

SABİT DEFORMASYON ORANI İLE ÖDOMETRE DENEYLERİ

OEDOMETER TESTS WITH CONSTANT STRAIN RATE

Ayşen ÇELEBİ¹, Atilla ANSAL²

ABSTRACT

As it is known, the total stress-increment applied to the specimen is constant but the vertical strain rate is not constant, varies with time during the consolidation process when the standard oedometer test device is used. The disturbances of the samples have effect on the settlement curves. Depending on the determination of the preconsolidation pressure using Casagrande method becomes more difficult. Additionally, the space between the two test points on the settlement curves is larger when the standard stress increments are used. Taking into account the explanations mentioned, the constant rate of strain oedometer tests were carried out in this study. The specimens used for the tests were prepared in the laboratory. The measured excess pore pressures control the strain rate in a CRS oedometer test. To get the proper test result depends on the saturation of the specimen and the ratio of the measured excess pore pressure to the measured vertical total stress. Using the liquid limit of the soils the maximum ratio was used as 0,3 and the strain rate was used as 0,004%/min. in this study. The other important parameter is the time needed to diminish the measured excess pore pressure when the specified vertical total pressure is reached. Standard oedometer tests were also carried out on the same soils to show the validity of the constant rate of strain test results. To study the effect of duration of the test on the settlement curves, the incremental-constant stress oedometer tests were also carried out using the CRS device. The coefficients of consolidation were calculated and the results were plotted against the vertical effective stress. The curves obtained from the standard oedometer test were found to be more suitable than the curves obtained from the constant rate of strain test.

Keywords: Constant rate of strain, constant stress, coefficient of consolidation, compression index.

ÖZET

Bilindiği üzere standart ödometre deneyinde numuneye uygulanan toplam gerilme artımı konsolidasyon süresinde sabit iken düşey deformasyon oranı sabit değildir zaman ile değişmektedir. Numunelerdeki örselenmeler oturma eğrilerini etkileyerek ön konsolidasyon basıncının Casagrande yöntemine dayalı belirlenmesinde problem

¹ Dr. Özyeğin Üniversitesi, aysen.celebi@ozyegin.edu.tr

² Prof. Dr. Özyeğin Üniversitesi, atilla.ansal@ozyegin.edu.tr

oluşturmaktadır. Ayrıca standart gerilme artımı kullanıldığında oturma eğrilerinde iki deney noktası arasındaki uzaklık fazladır. Açıklanmaya çalışılan problemler dikkate alınarak çalışmada sabit deformasyon oranı ile ödometre deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler laboratuvarda hazırlanmıştır. Sabit deformasyon oranı ile yapılan konsolidasyon deneylerinde deformasyon oranını belirleyen ölçülen ilave boşluk suyu basıncıdır. Uygun deney sonucunun temini numunenin suya doygunluğu ile ölçülen ilave boşluk suyu basıncının ölçülen toplam düşey gerilmeye oranına bağlıdır. Çalışmada zeminlerin likit limitleri kullanılarak maksimum oran 0,3 ve deformasyon oranı 0,004%/dk. kullanılmıştır. Diğer önemli parametre ise en büyük düşey toplam gerilme değerine ulaşıldığında ölçülen ilave boşluk suyu basıncının sıfırlanması için gerekli süredir. Sabit deformasyon oranı ile yapılan deney sonuçlarının kullanılabilirliği amacı ile aynı zeminler kullanılarak standart ödometre deneyleri de yapılmıştır. Deney süresinin oturma eğrilerine etkisinin görülebilmesi için aynı deney aleti ile gerilme artımının sabit olduğu ödometre deneyleri de yapılmıştır. Konsolidasyon katsayıları hesaplanmış ve sonuçlar düşey efektif gerilmelere karşılık çizilmiştir. Standart ödometre deneylerinden gözlenen eğrilerin sabit deformasyon oranı ile yapılan deneylerden gözlenen eğrilere daha benzer oldukları görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Sabit deformasyon oranı, sabit gerilme, konsolidasyon katsayısı, sıkışma indisi.

1. GİRİŞ

Çalışmada yeniden konsolide edilerek ve optimum su muhtevsından daha fazla su muhtevsında olacak biçimde hazırlanan numuneler kullanılarak CRS, CRS aleti ile ödometre ve standart ödometre deneyleri yapılmıştır. CRS deneylerinde başlangıç aşamasında numunelerin kabarma basınçları dikkate alınarak 25~50 kPa basınç değerleri kullanılmıştır. İlgili basınç değerlerinde numunelerin konsolidasyon süreleri karekök zaman-düşey yer değiştirme metoduna dayalı belirlenmiştir. Daha sonra doygunluk aşamasına geçilmiştir. Doygunluk aşamasında numune basınçları 50~100 kPa kullanılmış ve ilgili gerilmeler konsolidasyon esnasında da numunelere uygulanmıştır. Doygunluk aşamasında yeterli süre beklenilerek hücre alt ve üst başlıkları arasında bağlantıyı sağlayan vana kapatılarak konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada hücre tabanında oluşan ilave boşluk suyu basınçları ölçülmüş ve drenaja üst başlıktan izin verilmiştir. Deformasyon hızı bütün deneylerde 0,004 (%/dk) ve basınç oranının $\Delta u/\Delta \sigma$ en büyük sınır değeri 0,3 kullanılmıştır. Hem konsolidasyon esnasında hem de başlangıç ve doygunluk aşamalarında programda belirtilen zaman aralıklarında düşey yer değiştirme, uygulanan kuvvet ve ilave boşluk suyu basınçları ölçülerek deney dosyasına kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler kullanılarak program tarafından düşey deformasyon, deformasyon oranı, düşey gerilme, ilave boşluk suyu basıncı, efektif gerilmeler ve konsolidasyon parametreleri hesaplanmıştır. Programda belirtilen en büyük toplam gerilmeye ulaşıldığında o andaki ilave boşluk suyu basıncının sıfırlanması aşamasına geçilmiştir. Sözü edilen aşamada sınır değer $\Delta u/\Delta \sigma = 0,01$ kullanılmıştır. Daha sonra uygulanan gerilmelerin geri alınması aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada gerilme artımında kullanılan deformasyon oranından farklı 0,006 (%/dk) kullanılmıştır. Gerek uygulanan gerilmelerin artımında gerekse azaltılması aşamalarında konsolidasyon davranışını yönlendiren ($\Delta u/\Delta \sigma$) basınç oranının en büyük değeridir. Deney esnasında sınır değere yaklaşıldığında program o andaki hız değerini iki kat azaltarak deneye devam etmektedir. CRS deneylerinin kullanılabilirliğini görebilmek amacı ile aynı zeminler

kullanılarak CRS aleti ile ödometre ve standart ödometre deneyleri de yapılmıştır. CRS aleti ile ödometre deneyinde program ön görülen gerilmeyi yaklaşık iki saniyede düşey yer değiştirme ile numuneye uygulamaktadır. Sabit toplam gerilme etkisinde numunede oluşan düşey yer değiştirmeler programda ön görülen zaman aralıklarında ölçülerek kaydedilmektedir. Konsolidasyon işleminin tamamlanmasında karekök zaman ve en küçük zaman değerleri dikkate alınarak takip eden gerilme artımına geçilmektedir. CRS aleti ile ödometre deneyleri konusunda detaylı bilgi Ansal ve Çelebi (2017)'de bulunmaktadır.

Çalışmada yapılan CRS, CRS aleti ile ödometre ve standart ödometre deneyi sonuçları σ' -e eksenlerinde çizilmiştir. Deney sonuçları $\log.\sigma'$ -e eksenlerinde çizildiğinde standart ödometre deneyi sonuçlarına bağımlı belirlenen ön konsolidasyon basınçlarının CRS deneyi sonuçlarına bağımlı belirlenen değerlerinden daha büyük oldukları görülmüştür. Literatürde konu ile ilgili çalışmalarda gözlenen davranışa farklı davranışın nedeni konsolidasyon esnasındaki yer değiştirme hızının küçük olması kabul edilmektedir. Ayrıca tüm deney sonuçları σ' -e, σ' -M ve σ' - c_v eksenlerinde çizilmiştir. Örselenmemiş ve yeniden konsolide edilerek hazırlanan numunelerin kullanıldığı Nash vd. (1992)'de CRS deneylerinde deformasyon hızının ön konsolidasyon gerilmesini etkilediği, deformasyon hızı arttıkça ön konsolidasyon gerilmesinin arttığı gözlenmiştir. Konu ile ilgili diğer bir çalışma Holtz vd. (1986) tarafından farklı numuneler kullanılarak yapılmıştır. İlgili çalışmada CRS deneylerinden standart ödometre deneylerine oranla daha büyük ön konsolidasyon basınçları bulunmuştur.

2. NUMUNELER

Deneylerin yapımında laboratuvarında yeniden konsolide edilerek (S) ve standart proktor yöntemine dayalı (N) hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Yeniden konsolide edilerek numune hazırlama işleminde etüvde kurutulan zemin dövülerek danelerine ayrılmış ve 40 numaralı elekten elenmiştir. Elekten geçen malzemeden yeterli miktar alınarak zeminin likit limiti dolaylarında su ilave edilmiş ve homojen karışım temin edilmiştir. Karıştırma kabında üç gün bekletilip karıştırılarak danelerin kabin tabanına çökmesine izin verilmemiştir. Daha sonra iç çapı 29 cm olan çamur konsolidasyon aletine alınıp ağırlık ilave edilerek yaklaşık $0,7 \text{ kg/cm}^2$ de 19 ay konsolide edilmiştir. Zemin bu kaptan alınarak deneylerin yapımında kullanılmıştır. Standart proktor yönteminde ise etüvde kurutulan zeminler dövülerek 4 numaralı elekten elenmiştir. Elekten geçen malzemeden yeterli miktar alınarak optimum su muhtevsından daha fazla su muhtevsında olacak biçimde su ilave edilmiş ve karışım hazırlanmıştır. Karışım standart proktor kalıbına üç eşit kalınlık olacak biçimde her kalınlığa 25 vuruş uygulanarak yerleştirilmiştir. Hazırlanan zeminler kalıptan alınarak deneylerin yapımında kullanılmıştır. Numune hazırlama aşamasına geçmeden zeminlerin indeks ve kompaksiyon özellikleri belirlenmiş ve Tablo 1'de özetlenmiştir.

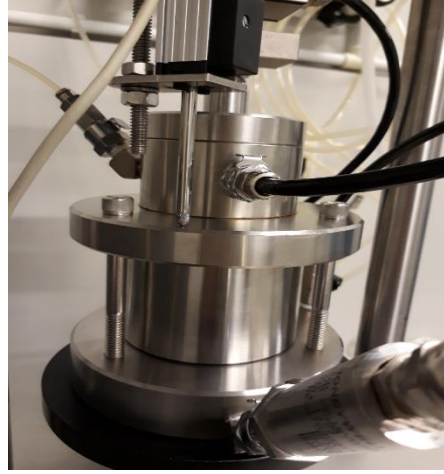
Tablo 1. Zeminlerin indeks ve kompaksiyon özellikleri.

Numune no	Likit limit (w_L) (%)	Plastik limit (w_p) (%)	Plastisite indisi (I_p) (%)	ρ_d (Mg/m^3)	W_{opt} (%)	ρ_s (Mg/m^3)	Zemin grubu
S1	46	20	26	-	-	2,8	CL
N1	56	28	28	1,63	22	2,76	CH
N4	32	18	14	1,58	18	2,75	CL
N5	36	20	16	1,77	16	2,76	CL
N5a	44	26	18	1,82	17	2,76	CL

Standart ödometre deneyleri sabit ring ile yapılmıştır: kullanılan ringin dış çapı 70 mm ve yüksekliği 20 mm dir. Sabit deformasyon oranında yapılan deneylerde kullanılan ringin boyutları dış çapı 70 mm ve yüksekliği 25,4 mm dir.

3. CRS DENEY HÜCRESi VE BAĞINTILAR

Sabit deformasyonda konsolidasyon deney aleti standart ödometre deneyi hücresinin amaca uygun iyileştirilmiş biçimidir. Hücre tabanında ve üst başlığında Şekil 1'de görüldüğü üzere ayrı ayrı iki bağlantı bulunmaktadır.



Şekil 1. CRS hücresi ve hücre tabanı.

Tabanda bulunan bağlantılardan biri deney esnasında boşluk suyu basıncının ölçümünde kullanılırken diğeri üst başlık ile bağlantıyı sağlamaktadır. Üst başlıkta bulunan diğeri hücreye su basıncı uygulamaktadır. Deneylerin yapımında numuneler öncelikle yaklaşık ring boyutlarına getirilmiş daha sonra ring batırılarak hazırlanmıştır. Numunenin hücreye yerleştirilmesi standart ödometre deneyi ile aynıdır. Dikkat edilmesi gereken bütün bağlantılarda hava kabarcığının bulunmamasıdır. Numune hücreye yerleştirildikten sonra hücre havası alınmış su ile doldurulmuştur. Gerekli bağlantı ve kontrollerden sonra hücre yükleme aletine yerleştirilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere numuneye düşey kuvvet ring üzerinde bulunan üst başlık ve piston yardımı ile uygulanmaktadır. Yükleme aleti 0,00003~15 mm/dk hız aralığında numunelere düşey yönde kuvvet uygulayabilmektedir. Deneyler üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama başlangıç bölümüdür. Bu aşamada kullanılan zeminlerin kabarma basınçları dikkate alınarak numunelere 25 veya 50 kPa düşey gerilmeler uygulanmıştır. Birinci aşamada konsolidasyon işleminin tamamlanmasında karekök- zaman yöntemi kullanılmış ve ortalama en az üç saat beklenilmiştir. İkinci aşama suya doygunluk aşamasıdır. Hücreye yanal basınç ünitesi yardımı ile programda belirtilen değerlerde su basıncı uygulanarak numuneler suya doygun duruma getirilmiştir. Birinci ve ikinci aşamalarda hücre tabanı ile üst başlık arasındaki bağlantıda bulunan vana açık bulunmaktadır. Her iki yönden drenaja izin verilmektedir. Suya doygunluk aşamasında en az 24 saat beklenilmiş ve bağlantı vanası kapatılarak konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Numune tabanında boşluk suyu basınçları ölçülmüş ve üst başlıkta drenaja izin verilmiştir. Zeminlerin likit limit değerlerine bağımlı deformasyon hızı 0,004(%/dk) kullanılmıştır. Deney sonuçlarına dayalı zeminlerin oturma davranışları hakkında bilgi istenildiğinde ilgili değer

sıfır olarak da deney yapılabilir. Bu durumda numune tabanında ilave boşluk suyu basıncı oluşmayacaktır. Dolayısıyla yer-değiştirme-zaman davranışları üzerine deneysel veri bulunmayacaktır. Oturma-zaman davranışları hakkında veri taban da ilave boşluk suyu basıncı oluşmasına izin verilmesi ile temin edilebilir. Ancak tabanda oluşmasına izin verilen ilave boşluk suyu basıncının o anda ölçülen toplam düşey gerilmenin belirli bir değerinden daha küçük olması gereklidir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde standart ödometre deneyine benzer Terzaghi (1943) teorisindeki kabuller kullanılmıştır. İlave boşluk suyu basıncı o andaki düşey gerilmenin belirli bir değerinden daha fazla olduğunda numune kesitlerinde hidrolik eğimler farklı olacaktır. Hidrolik eğimlerin farklı olması efektif gerilmelerin dağılımını etkileyecektir. Konsolidasyon aşamasında önemli parametre herhangi bir anda hesaplanan ilave boşluk suyu basıncı/o anda ölçülen toplam gerilme oranıdır. İlgili sınır değer literatürde yapılan çalışmalara dayalı 0,3 olarak kullanılmıştır. Yapılan bütün deneylerde bu oran 0,3 değerinden büyük olmamıştır. Diğer önemli parametre ise toplam gerilme programda belirtilen değere ulaştığında o anda ölçülen ilave boşluk suyu basıncının sıfırlanması için gerekli süredir. İlgili değer hesaplanan ilave boşluk suyu basıncı/ölçülen toplam gerilme oranı olarak çalışmada 0,01 olarak kullanılmıştır. Konsolidasyon programında belirtilen zaman aralıklarında üç aşamada da düşey yer değiştirme, kuvvet ve boşluk suyu basınçları ölçülerek deney dosyasına kaydedilmiştir. Çalışmada ilgili değer 0,1 dk olarak kullanılmıştır. Deney programı 0,1 dk aralıklarla yer değiştirme, kuvvet ve boşluk suyu basınçlarını kaydederek düşey deformasyon, düşey toplam gerilme, deformasyon oranı, ilave boşluk suyu basıncı, basınç oranı ve efektif gerilme değerlerini hesaplayarak deney dosyasına kaydetmektedir. İlave boşluk suyu basıncı deneyin herhangi anında ölçülen boşluk suyu basıncı – numuneye uygulanan numune basıncı olarak hesaplanmaktadır. Efektif gerilme hesabında (1) numaralı denklem kullanılmaktadır.

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

σ : toplam gerilme

Δu : ilave boşluk suyu basıncı

Yer değiştirme, kuvvet ve boşluk suyu basınçları 0,1 dk aralıklarla ölçülmesine karşılık program deformasyon hızı, hacimsel sıkışma katsayısı, konsolidasyon katsayısı ve permeabilite katsayısı değerlerini denklem (2) ile tanımlanan değere bağımlı hesaplamaktadır.

$$F_n = 1 - \frac{(\Delta u_n - \Delta u_0)}{\log \frac{\sigma_n}{\sigma_0}} \quad (2)$$

Δu_0 : ilgili aralıkta ilave boşluk suyu basıncının ilk değeri

Δu_n : ilgili aralıkta ilave boşluk suyu basıncının takip eden değeridir.

σ_0 : ilgili aralıkta toplam gerilmenin ilk değeri

σ_n : ilgili aralıkta toplam gerilmenin takip eden değeridir.

F değeri 0,4 olduğunda ilgili okumalar dikkate alınıp gerekli hesaplamalar yapılmaktadır. Sözü edilen katsayıların hesaplanmasında 0,4' den küçük okumalar dikkate alınmamaktadır. Konsolidasyon aşamasının herhangi anında numune düşey kesitinde ilave boşluk suyu basıncının dağılımı parabol kabul edilerek deney sonuçları standart ödometre deneyi sonuçlarına benzer biçimde değerlendirilmiştir (Davison and Atkinson, 1990). Boşluk

oranındaki değişimler numune yüksekliğindeki değişimler (Δh) yardımı ile $(\Delta h/H) = \Delta e/(1+e)$ hesaplanabilir. Hesaplanan değerlerle hacimsel sıkışma katsayıları $mv = ((\Delta h/H) / \Delta \sigma')$ küçük gerilme artımlarında hesaplanabilir. Çalışmada konsolidasyon katsayıları da (c_v) denklem (3) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$c_v = \frac{H^2}{2\Delta u} \frac{\Delta \sigma'}{\Delta t} \quad (3)$$

Δt : zaman aralığı,

$\Delta \sigma'$: ilgili zaman aralığında efektif gerilmedeki değişim,

Δu : ilgili zaman aralığında ilave boşluk suyu basıncı,

H : ilgili zaman aralığında ortalama drenaj yüksekliğidir.

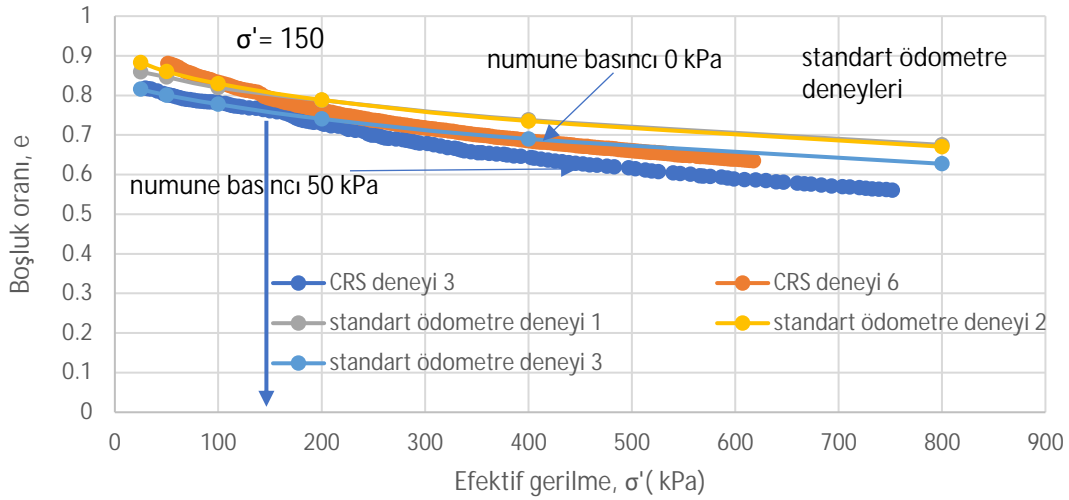
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Laboratuvarda yeniden konsolide edilerek hazırlanan S1 zemini ile 6 adet CRS ve 3 adet standart ödometre deneyi yapılmıştır. Başlangıç gerilmesi 25 kPa kullanılmış ve bu aşamada en az 3 saat beklenilmiştir. Deney 6 hariç diğer deneylerde numunelere 50 kPa numune basıncı uygulanmış ve numuneler suya doymun duruma getirilmiştir. Doymunluk aşamasında en az 24 saat beklenilerek konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Deneyin ismi sabit deformasyon oranında konsolidasyon olmasına rağmen deney esnasında ne deformasyon oranı ne de $\Delta u/\Delta \sigma$ oranı sabit değildir. İlave boşluk suyu basıncı/ o andaki toplam gerilme ($\Delta u/\Delta \sigma$) oranı en büyük değere yaklaştığında program o andaki deney hızını iki kat azaltarak deneye devam etmektedir. Zeminin likit limitine bağımlı programda deformasyon oranı 0,004 (%/dk) kullanılmıştır. Deneyler esnasındaki değişimi 0,004-0,017 (%/dk) aralığındadır. S1 ile yapılan bütün deneylerde ortalama yer-değiştirme hızının 0,001-0,002 mm/dk aralığında değiştiği görülmüştür. Doymunluk aşamasında kullanılan numune basıncının etkisinin görülebilmesi amacı ile deney 6 numune basıncı uygulanmadan yapılmıştır. Numune basıncının 50 kPa ve sıfır olduğu deney sonuçları standart ödometre deneyi sonuçları ile Şekil 2'de görülebilmektedir. CRS deneyi 3'te numune basıncı 50 kPa. CRS deneyi 6'da ilgili değer sıfırdır. Ön konsolidasyon basıncı (150 kPa) değerine kadar eğrilere gözlenen farklılığın deney başı boşluk oranlarından kaynaklandığı kabul edilmektedir. Şekil 2'deki deney sonuçları logaritma efektif gerilme- boşluk oranı eksenlerinde çizildiğinde eğrilerin doğru bölümleri kullanılarak hesaplanan indisler: CRS deneyi 3: $C_c = 0,295$ (200-800 kPa) CRS deneyi 6: $C_c = 0,274$ (200-800 kPa) ve standart ödometre deneyi 1: $C_c = 0,210$ (400-800 kPa), standart ödometre deneyi 2: $C_c = 0,216$ (400-800), standart ödometre deneyi 3: $C_c = 0,209$ (400-800kPa) olarak literatürdeki deney sonuçlarına uygun bulunmuştur.

Sabit yer değiştirme hızının kullanıldığı Kassim and Clarke (1999) yayınında akma gerilmesi öncesi görülen davranışın nedeni deney başı boşluk oranının yanı sıra deney hızına da bağlanmaktadır

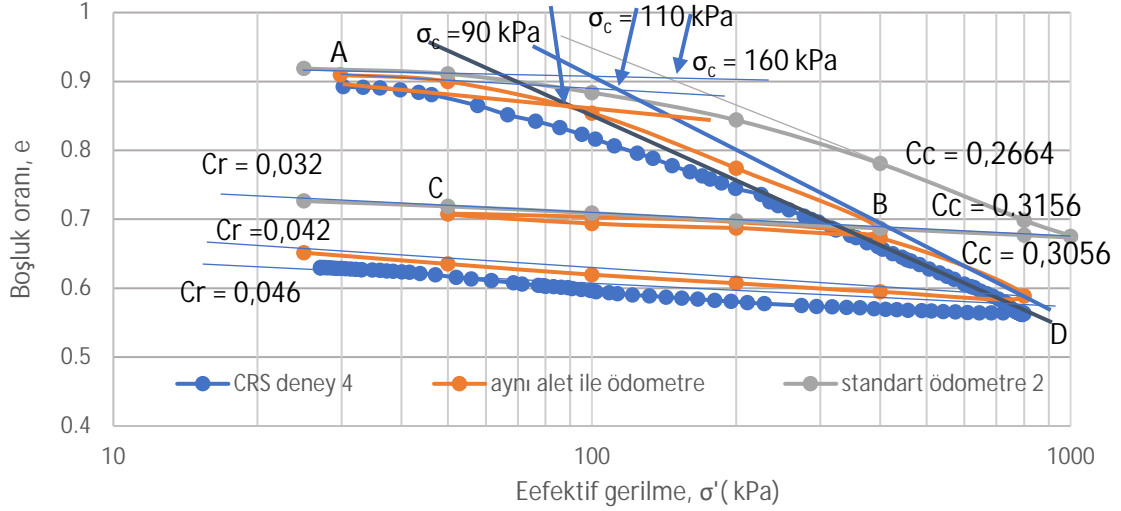
Standart proktor yöntemine dayalı optimum su muhtevasından daha fazla su muhtevasında hazırlanan N1 zemini ile 9 adet CRS ve 3 adet standart ödometre deneyleri yapılmıştır. Ayrıca CRS deney aleti ile toplam gerilme artımlarının 2 saniyede numuneye uygulandığı ödometre deneyleri de yapılmıştır. İlgili deneyde programda belirtilen zaman aralıklarında düşey yer değiştirmeler kaydedilerek konsolidasyon eğrileri karekök zaman- düşey yer değiştirme

eksenlerinde çizilip 100% konsolidasyon zamanı belirlenerek diğer gerilme adımına geçilmektedir. Deneyler hakkında detaylı bilgi Ansal ve Çelebi (2017)'de bulunmaktadır. N1 zemininin likit limitinin 56% olduğu Tablo 1'de görülmektedir



Şekil 2. CRS ve standart ödometre deneyi sonuçları, S1 (CL).

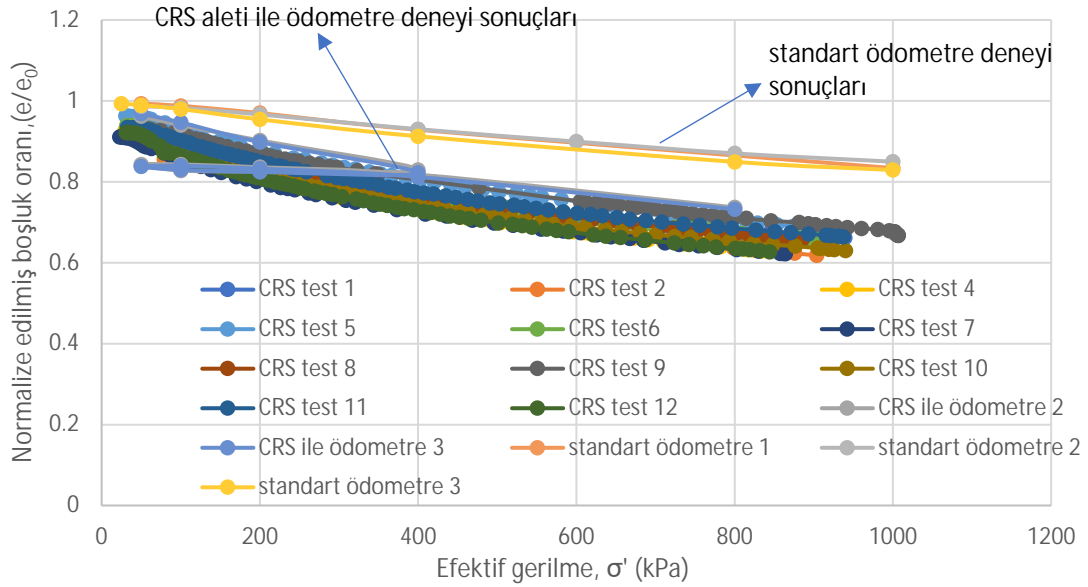
Çalışmada N1 ile yapılan CRS deneylerinde de 0,004 %/dk. deformasyon oranı kullanılmıştır. N1 ile yapılan bütün deneylerde deformasyon oranının 0,003~0,016 %/dk aralığında değiştiği gözlenmiştir. S1'e benzer başlangıç gerilmesi 25 kPa kullanılmış ve bu aşamada en az 6 saat beklenilmiştir. Suya doygunluk aşamasında 50 veya 100 kPa numune basınçları kullanılmış ve en az 24 saat beklenilmiştir. N1 ile yapılan bütün deneylerde konsolidasyon aşamasında yer-değiştirme hızının 0,0011~0,0017 mm/dk aralığında bulunduğu görülmüştür. Gerilme artım süresinin oturma davranışına etkisinin görülebilmesi amacı ile CRS, CRS ile ödometre ve standart ödometre deneylerinden gözlenen sonuçlar Şekil 3'te çizilmiştir. Şekil 3'te ön konsolidasyon basınçları iki doğrunun kesim noktası olarak Holtz ve Kovacs (1981)'e dayalı belirlenmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere ön konsolidasyon basınçları literatürde gözlenen sonuçlara uygun değildir. Literatürde konu ile ilgili çalışmalarda CRS deneylerinde yer değiştirme hızı arttıkça ön konsolidasyon basıncının arttığı gözlenmiştir. Deney hızının seçimi ve oluşturulan matematiksel formülün geçerliliği konusunda Lee vd. (1993) tarafından yapılan çalışma da $\Delta u/\Delta \sigma$ oranları sabit olacak biçimde ve farklı oranlar kullanılarak deneyler tekrarlanmıştır. Kullanılan zeminin likit limiti 90~100 % dolaylarındadır. Bu zemin ile 0,0056 mm/dk yer-değiştirme hızında yapılan deneylerden ön konsolidasyon basınçları ödometre deneylerinden gözlenen değerlerinden az miktarda daha büyük bulunmuştur. Konsolidasyon katsayılarının ise ödometre deneyi sonuçları ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. İlgili çalışma da deformasyon oranının en büyük sınır değeri $\beta = 0,1$ olarak tanımlanmıştır. Deformasyon oranı (β) < 0,1 olduğunda farklı teorilerden gözlenen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu bulunmuştur. Şekil 3'te CRS deneyi 4'te suya doygunluk aşamasında numune basıncı 50 kPa kullanılmıştır. Efektif gerilmeler 30 kPa'dan 737 kPa'a ortalama yer-değiştirme hızı 0,0014 mm/dk ile 48 saat 37dk'da ulaşmıştır. Lee vd. (1993) çalışmasındaki hız değeri (0,0056 mm/dk) bu çalışmadaki ortalama hız değeri (0,0014 mm/dk) ile karşılaştırıldığında ve zeminlerin likit limitleri dikkate alındığında çalışmadaki hız değerinin oldukça küçük olduğu görülmektedir.



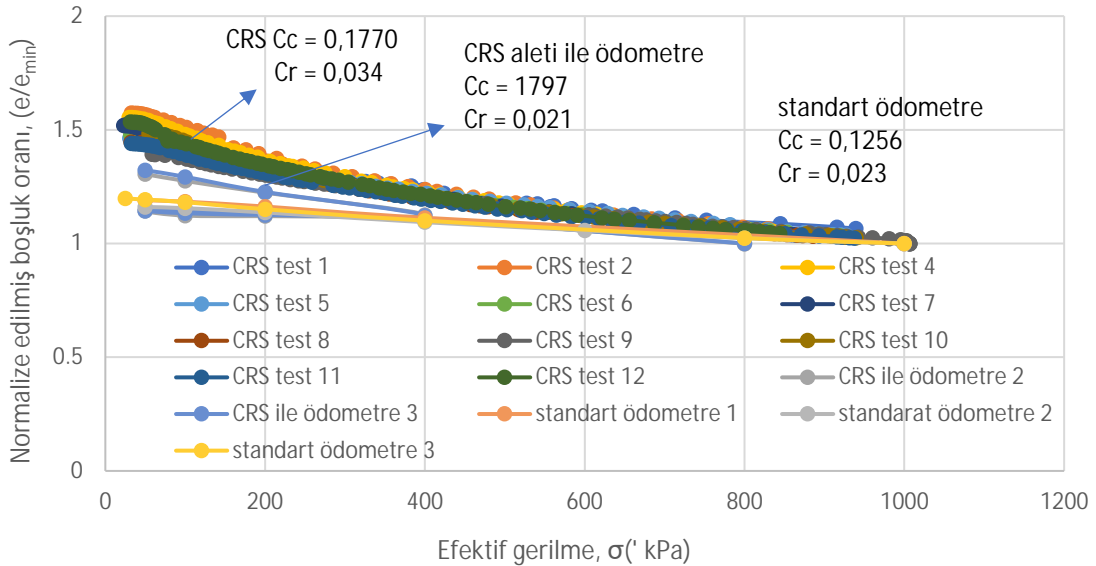
Şekil 3. CRS, CRS ile ödometre ve standart ödometre deneyleri sonuçları, N1 (CH).

CRS deney aleti ile yapılan ödometre deneyinde A noktasından B noktasına (30 kPa-400 kPa) 52 saate ve C'den D'ye (50kPa-800 kPa) 40 saat 31 dk'da ulaşılmıştır. Standart ödometre deneyinde 7 farklı gerilme artımı bulunmaktadır. Her gerilme artımında 24 saat beklenilmiştir. Janbu vd. (1981) çalışmasında $\lambda = \Delta u / \Delta \sigma$ değerinin sabit olduğu gerilme artımının sabit uygulandığı (CL) deneyleri yapılmıştır. İlgili çalışmada konsolidasyon aşamasında λ 'nın sabit kalabilmesi için deformasyon oranının değişimine izin verilmiştir. Deney sonuçlarına dayalı $\lambda < 0,35$ olduğunda CL ve CRS deneylerinden aynı ön konsolidasyon basınçları ve farklı deneylerden benzer konsolidasyon parametreleri bulunmuştur.

Çalışmada deney başlangıç boşluk oranının konsolidasyon eğrilerine etkisinin giderilmesi görüşü ile boşluk oranları deney başı boşluk oranları ile normalize edilmiştir. Deney sonuçlarına dayalı değerlendirme de aynı deney aleti ile yapılan deney sonuçlarının yaklaşık bir eğri ile gösterilebileceği görülmüştür. N4 zemini ile 12 adet CRS, 3 adet standart ödometre ve CRS deney aleti ile ödometre deneyleri yapılmıştır. CRS deneylerinin 2 adedinde 50 kPa diğerlerinde 25 kPa başlangıç gerilmeleri kullanılmıştır. Bu aşamada en az 4 saat beklenilmiş ve doyumluk aşamasına geçilmiştir. Doygunluk aşamasında 1 deneyde numune basıncı 0 iken diğerlerinde 100 kPa kullanılmıştır. N4 kullanılarak yapılan deney sonuçları e_0 ile normalize edildiğinde gözlenen grafik Şekil 4'te görülmektedir. N4'ün kullanıldığı deneylerde de deformasyon oranı 0,004 (%/dk) kullanılmış ve deneyler esnasında deformasyon oranının 0,002-0,01(%/dk), ortalama yer değiştirme hızının 0,0011-0,0015 (mm/dk) aralıklarında buldukları görülmüştür. Çalışmada kullanılan zeminler ile yapılan bütün deneylerde toplam gerilme programda belirtilen değerine ulaştığında o anda hesaplanan ilave boşluk suyu basıncının dağılması için ortalama en az 20 saat beklenilmiştir. İlave boşluk suyu basıncının sıfırlanması için gerekli süre o anda hesaplanan efektif gerilmenin değerine bağlıdır. Bu aşamadan sonra gerilmelerin azaltılması aşamasına geçilmiştir. Çalışmada kullanılan zeminlerle yapılan CRS, CRS ile ödometre ve standart ödometre deneyi sonuçları konsolidasyon eğrilerinin daha iyi değerlendirilebilmesi amacı ile boşluk oranları en büyük efektif gerilmeye karşılık gelen boşluk oranları (e_{min}) ile de normalize edilmiştir. N4'ün kullanıldığı deney sonuçlarından gözlenen grafik Şekil 5'te görülmektedir. Eğrilerin daha iyi görülebilmesi dolayısıyla uygulanan gerilmelerin geri alındığı bölümler Şekil 5'de çizilmemiştir.



Şekil 4. CRS, CRS aleti ile ve standart ödometre deneyi sonuçları, N4, (CL).

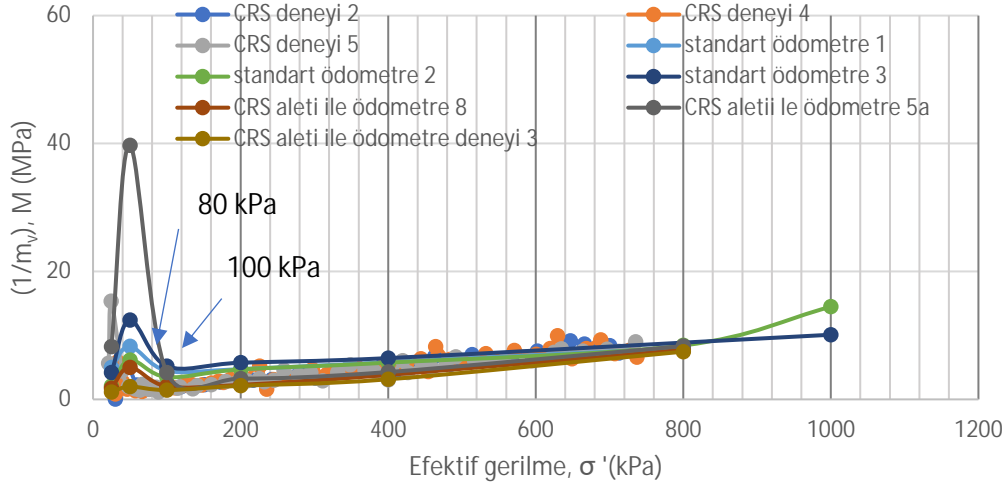


Şekil 5. CRS, CRS ile ödometre ve standart ödometre deneyi sonuçları, N4 (CL).

Şekil 5'te CRS aleti ile ödometre deneyleri 2: 5 gün 12 saat ve 3: 4 gün 18 saat'te tamamlanmıştır. CRS deneylerinde ise ortalama 30 saatte efektif gerilmeler ortalama 40 kPa'dan 940 kPa'ya ulaşmıştır. Standart ödometre deneylerinde her gerilme artımında 24 saat beklenilmiştir. Şekil 5'te CRS deneyi sonuçlarında ortalama $C_c = 0,1770$ yaklaşık (320~980 kPa), CRS deney aleti ile ödometre deneyi sonuçlarında ortalama $C_c = 0,1797$ (400~800 kPa) ve standart ödometre deneyi sonuçlarında ortalama $C_c = 0,1256$, (400~1000 kPa) gerilme aralıklarında hesaplanmıştır.

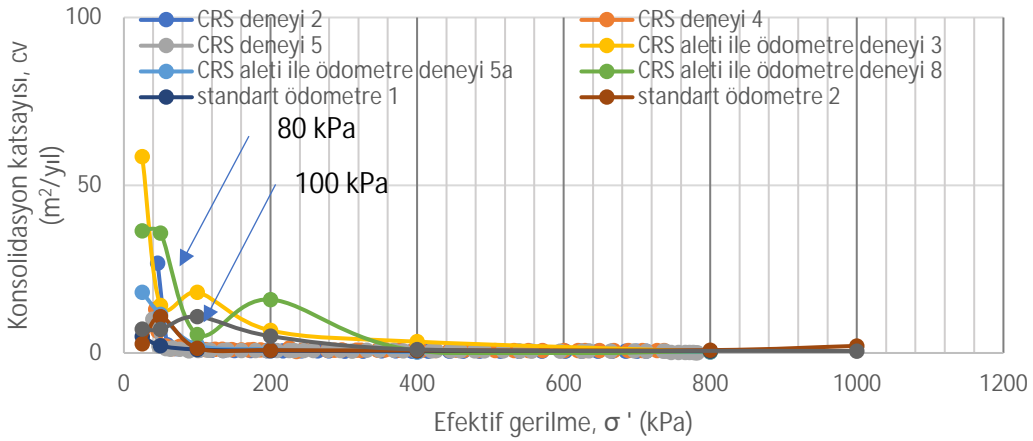
Farklı plastisite indisli zeminlerle yapılan deney sonuçları kullanılarak zeminlerin sıkışma modülleri ve konsolidasyon katsayıları da hesaplanmıştır. N1 kullanılarak yapılan bazı deney sonuçları Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Diğer numunelerle yapılan deney sonuçlarında da Şekil 6 ve 7'de görülen davranışa benzer davranış görülmüştür. Deney sonuçları efektif gerilme-sıkışma modülü eksenlerinde çizildiğinde Janbu vd. (1981)'e bağımlı ön

konsolidasyon basınçları eğrilerde sıkışma modülünün en küçük olduğu nokta olarak belirlenebilir. ilgili değerin CRS deneyi sonuçlarında yaklaşık 80 kPa ve standart ödometre deneyi sonuçlarında 100 kPa, olduğu Şekil 6'da görülmektedir. CRS deneyi sonuçlarında σ' - M bağıntısında görülen değişimin deformasyon oranının konsolidasyon esnasındaki değişiminden kaynaklandığı kabul edilmektedir.



Şekil 6. Efektif gerilme-sıkışma modülü bağıntısı, N1 (CH)

Deney sonuçları σ' - c_v eksenlerinde çizildiğinde gözlenen sonuç Şekil 7 de görülmektedir. Konsolidasyon katsayıları standart ödometre ve CRS ile ödometre deneyi sonuçlarında karekök-zaman metodu ile hesaplanmıştır. CRS veya CL deneyi sonuçlarında zeminlerin ön konsolidasyon basınçları Janbu vd. (1981)'e bağımlı konsolidasyon gerilmesi logaritmik ekseninde çizilmeden σ' - e , σ' - M veya σ' - c_v eğrileri yardımı ile belirlenebilir.



Şekil 7. Efektif gerilme-konsolidasyon katsayısı bağıntısı, N1.

N5 ile N1 ve N4'e benzer biçimde 6 adet CRS, 4 adet standart ödometre ve CRS deney aleti ile ödometre deneyleri yapılmıştır. Başlangıç gerilmesi 25 kPa kullanılmış ve bu aşamada en az 4 saat beklenilmiştir. Doğunluk aşamasında bir deneyde numune basıncı sıfır iken diğerlerinde 100 kPa kullanılmış ve en az 24 saat beklenilerek konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Deformasyon oranı 0,004(%/dk) kullanılmış ve bütün deneylerde 0,002~0,026(%/dk) aralığında değiştiği görülürken gerilme artım hızının ise 0,0011~0,002 mm/dk aralığında değiştiği görülmüştür. CRS deneylerinden kullanılabilir sonucun temini: deney sonuçlarına bağımlı çizilen σ' - e , σ' - M ve σ' - c_v eğrilerinin birbirleri ile uyumlu olması

ile sağlanabilir. Bu durumda numunelerin deney başı suya doygunluğuna bağlıdır. N5 kullanılarak yapılan CRS, CRS ile ödometre ve standart ödometre deneyi sonuçları logaritma efektif gerilme-boşluk oranı eksenlerinde çizildiğinde CRS deneyi 3'te $C_c = 0,1155$ (200~996 kPa) ve $C_r = 0,024$ (53~996 kPa) olarak hesaplanmıştır. İlgili deneyde efektif gerilmeler ortalama 0,0017 mm/dk yer değiştirme hızı ile 33 kPa'dan 964 kPa'a 20 saat 23dk'da ulaşmıştır. CRS aleti ile ödometre deneyi 3'te ise $C_c = 0,1465$ (200~800 kPa) ve $C_r = 0,033$ (25~800 kPa) olarak hesaplanmıştır. CRS aleti ile ödometre deneyi 3'te efektif gerilmelerin 25 kPa'dan 800 kPa'a ulaşması için geçen süre 19 saattir. Standart ödometre deneyi 1'de 6 adet gerilme artımı bulunmaktadır. Her gerilme artımında 24 saat beklenilmiştir ve $C_c = 0,1446$ (400~1200 kPa), $C_r = 0,025$ (25~1200 kPa) hesaplanmıştır. Ön konsolidasyon basınçlarından sonra farklı deneylerden gözlenen (CRS, IL) sıkışma indislerinde deney süreleri dikkate alınarak önemli ölçüde farkın bulunmadığı ve konsolidasyon eğrilerinin IL deneylerine oranla daha iyi tanımlandığı CRS deneyleri IL deneylerine tercih edilebilir (Davison ve Atkinson, 1990). N5 kullanılarak yapılan deney sonuçları $\sigma'-M$ ve $\sigma'-c_v$ eksenlerinde değerlendirildiğinde S1 ve N4'e benzer sonuçlar görülmüştür.

N5a ile 6 adet CRS ve 3 adet standart ödometre deneyleri yapılmıştır. CRS deneylerinin birinde başlangıç gerilmesi 50 kPa diğerlerinde 25 kPa kullanılmıştır. Doygunluk aşamasında 4 deneyde 100 kPa numune basıncı kullanılırken diğerlerinde 50 kPa kullanılmıştır. Bu zeminde de deformasyon oranı 0,004 (%/dk) kullanılmış ve tüm deneylerde deformasyon oranının ortalama 0,002~0,027 (%/dk) aralığında değiştiği görülmüştür. CRS deneylerinin hepsinde ortalama yer değiştirme hızının 0,002 mm/dk olduğu görülmüştür. Diğer zeminlerin deney sonuçlarına benzer: CRS deneyi sonuçları ve standart ödometre deneyi sonuçları logaritma efektif gerilme- boşluk oranı eksenlerinde çizildiğinde standart ödometre deneylerinden belirlenen ön konsolidasyon basınçlarının CRS deneylerinden belirlenen değerlerinden daha büyük oldukları görülmüştür. CRS ve standart ödometre deneyi sonuçları $\sigma'-M$ ve $\sigma'-c_v$ eksenlerinde çizilmiş ve deney sonuçlarının uyumlu oldukları görülmüştür. CRS deneyi sonuçlarında $\sigma'-M$ eğrilerinde ön konsolidasyon basıncı 100 kPa iken standart ödometre deneyi sonuçlarında 200 kPa olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

CRS, CRS ile ödometre ve standart ödometre deneyleri laboratuvarında yeniden konsolide edilerek ve standart proktor yöntemine dayalı optimum su muhtevassından daha fazla su muhtevassında hazırlanan numuneler kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçları $\sigma'-e$, $\sigma'-M$ ve $\sigma'-c_v$ eksenlerinde çizildiğinde üç farklı ekseninde kullanılan zeminlerin davranışlarının birbirleri ile uyumlu oldukları görülmüştür. Buna karşın farklı deney sonuçları $\log.\sigma'-e$ eksenlerinde çizildiğinde standart ödometre deneylerinden CRS deneylerine oranla daha büyük ön konsolidasyon basınçları belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda bulunan sonuçlara uygun olmayan sonucun çalışmada kullanılan ortalama yer değiştirme hızının küçük olmasından kaynaklandığı kabul edilmektedir. Ayrıca kullanılan deney aletlerinden ve numune tipinden de kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Farklı deney sonuçları $\sigma'-c_v$ eksenlerinde çizildiğinde standart ödometre deneylerinden gözlenen eğrilerin CRS ile ödometre deneyi sonuçlarına oranla CRS deneyleri eğrilerine daha uyumlu oldukları görülmüştür. Konsolidasyon eğrileri CRS deneyinde standart ödometre deneyine oranla çok fazla nokta ile tanımlanmaktadır. CRS deneylerinde gerilme artım süresi standart ödometre deneyine oranla çok daha kısadır.

KAYNAKLAR

- Ansal, A. ve Çelebi, A. (2017), "Kabarmaya Eğilimli Killi Zeminlerin Kabarma ve Konsolidasyon Özellikleri", Uluslararası katılımlı 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul.
- Atkinson, J. H., (2007), "The Mechanics of Soils and Foundations", 2nd edition, Taylor and Francis, London and New York.
- Davison, L. R. & Atkinson, J. H. (1990), "Continuous loading oedometer testing of soils", Q. J. Engineering Geology, Vol 23, 347-355.
- 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
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D. (1981), "An Introduction to Geotechnical Engineering", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
- Janbu, N., Tokhem, O. and Senneset, K. (1981), "Consolidation Tests with Continuous Loading", Proc. X ICSMFE, Stockholm, 1, 645-654.
- Kassim, K. A. and Clarke, B. G. (1999), "Constant Rate of Strain Consolidation Equipment and Procedure for Stabilized Soils", Geotechnical Testing Journal, Vol. 22, 13-21.
- 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.
- 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, 241-256.
- Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", Wiley, New York.

SEMBOL LİSTESİ

CRS: deformasyon oranını sabit olduğu ödometre deneyleri	CH yüksek plastisiteli kil
CL: gerilme artımının sabit olduğu ödometre deneyleri,	ρ_s danelerin birim hacim ağırlığı
IL: standart ödometre deneyleri,	$\beta = (\gamma h^2 / c_v)$ deformasyon oranı
Cc: sıkışma indisi,	γ deformasyon oranı
Cr: yeniden yükleme indisi,	h numunenin başlangıçtaki yüksekliği
W_L likit limit	c_v konsolidasyon katsayısı
W_p plastik limit	m_v hacimsel sıkışma sayısı
I_p plastisite indisi	CL düşük plastisiteli kil
ρ_d maksimum kuru birim hacim ağırlık	

