave boşluk suyu basınçları ölçülmesine karşın deney 2'de ilave boşluk suyu basınçlarının artan gerilme ile değişmediği görülmüştür. Deformasyon oranının 0,001 (%/dk) kullanıldığı deney 3'te yer değiştirmelerde geriye dönmeler bulunmamasına karşın birbirini takip eden bazı değerlerin değişmediği görülmüştür. Sözü edilen aralıklarda m_v değerleri sıfırdır. Ayrıca bazı zaman aralıklarında yer değiştirmeler ve ilave boşluk suyu basınçları artarken toplam gerilmeler sabit kalmış veya küçük miktarlarda geriye dönmüştür. Dolayısıyla sözü edilen aralıklarda efektif gerilme farkları negatif hesaplanmıştır. Bu durumda ilgili aralıklarda m_v ve c_v katsayılarının negatif belirlenmesine neden olmuştur. Deney 3, 4 ve 5'te numunelere 170 kPa başlangıç gerilmesi uygulanmıştır. Deney programı efektif gerilmeleri denklem 1 ile tanımlanan formül ile hesaplamaktadır. Aynı formül Wissa vd., (1971) çalışmasında da kullanılmıştır.

$$\sigma' = [(\sigma)^3 - 2(\sigma)^2\Delta u + \sigma(\Delta u)^2]^{(1/3)} \quad (1)$$

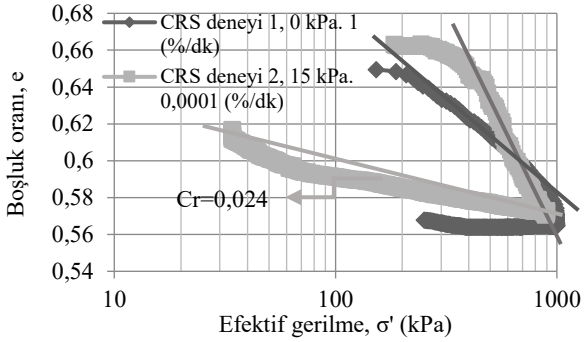
σ : numuneye etkiyen eksenel toplam gerilme,
Δu : ilave boşluk suyu basıncı

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde standart ödometre deneyine benzer Terzaghi (1943) teorisindeki kabuller kullanılmıştır. Konsolidasyon aşamasının herhangi anında numune düşey kesitinde ilave boşluk suyu basıncının dağılımı parabol kabul edilerek deney sonuçları standart ödometre deneyi sonuçlarına benzer biçimde değerlendirilmiştir (Atkinson 2007, Davison and Atkinson, 1990). Boşluk oranındaki değişimler numune yüksekliğindeki değişimler (Δh) yardımı ile (Δh/h) = Δe/(1+e) hesaplanabilir. Hesaplanan değerlerle hacimsel sıkışma katsayıları m_v = ((Δh/h) /Δσ') küçük gerilme artımlarında hesaplanabilir. Çalışmada konsolidasyon katsayıları da (c_v) denklem (2) yardımı ile hesaplanmıştır.

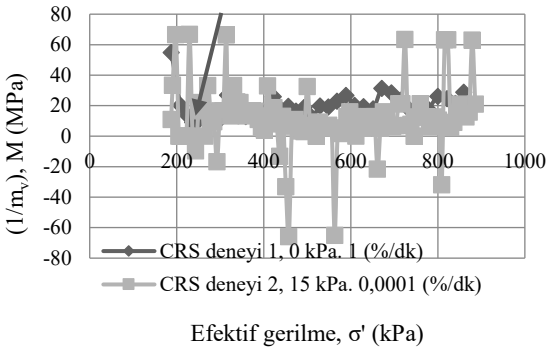
$$c_v = \frac{H^2}{2\Delta u}\frac{\Delta \sigma'}{\Delta t} \qquad (2)$$

Δt : zaman aralığı,
Δσ' : ilgili zaman aralığında efektif gerilmedeki değişim,
Δu : ilgili zaman aralığında ilave boşluk suyu basıncındaki değişim,
H : ilgili zaman aralığında ortalama drenaj yüksekliğidir.

Çalışmada optimum su içeriğinden daha fazla su içeriğinde standart proktor metodu ile hazırlanan numunelerin kullanılması dolayısıyla numunelerin deney başı boşluk oranları önemli miktarda farklıdır. Oturma eğrilerinin daha iyi değerlendirilebilmesi görüşü ile deney 1 ve 2' nin grafikleri Şekil 1a ve 1b'de gösterilmiştir.



Şekil 1a. Boşluk oranının σ' ile değişimi, N2.

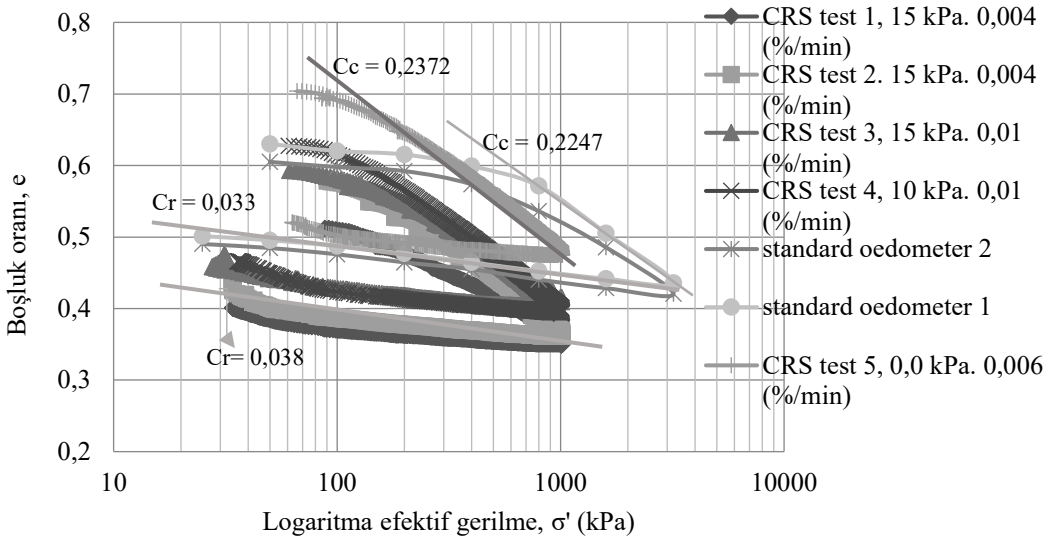


Şekil 1b. σ' ile M' nin değişimi, N2.

Deney 1'de sıkışma indisi 548~998 kPa aralığında 0,1692 hesaplanırken, deney 2'de aynı değer 506~886 kPa aralığında 0,2451 hesaplanmıştır. Deney 2'de M değerlerinin negatif olması önceden söz edildiği üzere yer değiştirmelerin küçük miktarda geriye dönmesinden oluşmaktadır. Örnek olarak gerilmeler 430 kPa dolaylarında iken yer değiştirme 1,54 mm' den 1,53 mm'ye geçmiştir. Aynı numune ile yapılan diğer deney sonuçlarının değerleri Tablo 2'de görülebilmektedir. Grafiklerde deney ismini takip eden ilk değer numune basıncı iken diğeri programa yazılan deformasyon oranıdır.

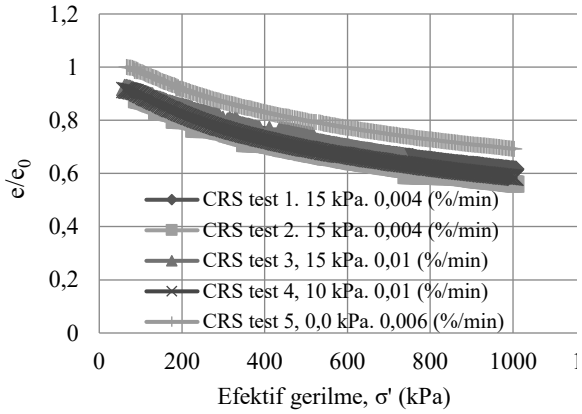
N 8 ile 2 adet 0,004, 2 adet 0,01 ve 1 adet 0,006 (%/dk) deformasyon oranlarında deneyler yapılmıştır. Zeminin kabarma eğiliminden dolayı 0,004 (%/dk) deformasyon oranında yapılan deneylerde başlangıç gerilmesi 75 kPa kullanılırken diğer 3 deneyde ilgili değer 50 kPa kullanılmıştır. Beş deneyde de numuneler başlangıç gerilmesinde yaklaşık 6 saat konsolide edilmiştir. Daha sonra Tablo 2'de gösterilen numune basınçlarında 24 saat suya doygun duruma getirilip konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Her iki aşamada da boşluklarda bulunan su her iki yönden drene olmaktadır. Belirli gerilme etkisinde 30 saat konsolide olmalarına rağmen konsolidasyonun başlarında hiçbir numunede yüzde yüz suya doygunluk ölçülmemiştir. Deformasyon oranının 0,004 (%/dk) kullanıldığı deneylerde ilave

boşluk suyu basınçlarında gerilme artımlarında herhangi değişim görülmemiştir. İlgili sonuca neden deney hızının küçük olmasının yanı sıra deneysel hatadan da olabileceği kabul edilmektedir. N8 zemininin ASTM-D-4186-82'ye bağımlı deformasyon oranı 0,01 dir. N8 ile yapılan CRS ve standart ödometre deneylerine bağımlı oturma eğrileri σ'-e eksenlerinde Şekil 2'de görülmektedir. CRS deneylerine bağımlı eğrilerin şekil olarak ödometre deneylerine bağımlı çizilen eğrilerden farklı olduğu aynı şekilde görülmektedir. Sözü edilen farklılığın deney tipinin yanı sıra deney aletlerinden oluşabileceği kabul edilmektedir. Holtz vd., (1985) yayınında numune tipinin yanı sıra deney tipinin oturma eğrilerine etkisi çalışılmıştır. Deneylerden belirlenen zemin parametreleri Tablo 2'de açıklanmıştır. Ayrıca deney başı boşluk oranlarının oturma eğrilerine etkisinin giderilmesi amacı ile oturma eğrileri deney başı boşluk oranları ile normalize edilmiştir (Şekil 3).

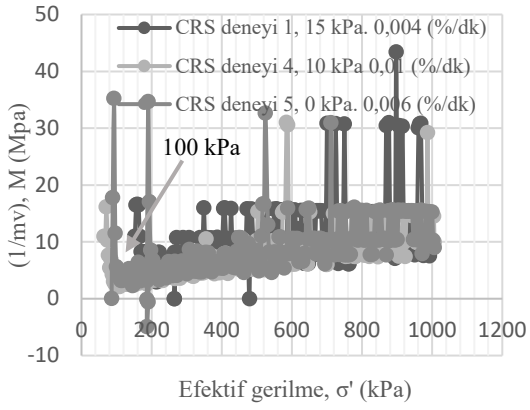


Şekil 2. CRS ve standart ödometre deneyi sonuçları, N8 (ML).

Şekil 2'de CRS deneylerine bağımlı eğrilerde sıkışma indisleri 200~1000 kPa gerilmelerde hesaplanırken standart ödometre deneylerine bağımlı eğrilerde 800~3200 kPa aralığında hesaplanmıştır (Tablo 2).



Şekil 3a. Normalize edilmiş CRS eğrileri. N8



Şekil 3b. σ'- M eğrileri, N8.

Deney başı boşluk oranı ile oturma eğrilerinin normalize edilmesinin uygunluğu Şekil 3a yardımı ile söylenebilir. CRS deneyi sonuçlarının daha iyi görülebilmesi amacı ile gerilme artımının 3200 kPa'a kadar uygulandığı standart ödometre deneyi sonuçları Şekil 3a'da çizilmemiştir. Ayrıca farklı numune basınçlarında ve farklı deformasyon oranlarında yapılan

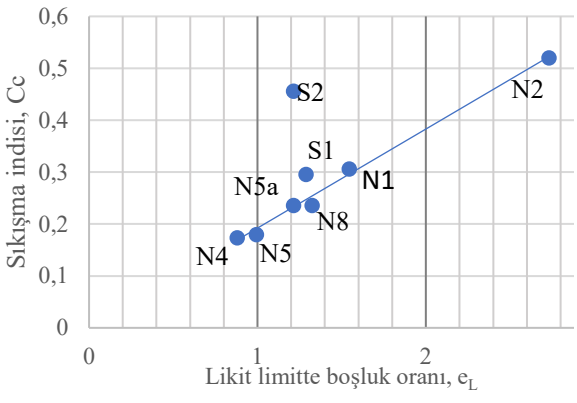
CRS deneylerine bağımlı σ' ile M değişimi Şekil 3b'de görülmektedir. Şekil 3b'de efektif gerilmeler yaklaşık 100 kPa olduğunda M değerlerinin azaldığı daha sonra artan efektif gerilme ile M değerlerinin arttığı ancak artımın lineer olmadığı görülmektedir. M değerlerinde görülen değişimin konsolidasyon esnasında deformasyon oranının sabit kalmayıp değişmesinden kaynaklandığı kabul edilmektedir. Tablo 2'de deformasyon oranı programa girilen değerdir. Ortalama deformasyon oranı konsolidasyon esnasında kaydedilen değerlerin ortalamasıdır.

Tablo 2. CRS ve standart ödometre deneylerine bağımlı konsolidasyon parametreleri.

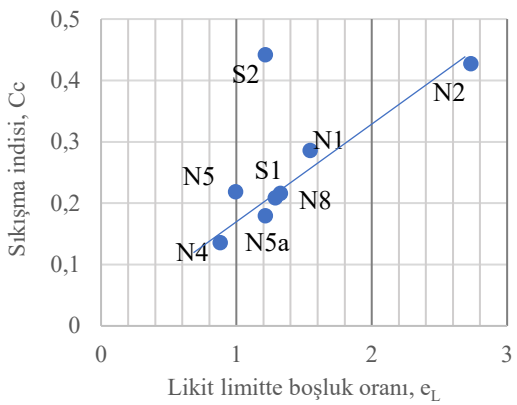
Num. no	Deney tipi	Num. basıncı	w_0	w_n	ρ_d^0	ρ_d^n	Deney Hızı Ort.	Cc	Gerilme aralığı	Def. oranı	Def. Oranı Ort.
-	-	kPa	(%)	(%)	Mg/m3	Mg/m3	mm/dk	-	kPa	%/dk	%/dk
N2	CRS	0	27,43	31,62	1,58	1,76	0,18570	0,1692	548-998	1	-
	CRS	15	27,37	29,94	1,58	1,71	0,00002	0,2452	507-886	0,0001	0,00009
	CRS	10	46,83	45,32	1,21	1,30	0,00047	0,1687	400-975	0,001	0,0009
	CRS	15	46,43	46,51	1,21	1,38	0,00022	0,3135	569-997	0,001	0,0034
	CRS	15	46,05	35,49	1,22	1,55	0,00024	0,5194	304-1007	0,001	0,0009
	St. öd	-	38,89	39,04	1,33	1,43	-	0,4272	800-3200	-	-
N8	CRS	15	2176	20,51	1,74	1,97	0,00098	0,1644	205-855	0,004	0,0045
	CRS	15	23,68	21,69	1,66	1,92	0,00101	0,2351	217-999	0,004	0,0088
	CRS	15	23,76	22,26	1,68	1,87	0,01253	0,2324	387-735	0,01	0,0156
	CRS	10	24,64	21,87	1,64	1,88	0,00251	0,2352	211-990	0,01	0,0097
	CRS	0	24,58	21,00	1,62	1,91	0,00146	0,2372	312-999	0,006	0,0060
	St. öd.	-	23,07	21,76	1,69	1,83	-	0,2247	800-3200	-	-
	St. öd	-	22,34	21,78	1,72	1,84	-	0,2159	1600-3200	-	-

4. OTURMA EĞRİLERİNİN NORMALİZE EDİLMESİ

Oturma eğrilerinin benzer olması dolayısıyla bu eğrilerin boşluk oranı ile normalize edilmesi uygun olacaktır (Burland, 1990). Zeminlerin likit limitleri zeminlerin içerdiği kil minerallerinin miktarlarına ve türlerine bağımlıdır (Burland, 1990, Holtz ve Kovacs, 1981). Dolayısıyla çalışmada zeminler likit limitte yüzde yüz suya doygun kabul edilerek likit limitte boşluk oranları (e_L) belirlenmiştir (Tablo 3). Zeminlerin oturma eğrilerinin likit limitlerine bağımlı olduğu dikkate alınarak sıkışma indisleri ile likit limitte boşluk oranları arasında olası bağıntının bulunup bulunmadığı iki grup deney sonucuna bağımlı çalışılmıştır. Likit limitteki boşluk oranlarına karşın sıkışma indisleri Şekil 4a ve 4b' de görülmektedir.



Şekil 4a. CRS deneyleri, e_L-C_c.



Şekil 4b. Standart ödometre, e_L-C_c.

Zeminlerin C_c, e_L ve boşluk indisi hesabında kullanılan boşluk oranları Tablo 3'te görülebilmektedir. Boşluk indisi hesabında kullanılan boşluk oranları sıkışma indislerinin hesaplandığı gerilme aralıklarını kapsayacak biçimde seçilmiştir. Şekil 4a'da S2 numaralı zemin dikkate alınmadığında regresyon katsayısı 0,967 olan, formülü denklem 3 ile gösterilen lineer bağıntı CRS deneyi sonuçlarına bağımlı bulunmaktadır.

$$Cc = 0{,}1885e_L + 0{,}0088 \quad (3)$$

Burland (1990)'da çok sayıda yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminlere dayalı standart ödometre deneyi sonuçlarında denklem 4 ile gösterilen formül belirlenmiştir.

$$Cc = 0{,}256e_L - 0{,}04 \quad (4)$$

Şekil 4b'de S2 isimli zemin dikkate alınmadığında denklem 5 ile gösterilen regresyon sayısı 0,921 olan formül standart ödometre deneylerine dayalı belirlenmiştir.

$$Cc = 0{,}1473e_L + 0{,}0287 \quad (5)$$

Bünye denkleminde gerekli zemin parametrelerinin, plastisite indisi yardımı ile belirlenebilmesi amacı ile farklı plastisite indisli zeminler kullanılarak üç eksenli basınç, çekme ve ödometre deneyleri Nakase vd., (1988) çalışmasında yapılmıştır. Çalışmada korelasyon katsayıları yüksek lineer bağıntılar bulunmuştur. Genel olarak plastisite indisi arttıkça sıkışma indisinin arttığı bilinmektedir. Ancak sözü edilen durumun küçük basınçlarda 0,1~1 MPa geçerli olduğu, 10~100 MPa gibi yüksek basınçlarda davranışın zemin bileşenlerinden bağımsız olduğu Casey (2014) çalışmasında açıklanmıştır.

Daha önceden söz edildiği üzere çalışmada yapılan CRS ve standart ödometre deneylerine bağımlı çizilen oturma eğrileri Burland (1990)'da tanımlanan boşluk indisi ile normalize edilmiştir. Denklem 6 ile tanımlanan boşluk indisi çalışmada kullanılan gerilme aralıklarına dayalı hesaplanmıştır.

$$I_v = \frac{(e - e_{100})}{Cc} \quad (6)$$

I_v : boşluk indisi,
e : herhangi efektif gerilmede boşluk oranı,
e_{100} efektif gerilme 100 kPa iken boşluk oranı,
C_c: sıkışma indisi

Normalizasyon işleminde kullanılan boşluk oranları ve boşluk indisleri hesaplanarak Tablo 3, 4 ve 5'te açıklanmıştır. CRS deneyi sonuçlarına dayalı eğrilerde $I_v = (e\text{-}e_{300})/C_c$ kullanılırken, standart ödometre deneyi sonuçlarına bağımlı eğrilerde $I_v = (e\text{-}e_{400})/C_c$ kullanılmıştır. Boşluk oranı e_{300}'den büyük olduğunda I_v değeri pozitif olacaktır. Boşluk oranı e_{300}'e eşit olduğunda I_v sıfır, boşluk oranı e_{300}'den küçük olduğunda ilgili değer negatif olacaktır. CRS deneylerinin bazılarında sıkışma indislerinin hesaplandığı gerilme aralıkları 250~750 kPa olması dolayısıyla boşluk indislerinin hesaplanmasında bütün zeminlerin deney sonuçlarını kapsayacak biçimde e_{700} değerleri kullanılmıştır. Benzer biçimde standart ödometre deneyi sonuçlarına bağımlı eğrilerde de sıkışma indislerinin hesaplandığı gerilme aralığı genel olarak 400~1600 kPa olması dolayısıyla I_v'nin hesaplanmasında e_{800} değerleri kullanılmıştır. Tablo 4 ve 5'te boşluk indisi değerleri CRS deneyine bağımlı eğrilerde e_{700} ile hesaplanırken standart ödometre deneyine bağımlı eğrilerde e_{800} değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmada boşluk indisleri, sıkışma indisinin hesaplandığı doğru

uzatıldığında $I_v = (e-e_{100}) /C_c$ formülü ile ve C_c değerleri ($e_{1000}-e_{100}$) formülleri ile hesaplansaydı I_v değerleri (-1) olacaktı. İlgili değer çalışmada kullanılmamıştır. Her iki grup deney sonuçlarında hesaplanan I_v değerleri Tablo 3'te açıklanan boşluk oranları kullanılarak hesaplanmıştır. İlgili grafikler Şekil 5a ve 5b'de görülmektedir. Tablo 3'te N2 ile N8 zeminleri dışındaki zeminlerin C_c değerleri birbirine uygun deney sonuçlarının ortalamasıdır. Deney başı su içerikleri farklı yeniden konsolide edilerek hazırlanan zeminler kullanılarak benzer bir çalışma Hong vd., (2010) tarafından yapılmıştır. Konu çalışmada oturma eğrileri Burland (1990)'da tanımlanan boşluk indisi ile normalize edilmiştir.

Tablo 3. CRS ve standart ödometre deneylerine bağımlı boşluk oranları.

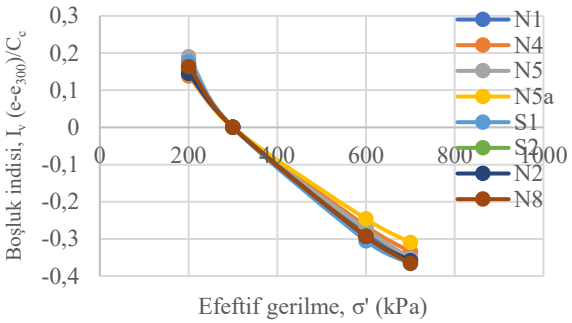
Num. no	Deney tipi	e_L	Cc	e_{200}	e_{300}	e_{400}	e_{600}	e_{700}	e_{800}
N1	CRS	1,546	0,3056	0,744	0,693	-	0,606	0,585	-
N1	St. öd	1,546	0,2857	0,826	-	0,765	0,723	-	0,679
N2	CRS	2,732	0,5194	1,032	0,956	-	0,804	0,770	-
N2	St.öd	2,732	0,4272	1,058	-	1,026	0,985	-	0,953
N4	CRS	0,88	0,1732	0,462	0,438	-	0,392	0,380	-
N4	St. öd	0,88	0,1357	0,556	-	0,532	0,510	-	0,492
N5	CRS	0,994	0,1790	0,438	0,404	-	0,355	0,341	-
N5	St. öd	0,994	0,2186	0,577	-	0,532	0,497	-	0,472
N5a	CRS	1,214	0,2355	0,455	0,419	-	0,361	0,346	-
N5a	St. öd	1,214	0,1794	0,450	-	0,429	0,405	-	0,390
N8	CRS	1,325	0,2352	0,565	0,527	-	0,458	0,441	-
N8	St. öd	1,325	0,2159	0,592	-	0,574	0,548	-	0,536
S1	CRS	1.288	0,2949	0,730	0,678	-	0,588	0,570	-
S1	St. öd	1,288	0,2084	0,741	-	0,690	0,655	-	0,627
S2	CRS	1,214	0,4554	0,819	0,748	-	0,615	0,584	-
S2	St. öd	1,214	0,4418	0,917	-	0,882	0,819	-	0,768

Tablo 4. CRS deneyi sonuçlarına bağımlı boşluk indisleri (I_v).

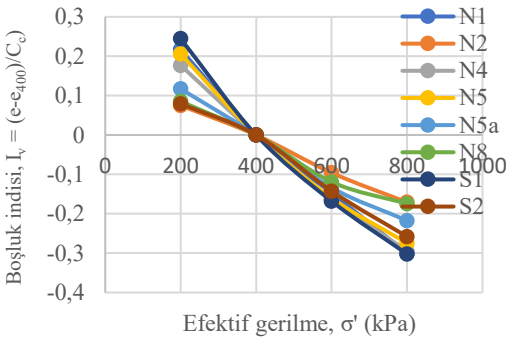
Efektif Gerilme (kPa)	N1	N2	N4	N5	N5a	N8	S1	S2
200	0,1669	0,1451	0,1386	0,1899	0,1529	0,1635	0,1763	0,1559
300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
600	-0,2847	-0,2936	-0,2656	-0,2737	-0,2463	-0,2933	-0,3052	-0,2920
700	-0,3534	-0,3583	-0,3349	-0,3519	-0,3099	-0,3658	-0,3662	-0,3601

Tablo 5. Standart ödometre deneylerine bağımlı boşluk indisleri (I_v).

Efektif Gerilme (kPa)	N1	N2	N4	N5	N5a	N8	S1	S2
200	0,2170	0,0749	0,1769	0,2059	0,1171	0,0855	0,2447	0,0792
400	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
600	-0,1470	-0,0960	-0,1621	-0,1601	-0,1338	-0,1190	-0,1679	-0,1426
800	-0,3010	-0,1709	-0,2948	-0,2745	-0,2174	-0,1747	-0,3023	-0,2580



Şekil 5a. CRS deneyleri σ'-I_v.



Şekil 5b. Standart ödometre deneyleri, σ'-I_v

Şekil 5a'da görülen eğrilerin Şekil 5b ile karşılaştırılmasında CRS eğrilerine dayalı normalizasyon işleminin daha iyi olduğu söylenebilir. Deneylerin yapımında daha fazla sayıda standart proktor ile hazırlanan numunelerin kullanılmasının oturma eğrilerini etkilediği grafiklere dayalı söylenebilir. Deney başı su içeriklerinin çok farklı olduğu Hong vd., (2010) çalışmasında da benzer sonuç görülmüştür. Konu edilen çalışmada akma gerilmesine kadar normalizasyon işleminin uygun olmadığı akma gerilmesinden sonra uygun olduğu deney sonuçlarına dayalı gözlenmiştir.

5. SONUÇLAR

CRS ve standart ödometre deneyleri yeniden konsolide edilerek ve standart proktor yöntemi ile su içeriği optimum su içeriğinden daha fazla olacak biçimde hazırlanan numuneler ile yapılmıştır. Standart proktor yöntemi ile hazırlanan numunelerde özellikle yüksek plastisiteli olanlarda deney başı boşluk oranlarının çok farklı oldukları görülmüştür. Farklı zeminler ile yapılan CRS deneylerine bağımlı oturma eğrilerinin birbirlerine benzer oldukları gözlenmiştir. Aynı zeminler ile yapılan standart ödometre deneylerine dayalı eğrilerin ise kendi aralarında benzer oldukları ancak CRS eğrilerinden farklı oldukları gözlenmiştir. İlgili sonuca neden deney tipinin yanı sıra deney aletlerinden kaynaklanabileceği kabul edilmiştir. Bilindiği üzere CRS deneylerine bağımlı oturma eğrileri; konsolidasyon aşamasının herhangi anında numune tabanında ölçülen ilave boşluk suyu basıncının o anda ölçülen toplam gerilmenin belirli bir değerinden küçük olmasına bağımlıdır. Küçük hızlarda numune tabanında ilave boşluk suyu basıncı oluşmayacaktır. Büyük hızlarda normal gerilme çok artacak ilave boşluk suyu basınçları ya çok büyük oluşacak ya da ilave boşluk suyu basınçları sürenin yeterli olmaması dolayısıyla oluşmayacaktır. Yüksek plastisiteli zemin ile büyük deformasyon oranının (1 %/dk) kullanıldığı deney sonucunda artan gerilme ile ilave boşluk suyu basınçlarının küçük miktarlarda arttığı görülmüştür. İlgili sonuca neden uygulanan deformasyon oranının büyük olduğu kabul edilmektedir. Aynı zemin ile 0,0001 (%/dk) deformasyon oranında yapılan deney sonucunda ise artan toplam gerilme ile ilave boşluk suyu basınçlarının değişmediği sabit kaldığı görülmüştür. Konsolidasyon esnasında zeminin kabarma basıncının büyük olması dolayısıyla küçük gerilmelerde yer değiştirmelerin ya sabit kaldığı ya da küçük miktarlarda geriye döndüğü görülmüştür.

CRS deneylerinden birbirlerine benzer oturma eğrilerinin gözlenmesi dolayısıyla, farklı deney başı boşluk oranlarının oturma eğrilerine etkisinin giderilmesi amacı ile oturma eğrileri deney başı boşluk oranları ile normalize edilmiştir. İlgili işlemin uygun olduğu çalışma sonucuna bağımlı söylenebilir. Ayrıca Burland (1990)'a bağımlı konsolidasyon deneyi sonuçları σ' – e eksenlerinde çizildiğinde oturma eğrilerinin birbirlerine benzer olması dolayısıyla eğrilerin boşluk oranı ile normalize edilmeleri uygun olacaktır. Deneylerde kullanılan zeminler likit limitlerinde yüzde yüz suya doygun kabul edilerek

zeminlerin likit limitlerindeki boşluk oranları belirlenmiştir. Likit limitlerindeki boşluk oranları ile sıkışma indisleri arasında olası bağıntının varlığı da çalışılmıştır. Bir zemin dikkate alınmadığında korelasyon katsayısı yüksek lineer bağıntı belirlenmiştir. Zemin sayısının yeterli olmadığı dikkate alınarak genel sonuç söyleyebilmek uygun değildir. Genel açıklama için farklı plastisiteli çok sayıda zeminlerin kullanıldığı çalışmanın yapılması kabul edilmektedir. Çalışmada oturma eğrileri Burland (1990) yayında tanımlanan boşluk indisi ile de normalize edilmiştir. İşlemin CRS deneyi sonuçlarında standart ödometre deneyi sonuçlarına oranla daha iyi olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

Ansal, A. ve Çelebi, A. (2017), "Kabarmaya Eğilimli Killi Zeminlerin Kabarma ve Konsolidasyon Özellikleri", Uluslararası katılımlı 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul.

ASTM, (1982), "Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled strain loading", ASTM Standard D-4186-82, ASTM.

Atkinson, J. H., (2007), "The Mechanics of Soils and Foundations", 2nd edition, Taylor and Francis, London and New York.

Burland, J. B., (1990), "On the compressibility and shear strength of natural clays", Geotechnique 40, No 3, pp 329-378,

Casey, B. (2014), "The Consolidation and Strength Behavior of Mechanically Compressed Fine-Grained Sediments", MIT. Dr. Thesis, MIT. Cambridge.

Craig, R. F. (1983), "Soil Mechanics", 3rd edition, Van Nostrand Reinhold, UK.

Çelebi, A ve Ansal, A. (2024), "Sabit Deformasyon Oranı ile Ödometre Deneyleri", Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 19. Ulusal Konferansı, Hacetepe Üniversitesi, Ankara.

Çelebi, A ve Ansal, A. (2025), "Standart ve Sabit Deformasyon Oranı ile Ödometre Deneyi Sonuçlarında Ön Konsolidasyon Basınçları," 10. Geoteknik Sempozyumu, Kocaeli.

Davison, L. R. & Atkinson, J. H. (1990), "Continuous loading oedometer testing of soils", Q. J, Engineering Geology, Vol 23, 347-355.

Germaine, J. T., (1985), "Laboratory Measurements of Clay Behavior", MIT, Special Summer Course, Cambridge.

Holtz, R. D and Kovacs, W. D. (1981), "An Introduction to Geotechnical Engineering", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Holtz, R. D., Jamiolkowski, M. B. & Lancellotta, R. (1986), "Lessons from oedometer tests on high quality samples", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, 768-776

Hong, Z. S., Yın, J and Cuı, Y. J., (2010), "Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents", Geotechnique 60, No 9, pp 691-700 [doi: 10.1680/geot. 09.p.059].

Janbu, N., Tokhem, O. and Senneset, K. (1981), "Consolidation Tests with Continuous Loading", Proc. X ICSMFE, Stockholm, 1, 645-654.

Kassim, K. A., Kueh, A. B. H., Yah, C. S., and Siang, L. C., (2016), "Criteria of Acceptance for Constant Rate of Strain Consolidation Test for Tropical Cohesive Soil",Geotech Geol. Eng. Doi: 10. 1007/s10706-016-0016-8

Kumbasar, V. ve Kip, F. (1999)," Zemin Mekaniği Problemleri", Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

Lee, K. Choa, V., Lee, S. H. And Queek, S. H. (1993), "Constant rate of strain consolidation of Singapore marine clay", Geotechnique, Vol. 43, No. 3, 471-488.

Nakase, A., Kamei, T. and Kusakabe, O., (1988), "Constitutive Parameters Estimated By

Plasticity Index", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No 7,
Nash, D. F. T., Sills, G. C. and Davison, L. R. (1992), "One-dimensional consolidation testing of soft clay from Bothkennar", Geotechnique 42, No 2, pp. 241-256.
Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", Wiley, New York.

SEMBOL LİSTESİ

β : $\gamma(h_0)^2/c_v$
γ : deformasyon oranı,
h_0 : numunenin gerilme artımı başlangıcındaki yüksekliği,
c_v : konsolidasyon katsayısı,
λ : $\Delta u/\sigma$
w_L : zeminin likit limiti,
w_P : zeminin plastik limiti,
Ip : zeminin plastisite indisi,
CL::düşük plastisiteli kil,
CH : yüksek plastisiteli kil,
MH : yüksek plastisiteli silt,
ML : düşük plastisiteli silt,
Δu : numune tabanında ölçülen ilave boşluk suyu basıncı,
σ : ilave boşluk suyunun ölçüldüğü anda ölçülen toplam gerilme,
Δh : birbirini takip eden iki gerilme farkında numune yüksekliğindeki değişim,
h : birbirini takip eden iki gerilme farkında numunenin ortalama yüksekliği,
Δe : birbirini takip eden iki gerilme farkında boşluk oranındaki değişim,
e : birbirini takip eden iki gerilme farkında ortalama boşluk oranı,
e_L : likit limitte boşluk oranı,
w_0 : deney başı su içeriği,
w_n :deney sonu su içeriği,
w_{opt} :optimum su içeriği,
ρ_d^{mak}:maksimum kuru birim hacim ağırlığı,
ρ_d^0: deney başı kuru birim hacim ağırlığı,
ρ_d^n : deney sonu kuru birim hacim ağırlığı,
ρ_s: dane birim hacim ağırlığı,
Cc : sıkışma indisi,
I_v : boşluk indisi
e_{200} :efektif gerilme 200 kPa iken boşluk oranı,
e_{300} :efektif gerilme 300 kPa iken boşluk oranı,
e_{400}: efektif gerilme 400 kPa iken boşluk oranı,
e_{600} : efektif gerilme 600 kPa iken boşluk oranı,
e_{700} : efektif gerilme 700 kPa iken boşluk oranı,
e_{800} : efektif gerilme 800 kPa iken boşluk oranı,