

Samsun-Çarşamba mavi kilinin sıkışma davranışına örselenmenin etkisi

Gökhan ÇEVİKBİLEN*, Ahmet SAĞLAMER

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Zeminlerin ek bir yüke maruz kaldıklarında sergileyecekleri zamana bağlı sıkışma davranışının önceden belirlenmesi geoteknik mühendisliği açısından büyük önem taşımaktadır. Yumuşak kil zeminler üzerinde inşa edilecek yapının ömrüne bağlı olarak mühendisin, toplam oturma hesabına birincil konsolidasyonun yanı sıra ikincil ve üçüncül sıkışma miktarlarını da katması gerekebilmektedir. Üçüncül sıkışmalar, her kil zemin türünde görülmemekle birlikte, özellikle organik zeminlerde büyük mertebelere ulaşabilmektedir. Bu çalışmada, üçüncül sıkışma davranışı sergileyen Samsun-Çarşamba Mavi Kili ile çalışılmıştır. Dane çatısının örselenmesinin üçüncül sıkışmalar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda örselenmemiş ve yoğrulmuş kil numuneleri üzerinde klasik konsolidasyon deneyleri ve 7 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda; örselenmenin birincil konsolidasyonun tamamlanma t_p süresini uzattığı, c_v katsayısını düşürdüğü, σ'_p önkonsolidasyon basıncını azaltarak belirsizleştirdiği, tekrar sıkışma indisini C_r artırdığı, sıkışma indisini C_c azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, örselenmeyle örselenmemiş numunelerde belirlenen ikincil sıkışmanın tamamlanma süresinin t_s kısaldığı, ikincil sıkışma katsayısı C_{α} değerinin %30 oranında arttığı, C_{α}/C_c oranının etkilenmediği görülmüştür. Örselenmenin üçüncül sıkışma katsayısını $C_{\alpha et}$ düşük gerilmelerde 4.5 kat artırdığı, gerilmenin artmasıyla bu artışın kaybolduğu bulunmuştur. Uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, ikincil ve üçüncül sıkışmalar sırasında örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerin sıkışma eğrilerinde Samsun Çarşamba Mavi Kilinde yaşlanma, yıkanma veya çimentolanma yönünde herhangi bir bulguya rastlanmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Konsolidasyon, ikincil sıkışma, örselenme.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Gökhan ÇEVİKBİLEN. cevikbil@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 37 40.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Samsun-Çarşamba Mavi kilinin zamana bağlı sıkışma davranışı" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 18.07.2007 tarihinde dergiye ulaşmış, 27.08.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Effect of disturbance on 1D compression behavior of Samsun-Carsamba blue clay

Extended abstract

In Turkey, housing problem due to rapid increase of human population and immigration to big cities enforces the municipalities to allow the sites having unfavourable geotechnical soils for settlement. Moreover, the requirement for large areas makes the lowlands with thick alluvial soil deposits be used for the structures like airports. Generally, high ground water causes low bearing capacity and high compressibility in soft clays in these types of soil deposits.

One of the examples of these types of problems in Turkey is the settlement problem at Samsun-Carsamba International Airport that has been constructed on Samsun-Carsamba plain of Black Sea region. During the construction stage of the airport the site explorations illustrated that the settlement problems would occur in the soil profile at the runway sections containing a soft blue clay layer named as Samsun-Carsamba blue clay. It was decided to improve the clay layer by preloading that existed below the 20 000 m² area at the beginning of the runway. The settlement observations during the one year preloading period showed that tertiary compression would also occur not only in organic soils and peat, but also in soft clays.

Wet sieve analysis illustrated that the grain size distribution of Samsun-Carsamba blue clay is 41% silt and 59% clay. The mineralogical investigations on the samples illustrated that clay grain size minerals consist of 40 - 50% Ca-montmorillonite, 30% calcite + quartz and 10% kaolin. The index properties of the clay are that consistency limits; liquid limit $w_L = 73\%$, plastic limit $w_P = 29\%$ specific unit weight $\gamma_s = 27.6 \text{ kN/m}^3$, and natural water content $w_n = 65\%$. According to the Unified Soil Classification System the clay has been classified as high plasticity clay CH.

Generally, the secondary compression of a soil at a constant effective stress is commonly attributed to collapsing of the soil fabric. On the other hand, what causes the tertiary compression is still not well defined. In the scope of this study the effect of disturbance on time dependent compression behaviour of Samsun-Carsamba blue clay has been investigated. For this purpose 2 conventional consolidation tests

and 7 long-term consolidation tests that lasted 3 to 8 months were performed on undisturbed and remoulded samples.

In the conventional consolidation tests where Load Increment Ratio $LIR=1$ and Load Increment Duration $LID=24$ hours, it has been found that remoulding decreased the initial void ratio. Furthermore, by remoulding, end of primary (EOP) $e\text{-log } \sigma'_v$ compression curves shift to downward, preconsolidation pressure becomes uncertain and at every stress level primary consolidation last longer. Moreover remoulding of Samsun-Carsamba blue clay sample increases recompression index (C_r) and decreases compression index (C_c). At every stress level remoulding causes a decrease on consolidation coefficient (c_v) values for undisturbed and remoulded samples. On undisturbed samples around preconsolidation pressures the 2 ~ 3 times reduction of c_v has been observed, whereas on remolded samples this has not been the case.

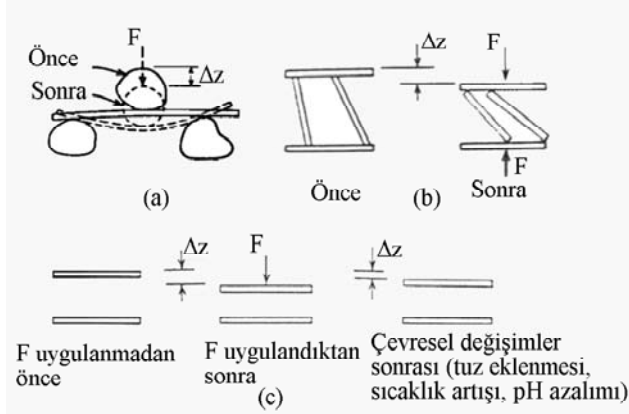
On undisturbed and remoulded samples, 7 long-term consolidation tests have been performed. Each test included a creep test that lasted 70 - 234 days at various stress levels ranging from 25 kPa to 400 kPa. As a result, the dispersed structure at remoulded sample illustrated more resistance towards flowing than the flocculated structure at undisturbed sample, so remoulding increases the primary consolidation time (t_p). Furthermore, remoulding decreases the end of secondary compression (t_s) or the initial time of tertiary compression. By remoulding the variation of secondary compression coefficient (C_α) and C_α/C_c ratio is negligible. For undisturbed samples as the effective stress increases, tertiary compression ratio ($C_{\alpha et}$) gradually increases whilst for remoulded samples the greater $C_{\alpha et}$ values at lower stress levels decreases.

During a long-term consolidation test up to the creep test stress level loading steps were carried out according to $LIR = 1$. To investigate the post compression behaviour of Samsun-Carsamba blue clay after creep tests, the samples have been loaded by small load increments ($LIR < 1$) gradually but no aging, leaching or cementing effects have been observed on $\varepsilon_v\text{-log } \sigma'_v$ graphs of undisturbed and remoulded samples.

Keywords: Consolidation, secondary compression, disturbance.

Giriş

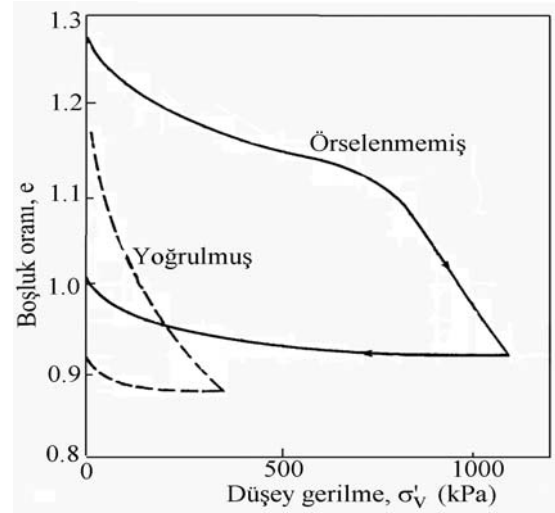
Bir zemin elemanının deformasyon geçmişi, zemin danelerinin deformasyonu ve elemanı oluşturan birçok danenin birbirine göre bağıl hareketi sonucu oluşmaktadır. İçerisinde kil daneleri bulunan zeminlere bakıldığında bu deformasyon mekanizmaları Şekil 1'deki formda olmaktadır.



Şekil 1. Deformasyon mekanizması
(Lambe ve Whitman, 1969)

Şekil 1a'daki gibi mika ve quartz danelerinin karışımından oluşan zeminin yüklenmesi durumunda, düzlemsel olan mika danelerinin eğilmesi deformasyona katılacaktır. Eğer zemin içerisinde Şekil 1b'deki gibi kil daneleri bulunuyorsa kil daneleri düşey yük altında çok daha yoğun bir yapı oluşturabilmektedir. Bu deformasyon mekanizması, örselenmemiş doğal kilin deformasyonuna katkıda bulunan bileşenlerden birisidir. Araştırmalar, özellikle kayma yüzeyleri boyunca danelerin paralel bir dizilime geldiklerini göstermektedir. Yük uygulanması ile kil danelerinin yeniden yönelmeleri sonucunda oluşan çoğu deformasyon, yükün kaldırılmasından sonra da geri kazanılamamaktadır. Saf killerde ise daneler arasındaki boşluklardaki değişim deformasyonun ana bileşenidir. Şekil 1c'de gösterildiği gibi saf killerde sadece yük uygulanmasıyla değil, çevresel değişimlerle de daneler arasındaki boşluklar azalabilmektedir. Örneğin boşluk suyundaki tuzun artması veya boşluk sıvısının pH değerinin azalması da daneler arasındaki boşlukları azaltmaktadır. Danele- rin yerleşimindeki değişim sonucunda oluşan deformasyonlar, geri dönüşümlü olabilmektedir.

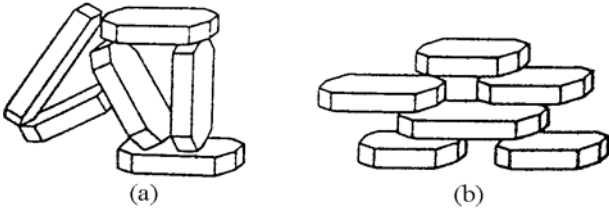
Lambe ve Whitman (1969), genellikle, doğal zeminlerin 13.8 MPa'nın altında yüklere maruz kaldıklarında esas olarak danelerin bağıl hareketi ve yeniden yerleşimi sonucunda deformasyona uğradıklarını belirtmiştir. Bu gerilmeden yüksek gerilmelerde, yüksek plastisiteli yoğrulmuş killerde deformasyona dane yerleşimindeki değişimin önemli bir katkısı olurken, iri daneli zeminlerde zemin danelerinin ufalanmasıyla oluşan deformasyon görüleceğini vurgulamışlardır. Doğal bir kil, oluşumu sırasındaki çevre koşullarına ve oluşumu sonrasında çevresel değişimlere bağlı olarak topak bir yapı geliştirmektedir. Deformasyonlar, kilin bu yapısını bozmaya ve daneleri yeniden yerleşmeye zorlamaktadır. Dane yapısının bozulmasının kil zeminin davranışı üzerindeki etkisi en iyi şekilde örselenmemiş ve yoğrulmuş killerin davranışının karşılaştırılmasıyla anlaşılabilir. Çünkü fiziksel olarak zemini homojen olana kadar yoğurmak, daneleri komşu danelerle aynı dizilime girmeye ve daneler arasındaki bağları bozmaya zorlamak demektir. 1932 yılındaki çalışmasında Casagrande, kilde doğal yapıyı yoğurarak bozmanın özellikle düşük gerilme seviyelerinde sıkışabilirliği oldukça artırdığını göstermiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Laurenian kili boşluk oranı-düşey gerilme ilişkisi üzerinde örselenmenin etkisi
(Lambe ve Whitman, 1969)

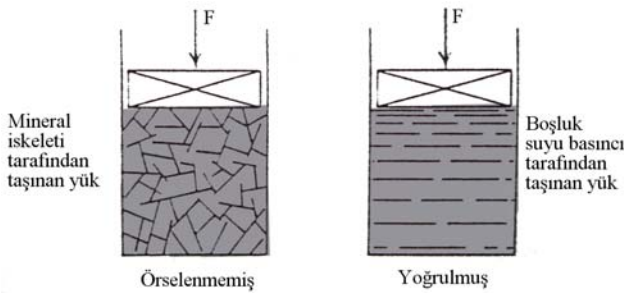
Bir zemin elemanının mühendislik davranışı mevcut dane yapısıyla çok ilgilidir. Genellikle,

topaklaşmış yapılı bir zemin elemanı (Şekil 3a), aynı zeminle, aynı boşluk oranına sahip dağınık hale getirilmiş bir yapıya (Şekil 3b) göre daha yüksek dayanıma, daha düşük sıkışabilirliğe, daha yüksek geçirgenliğe sahiptir. Topaklaşmış durumda daha yüksek dayanım ve düşük sıkışabilirlik, daneler arası etkileşimden ve düzensiz dizilimdeki danelerin yer değiştirme zorluğundan kaynaklanmaktadır. Topaklaşmış durumdaki zeminde yüksek geçirgenlik, akış için daha büyük kanalların bulunmasının bir sonucudur. Aynı boşluk oranında topaklaşmış bir zemin elemanında, dağınık yapıdaki bir elemana göre akış için aynı toplam kesit alanı varken, topaklaşmış zeminde akış kanalları sayıca daha az ve boyutu daha büyüktür. Böylece dağınık yapıya göre topaklaşmış bir zemin yapısı boyunca akışa karşı daha az bir direnç oluşacaktır.



Şekil 3. Zemin yapı tipleri a) topaklaşmış b) dağınık (Lambe ve Whitman, 1969)

Ayrıca örselenme, numunenin drenajsız mukavemetini azaltırken sıkışabilirliğini artırmakta ve ince daneli zeminlerin boşluk basıncı karakterini de değiştirmektedir. Yoğrulma esnasındaki aktif olan fiziksel işlem Şekil 4’de verilmiştir.



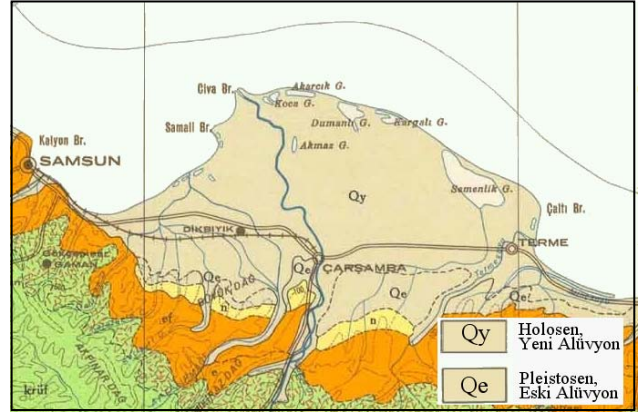
Şekil 4. Yoğrulma esnasında yük transferinin mekanik gösterimi (Lambe ve Whitman, 1969)

Sonuç olarak, dane çatısının zeminlerin mühendislik davranışını belirleyen en önemli parametrelere biri olduğu unutulmamalıdır. Bu çalış-

mada, Samsun Çarşamba Havaalanı pistinin KM 0+000 ile KM 0+500 arasındaki kesiminde yer alan ve sahanın önyüklemeye ile iyileştirilmesi sırasında üçüncül sıkışma davranışı sergilediği belirlenen Samsun Çarşamba Mavi kilinin bir boyutlu sıkışma davranışı incelenmektedir. Dane çatısının bozulmasının sıkışma davranışına olan etkisini araştırmak amacıyla örselenmemiş ve örselenmiş numunelerle çalışılmıştır. Bu kapsamda, sırasıyla Samsun-Çarşamba deltasının genel jeolojisi tanıtıldıktan sonra havaalanı sahasından alınan numunelerin endeks ve mineralojik özellikleri konu edilmiştir. Daha sonra, bu zemin üzerinde yapılan klasik konsolidasyon deneyleri ve uzun süreli konsolidasyon deneyleri ayrı başlıklar altında ele alınmıştır.

Numune özellikleri

Samsun-Çarşamba bölgesi Holosen alüvyonları ile temsil edilmekte olup Yeşilirmak, Terme Çayı ve Abdal Deresi ile yan derelerin taşıdığı malzemenin deniz içinde Neojen çukurluklarda birikmesi sonucunda oluşan Çarşamba delta düzlüğünde yer almaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Çarşamba bölgesinin jeolojik haritası

Bu çalışmada, Samsun-Çarşamba Havaalanı inşaatı sahasında yapılan sondajlardan ve açılan muayene çukurlarından, Samsun-Çarşamba mavi kil tabakasından alınan örselenmemiş tüp numuneleri kullanılmıştır. Bu zemine ait endeks deneylerinin sonuçları Tablo 1’deki gibidir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi’ne göre zemin yüksek plastisiteli CH grubu kil sınıfına girmektedir. Yılmaz (2000) çalışmasında, bu

tabakadan alınan numunelerin X - Ray, DTA ve Infrared analiz sonuçlarına göre Samsun-Çarşamba mavi kilinin %40 - 50 dolayında Ca-montmorillonit, %30 dolayında kalsit + kuvars ve %10 dolayında da kaolin içerdiğini belirlemiştir.

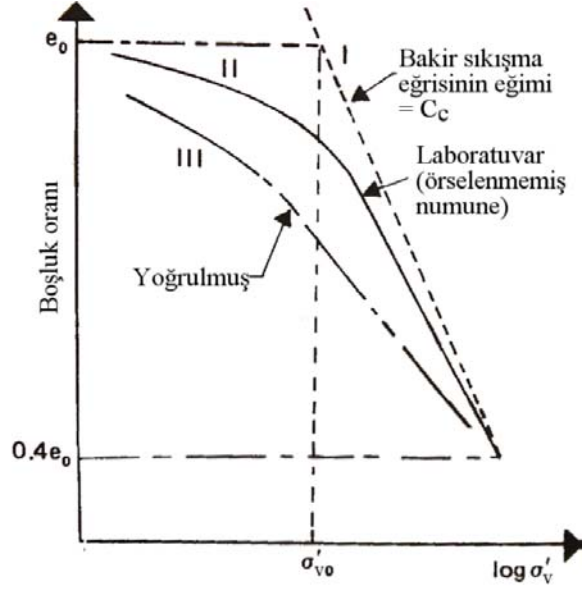
Tablo 1. Mavi kil tabakasının endeks özellikleri

Sondaj No	z (m)	w _L (%)	w _p (%)	I _p (%)	I _c (%)	I _L (%)	γ _s (kN/m ³)	w _n (%)
S1	7.50	72	29	43	19	81	28.0	64
S1	9.50	75	28	47	19	81	27.6	66
S3	4.50	67	29	38	6	94	27.2	65

Bu çalışmada, Samsun-Çarşamba mavi kilinden 7.50 m ve 8.00 m derinliklerden alınan tüp numunelerinin kullanılması tercih edilmiştir. Örselenmenin birincil konsolidasyon, ikincil sıkışma ve üçüncül sıkışma davranışları üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla örselenmemiş numunelerle çalışılmasının yanı sıra, numuneler spatula ile iyice karıştırılarak, aynı su içeriğinde fakat farklı dane çatısında, yoğrulmuş numunelerle de çalışılmıştır. Her iki tip numuneler üzerinde Wykeham-Farrance ve ELE marka ödometre aletlerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.

Klasik konsolidasyon davranışı üzerinde örselenmenin etkisi

Araziden alınan zemin numunelerinin bir miktar örselenmeyi içerdiği bilinmektedir. Bu numuneler üzerinde konsolidasyon deneyi yapıldığında sıkışma davranışları arazidekinden bir miktar farklı olmaktadır. Düşey efektif gerilme (σ'_{v0}) ve boşluk oranı (e_0) olmak üzere Şekil 6'da verilen I. Eğri, arazideki örselenmemiş normal konsolide bir kilin e - $\log \sigma'_v$ eğrisini gösteren arazi bakir sıkışma eğrisidir. Şekil 6'daki II. Eğri, araziden alınan örselenmemiş bir numunenin konsolidasyon deneyi sonucunda elde edilecek e - $\log \sigma'_v$ eğrisidir. Eğer numune tamamıyla yoğrulmuş ise konsolidasyon deneyinde oluşacak e - $\log \sigma'_v$ eğrisi III. Eğri gibidir. Arazi bakir eğrisi ile laboratuvar e - $\log \sigma'_v$ eğrilerinin yaklaşık $0.4 e_0$ gibi bir boşluk oranında çakıştığı bilinmektedir (Terzaghi ve Peck, 1967).

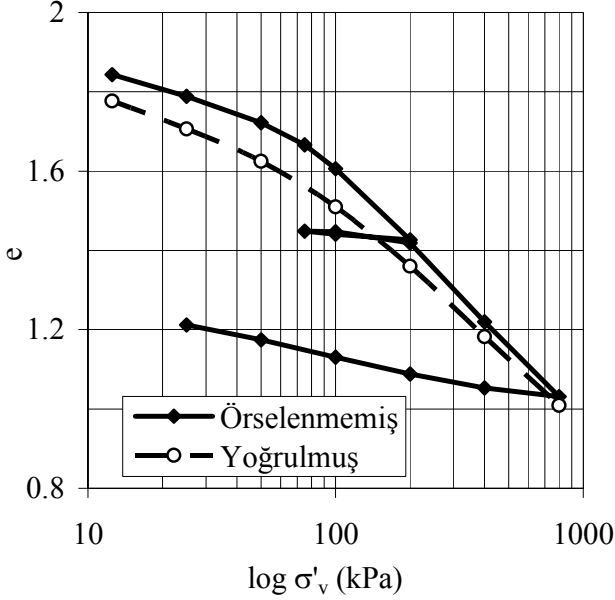


Şekil 6. Klasik konsolidasyon deneyinde gözlenen davranış üzerinde örselenmenin etkisi (Terzaghi ve Peck, 1967)

Bu çalışmada, örselenmemiş numuneler ile örselenmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş klasik konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen parametrelerin değişimi araştırılmış, önceki çalışmalarla karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaçla, sürekli örselenmemiş numunelerin alındığı S1 sondajı seçilmiştir. Söz konusu sahada, üstteki bitkisel zemin tabakasının altında birim hacim ağırlığı $\gamma_n = 18.0 \text{ kN/m}^3$ olan 1.5 m kalınlığındaki koyu kahverengi kil tabakası belirlenmiştir. Bu tabakanın altında birim hacim ağırlığı $\gamma_n = 15.6 \text{ kN/m}^3$ olan mavi kil tabakası olduğu ve yeraltı su seviyesinin de zemin yüzeyinden 0.5 m ile 1,0 m arasındaki derinliklerde mevsimsel olarak değiştiği bilinmektedir. Mavi renkli kil tabakası 13 m derinlikte karşılaşılan çok sıkı ($N_{60}=38$) koyu gri renkli kum tabakası ile sınırlıdır. Buna göre, 7.5 m derinlikten alınan örselenmemiş tüp numuneleri üzerindeki düşey efektif gerilme $\sigma'_v = 50 \text{ kPa} \sim 55 \text{ kPa}$ dolayındadır.

Klasik konsolidasyon deneylerinde, yük artım süresi, YAS=24 saat, Yük Artım Oranı, YAO=1 alınmış, 12.5 kPa gerilmesinden 800.0 kPa gerilmesine kadar yükleme yapılmıştır. Deneyler esnasında çift taraftan drenaja izin verilmiştir. Deneylerde her yükleme kademesi için zamana

bağlı sıkışma davranışı takip edilerek her gerilme kademesi için Casagrande yöntemiyle belirlenen birincil konsolidasyonun tamamlanma sürelerine göre Şekil 7'deki EOP $e-\log \sigma'_v$ eğrileri çizilmiştir.



Şekil 7. Örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerin $e-\log \sigma'_v$ eğrileri

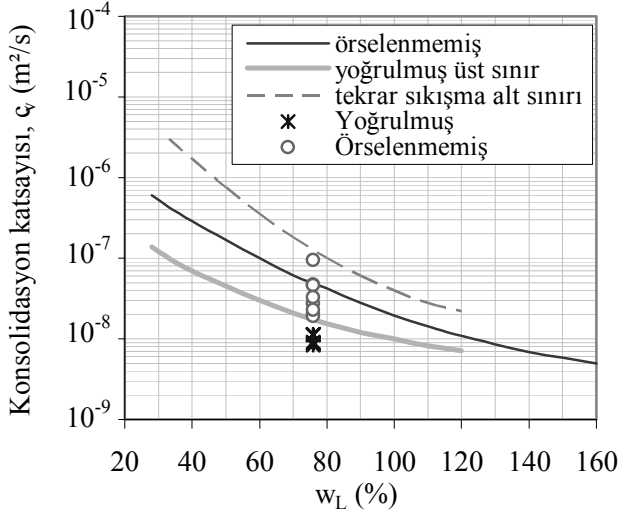
Buna göre, yoğrularak hazırlanmış örselenmiş numunelere uygulanan herhangi bir basınç altında ulaşılan boşluk oranı, örselenmemiş zemin numunelerine oranla daha düşük kalmıştır. Casagrande yöntemiyle bulunan önkonsolidasyon basıncı örselenmemiş numune için $\sigma'_p=85$ kPa, yoğrulmuş numune için $\sigma'_p=75$ kPa bulunmuştur. Örselenme ile $e-\log \sigma'_v$ eğrisinde gözlenen önkonsolidasyon basıncındaki bariz kırıklık giderek kaybolmuş ve görünen önkonsolidasyon basıncı değeri düşmüştür. Tekrar sıkışma indisi değeri örselenmemiş numune için $C_r=0.198$, örselenmiş numune için $C_r=0.221$ olmuştur. Sıkışma indisi değeri ise örselenmemiş numunede $C_c=0.647$ iken örselenmiş numune de $C_c=0.545$ olarak bulunmuş ve her iki numune de yüksek sıkışabilirlikli zemin ($C_c>0.4$) sınıfında kalmıştır. Örselenme ile sıkışma indisi (C_c) değeri azalırken, tekrar sıkışma indisi (C_r) değeri artmıştır. Örselenme, hem bakir sıkışma, hem de tekrar sıkışma fazlarında konsolidasyon katsayısını azaltmıştır.

Örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde yapılan klasik konsolidasyon deneylerinde, her basınç kademesi için hesaplanan konsolidasyon katsayısı (c_v) ile ikincil sıkışma oranı ($C_{\alpha\epsilon}$) değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Buna göre, örselenmemiş numunede önkonsolidasyon basıncı civarında gözlenen c_v değerindeki ani azalma yoğrulmuş numunede görülmemiştir. NAVFAC (1982), verdiği $c_v - w_L$ ilişkisinde aynı likit limit değerine sahip iki numunenin tekrar sıkışma kısmındaki c_v değerinin en yüksek olurken, bakir kısımdakinin daha düşük olacağını, örselenme ile bu değer daha da düşeceğini belirtmiştir. Şekil 8'de, NAVFAC tarafından verilen $c_v - w_L$ ilişkisine Samsun-Çarşamba mavi kilinin örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerinin klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen c_v değerleri işlenmiştir. Buna göre, bulunan değerlerin NAVFAC'ın önerdiği sınır değerler arasında kaldığı görülmektedir.

Tablo 2. Örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilen klasik konsolidasyon deneylerinden belirlenen parametreler

Numune Tipi	σ'_v (kPa)	c_v (m ² /s) (*10 ⁻⁸)	$C_{\alpha\epsilon}$
Örselenmemiş	12.5	9.42	0.00180
	25	4.67	0.00246
	50	4.65	0.00265
	75	2.76	0.00326
	100	2.02	0.00466
	200	1.90	0.00458
	400	3.29	0.00468
Yoğrulmuş	800	2.29	0.00490
	12.5	1.13	0.00276
	25	1.14	0.00352
	50	1.12	0.00455
	100	0.88	0.00518
	200	0.87	0.00508
	400	0.91	0.00514
800	0.83	0.00512	

Lambe ve Whitman (1969), örselenmemiş kil zeminlerde toprak yapının, aynı boşluk oranına sahip fakat yoğrulmuş olan kilin dağınık yapısına göre daha yüksek dayanıma, daha düşük sıkışabilirliğe, daha yüksek geçirgenliğe sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışma kapsamında



Şekil 8. Örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerin c_v-w_L ilişkisi (NAVFAC, 1982)

yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar tutarlı gözükmemektedir. Ayrıca, ikincil sıkışma oranlarında örselenme ile ufak bir artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar literatürdeki bulgularla örtüşmektedir.

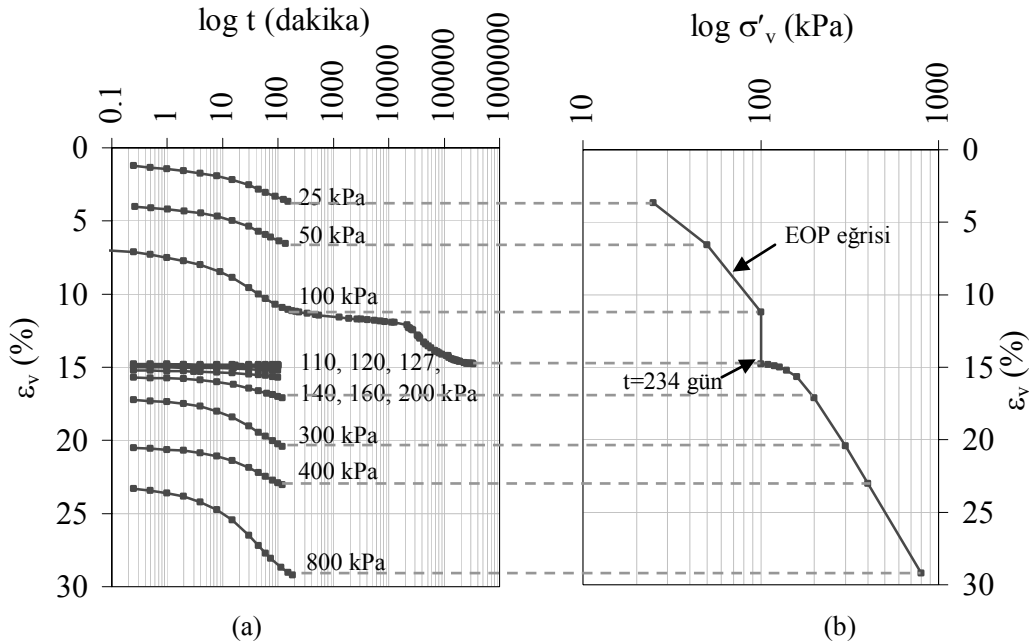
Uzun süreli konsolidasyon davranışı üzerinde örselenmenin etkisi

Örselenmenin bakir sıkışma kısmında ikincil sıkışma katsayısını azalttığı literatürde belirtilse de (Lade, 2001), örselenmenin üçüncül sıkışma

davranışına etkisi tam olarak bilinmemektedir. Üçüncül sıkışma davranışı sergilediği bilinen Samsun-Çarşamba mavi kilinin yoğrulmuş dane çatısı değiştirilmiş, ikincil ve üçüncül sıkışma davranışları araştırılmıştır. Bu amaçla, örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde çift taraftan drenajlı toplam 7 adet uzun süreli konsolidasyon deneyi yapılmıştır.

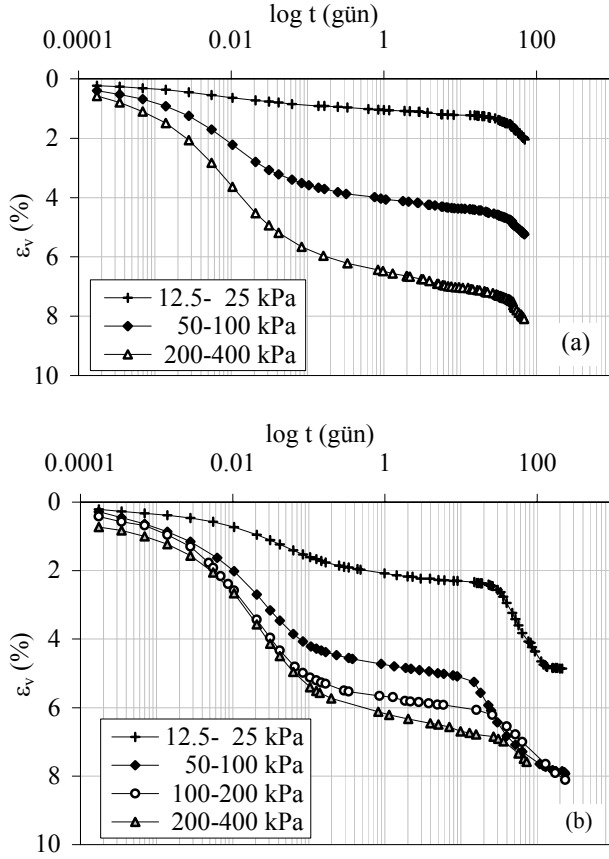
Her uzun süreli konsolidasyon deneyinde bir gerilme kademesinde ikincil ve üçüncül sıkışma davranışı incelenmiş ve bu gerilme kademesine sadece birincil konsolidasyona izin verildiği ara yük kademelerine $YAO=1$ alınarak çıkılmıştır. İkincil ve üçüncül sıkışmanın incelenmesinin ardından $YAO<1$ alınarak sadece birincil konsolidasyona izin verilen yükleme kademeleri ile 800 kPa gerilmesinde deney bitirilmiştir. Uzun süreli konsolidasyon deneylerine örnek olarak Şekil 9'da 100 kPa gerilmesinde 234 gün boyunca ikincil ve üçüncül sıkışma davranışının incelendiği yoğrulmuş numunenin $\epsilon_v-\log\sigma'_v$ ve $\epsilon_v-\log\sigma'_v$ eğrileri verilmiştir.

Toplam 7 adet uzun süreli konsolidasyon deneyinde, ikincil ve üçüncül sıkışma davranışının incelendiği gerilme kademelerine ait zamana



Şekil 9. 100 kPa gerilmesinde kripe gidilen yoğrulmuş numunenin uzun süreli konsolidasyon deneyine ait a) $\epsilon_v-\log\sigma'_v$ b) $\epsilon_v-\log\sigma'_v$ eğrileri

bağlı sıkışma davranışları örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler için sırasıyla Şekil 10a'da ve Şekil 10b'de verilen $\varepsilon_v - \log t$ grafiklerinde toplu halde sunulmuştur.



Şekil 10. a) Örselenmemiş b) Yoğrulmuş numunelerin $\varepsilon_v - \log t$ eğrileri

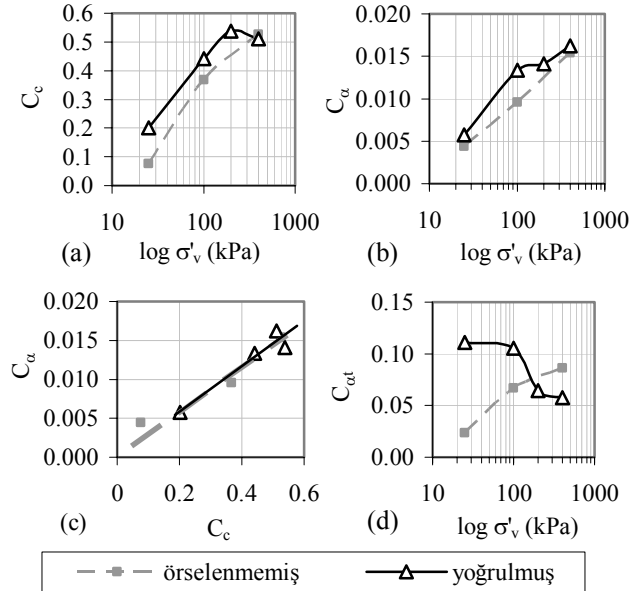
Tablo 3'te, ikincil ve üçüncül sıkışma davranışının incelendiği gerilme seviyelerindeki bekleme süresi (t) ile birincil konsolidasyon sonu (t_p) süresi ve ikincil konsolidasyon sonu (t_s) süresi verilmiştir. t_p süreleri, örselenmemiş numunede yoğrulmuş numuneye göre daha kısadır. Bunun nedeni, örselenmemiş toprak yapının yoğrulmuş dağınık yapıya göre suyun geçişine karşı daha az direnç göstermesi olarak yorumlanabilir. Ayrıca, deneylerde üçüncül sıkışma başlaması veya ikincil sıkışmaların tamamlanması, örselenmemiş numunede yoğrulmuş numuneye göre daha geç olmuştur. Lambe ve Whitman (1969), örselenmemiş toprak yapıdaki zemin elemanının aynı boşluk oranında dağınık hale getirilmiş bir yapıya göre daha yüksek dayanıma ve daha düşük sıkışabilirliğe sahip olduğunu

belirtmiştir. Bunun nedeninin, topaklaşmış yapıda daneler arası etkileşim ve düzensiz dizilimdeki danelerin yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençten kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 3. İkincil ve üçüncül sıkışmaların incelendiği gerilme kademeleri için süreler

Numune Tipi	σ'_v (kPa)	t (gün)	t_p (dakika)	t_s (gün)
Örselenmemiş	25	70	60	13.8
	100	69	90	20.8
	400	69	90	34.3
Yoğrulmuş	25	234	180	18.9
	100	234	150	13.8
	200	234	160	18.8
	400	73	150	26.8

Örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerde, ikincil ve üçüncül sıkışma davranışının incelendiği gerilme seviyeleri için elde edilen sıkışma indisi (C_c), ikincil sıkışma katsayısı (C_{α}), ikincil sıkışma oranı ($C_{\alpha\varepsilon}$) ve üçüncül sıkışma oranı ($C_{\alpha\varepsilon t}$) değerlerinin efektif gerilme ile değişimleri Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. İkincil ve üçüncül sıkışmanın incelendiği gerilme kademelerinde a) $C_c - \log \sigma'_v$ b) $C_{\alpha\varepsilon} - \log \sigma'_v$ c) $C_{\alpha\varepsilon} - C_c$ d) $C_{\alpha\varepsilon t} - \log \sigma'_v$ ilişkisi

Genel eğilim, her iki numune için de C_c , $C_{\alpha\varepsilon}$ ve C_{α} eğrilerinin efektif gerilme ile artışı yönünde-

dir. $C_{\alpha et}$ değeri efektif gerilme artması ile örselenmemiş numunede artarken, yoğrulmuş numunede azalmaktadır. Mesri ve Godlewski (1977), her zemin için sıkışma indisi (C_c) ve ikincil sıkışma katsayısının (C_α) efektif gerilme arasında tekil bir ilişki olduğunu savunmaktadır. Bu hipotezi destekleyen birçok araştırmacı tarafından pek çok zemin türü için sabit C_α/C_c oranları verilmiştir. Bu çalışmada belirlenen C_c ve C_α katsayılarının efektif gerilme ile değişimleri Şekil 11a ve Şekil 11b'de sırasıyla gösterilmiştir. Mesri (1973) ve Lade (2001), örselenmenin bakir sıkışma kısmında ikincil sıkışma katsayısını azaltacağını vurgulamıştır. Bu çalışmada yoğurarak dane çatısı dağınık hale getirilen numunede, C_α değeri düşük gerilmelerde %30 mertebesinde artarken, yüksek gerilmelerde yoğrulmuş numunenin C_α değerleri örselenmemiş numuneden bulunan değerlere yaklaşmıştır. Şekil 11c'den görüleceği üzere örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerin uzun süreli sıkışma davranışının incelendiği 25 kPa ile 400 kPa arasında değişen düşey gerilme seviyelerinde elde verilen C_α ile C_c değerleri arasında, regresyon analizi sonucunda korelasyon katsayısı oldukça yüksek olan aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir.

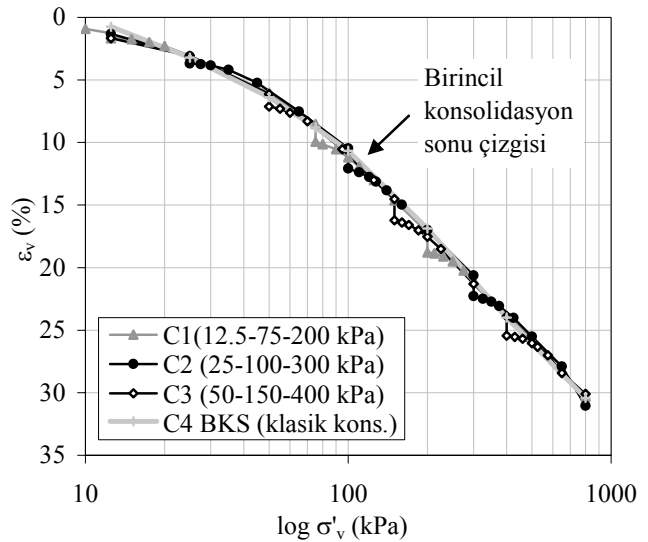
Örselenmemiş için; $C_\alpha / C_c = 0.0286$ ($R^2=0.90$)

Yoğrulmuş için; $C_\alpha / C_c = 0.0292$ ($R^2=0.93$)

Sonuç olarak; örselenme ile tekil C_α / C_c oranında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Çevikbilen (1999) ve Yılmaz (2000), aynı bölgede Samsun-Çarşamba mavi kil tabakasının farklı derinliklerinden aldıkları örselenmemiş numuneler üzerinde 25 adet gerilme seviyesinde 7~10 gün süre ile ikincil sıkışma davranışını inceleyerek C_α / C_c oranının 0.034~0.027 aralığında kaldığını ve ortalama $C_\alpha / C_c=0.029$ seçilebileceğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların, daha önceki çalışmalarla üst üste düştüğü belirlenmiştir. Ancak, Şekil 11d'deki $C_{\alpha et}-\log \sigma'_v$ ilişkisinden, efektif gerilmenin artması ile üçüncül sıkışma oranı $C_{\alpha et}$ değerinin örselenmemiş numunede azalarak arttığı, yoğrulmuş numunede ise azaldığı görülmüştür. Örselenmemiş numunede $C_{\alpha et}$ değerinin $C_{\alpha e}$ değerine oranı artarken, bu artış miktarı 5~7

kat aralığında sınırlı kalmıştır. Yoğrulmuş numunede ise $C_{\alpha et} / C_{\alpha e}$ oranı efektif gerilmenin artmasıyla 19'dan 4'e düşüş göstermiştir. Ayrıca örselenme, düşük gerilme seviyelerinde, $C_{\alpha et}$ değerini 4.5 kat artırırken, efektif gerilmenin artması ile bakir sıkışma kısmında örselenmemiş numunenin $C_{\alpha et}$ değerini % 30 oranında azaltmıştır.

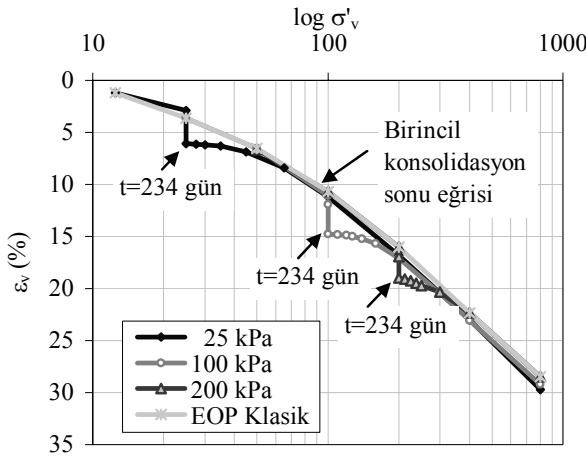
Her zemin minerolojisine ve sabit efektif gerilme altında sıkışma süresine bağlı olarak tekrar yüklenmesi durumunda sıkışma davranışı yaşanma, yıkanma veya çimentolanma yönünde farklılık göstermektedir. Çevikbilen (1999) ve Yılmaz (2000), Samsun-Çarşamba mavi kilinin farklı derinliklerinden aldıkları örselenmemiş numuneler üzerinde değişik gerilmelerde bir haftadan 6.5 aya kadar değişen sürelerde ikincil sıkışma davranışını inceledikleri toplam 25 adet gerilme seviyesi sonrasında yaşanma, yıkanma veya çimentolanma yönünde herhangi bir bulguya rastlamamışlardır. Şekil 12'de söz konusu çalışmada 4.5 m derinlikten alınan numuneler üzerinde klasik konsolidasyon deneyi ile birer hafta süre ile ikincil sıkışmaların incelendiği 9 farklı gerilme seviyesinin ardından yüklenen numunelerin sıkışma eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 12. Örselenmemiş numunelerin $\epsilon_v-\log \sigma'_v$ eğrisine bir örnek (Yılmaz, 2000)

Bu çalışmada, Samsun-Çarşamba mavi kilinin ileriki yükleme koşullarında sıkışma davranışına örselenmenin etkisini göstermek amacıyla örselenmemiş

lenmiş numuneler 234 günlük bekleme süresinin ardından üçüncül sıkışma sırasında küçük yük artımlarıyla ($YAO < 1$) 800 kPa gerilmesine kadar yüklenmiştir (Şekil 13). Sonuç olarak, üç gerilme seviyesi sonrasında da herhangi bir çimentolanma, yaşlanma veya yıkanma olgusu gözlenmemiştir. Yoğrulmuş numunelerin üçüncül sıkışma sonrasında yüklenmeleri durumunda ortaya çıkan sıkışma davranışlarına yer verilirken, eldeki numunelerin kurumaya başlaması ve sahadan yeni numune alınamaması sebebiyle örselenmemiş numunelerin üçüncül sıkışma sonrası davranışı incelenememiştir.



Şekil 13. Yoğrulmuş numunelerin ε_v - $\log \sigma'_v$ ilişkisi

Sonuçlar

- Örselenmenin, birincil konsolidasyonun tamamlanma t_p süresini uzattığı, c_v katsayısını düşürdüğü, σ'_p önkonsolidasyon basıncını azaltarak belirsizleştirdiği, tekrar sıkışma indisini C_r artırdığı, sıkışma indisini C_c azalttığı belirlenmiştir.
- Örselenmenin, ikincil sıkışmanın tamamlanma süresini t_s kısalttığı, ikincil sıkışma katsayısını C_α %30 oranında arttırdığı, C_α/C_c oranını fazla etkilemediği belirlenmiştir.
- Örselenmemiş numunede üçüncül sıkışma oranının $C_{\alpha et}$, ikincil sıkışma oranı $C_{\alpha e}$ değerine göre 5~7 kat daha büyük olmuştur. Yoğrulmuş numunede düşük gerilmelerde 19 kat bulunan $C_{\alpha et}/C_{\alpha e}$ oranının gerilme artışı ile 4 kata kadar düştüğü görülmüştür. Ayrıca, örselenmenin üçüncül sıkışma kat-

sayısı $C_{\alpha et}$ değerini düşük gerilmelerde 4.5 kat artırdığı, gerilmenin artmasıyla bu artışın kaybolduğu bulunmuştur.

- Uzun süreli konsolidasyon deneylerinde, ikincil ve üçüncül sıkışmaların incelendiği gerilme kademeleri sonrasında küçük yük artımları ile yüklenen örselenmemiş ve yoğrulmuş numunelerin sıkışma eğrilerinde, yaşlanma, yıkanma veya çimentolanma etkilerine rastlanmamıştır.
- Sonuç olarak; fiziksel olarak zemini yoğurmak, daneleri komşu danelerle aynı dizilime girmeye ve daneler arasındaki bağları bozmaya zorlamaktır. Bir kilde doğal yapıyı yoğurarak bozmak özellikle düşük gerilme seviyelerinde sıkışabilirliği oldukça artırmaktadır. Bu yönüyle dane çatısının, zeminlerin mühendislik davranışını belirleyen en önemli parametrelerden birisi olduğu belirlenmiştir.

Kaynaklar

- Çevikbilen, G., (1999). Yumuşak kil zeminlerin ikincil konsolidasyonu, *Yüksek lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lade, P.V., (2001). *Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook*, Rowe, R. K. (ed.). Boston Kluwer Academic.
- Lambe, T.W., Whitman R.V. (1969). *Soil mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
- Mesri, G. (1973). Coefficient of secondary compression, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, **99**, 1, 123-137.
- Mesri G., ve Godlewski P.M. (1977). Time and Stress Compressibility Interrelationship, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, **103**, 5, 417-430.
- NAVFAC (1982). DM-7.1, *Soil Mechanics, Design Manual 7.1*, Department of the US Navy, Naval Facilities Engineering Command, VA, 22332.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. A Wiley International Edition, 729, U.S.B.R.
- Yılmaz, E. (2000). Samsun Çarşamba mavi kilinin ikincil ve üçüncül sıkışma davranışı, *Doktora tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.