



İnce taneli zeminlerin konsolidasyon katsayısının kombine düzenek kullanılarak incelenmesi

Investigation of the coefficient of consolidation of fine-grained soils using combined apparatus

Ramin ASADI^a, Kamil KAYABALI^a ve Mehmet Can BALCI^{b*}

^aAnkara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

^bBatman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Konsolidasyon Katsayısı,
Permeabilite Katsayısı,
Ödometre Deneyi,
Kombine Düzenek.

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, geleneksel bir boyutlu konsolidasyon deneylerinden Taylor karekök zaman yöntemi ile tanımlanan konsolidasyon katsayılarını (c_v), bu çalışma için özel olarak tasarlanmış kombine düzenek ile yapılan permeabilite-konsolidasyon deneylerinden Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisi ile hesaplanan konsolidasyon katsayıları ile karşılaştırmaktır. Ayrıca, zeminlerin indeks özellikleri ve permeabilite katsayıları (k) kullanılarak c_v 'yi tanımlamak için ampirik bir ilişki geliştirilmiştir. Kombine düzenden permeabilite-konsolidasyon deneyleri ile elde edilen konsolidasyon katsayılarının, geleneksel Tek Boyutlu (1B) Konsolidasyon deneylerinden Taylor yöntemi ile tanımlanan konsolidasyon katsayılarından büyük olduğu görülmüştür. Yüksek plastiklik derecesine sahip zemin numunelerinde aradaki farkın daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Geleneksel deneylerden Taylor yöntemi ile belirlenen konsolidasyon katsayısı değerlerinin zeminin plastiklik derecesine bağlı olarak yük artışıyla beraber geniş aralıkta dağılım gösterdiği görülmüştür. Kombine düzenden elde edilen c_v değerlerinde genel olarak düşük yük değerlerinde yük artışıyla beraber azalma, yüksek yükleme kademelerinde ise artış gösterdiği tespit edilmiştir. Önerilen ampirik ilişkiden elde edilen c_v değerleri ile geçirgenlik-konsolidasyon ilişkileri ile tanımlanan c_v değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Geliş Tarihi: 06.08.2020

Kabul Tarihi: 04.12.2020

Keywords:

Coefficient of
Consolidation, Coefficient
of Permeability,
Oedometer Test,
Combined Apparatus.

ABSTRACT

The scope of this investigation is to compare the coefficient of consolidation (c_v) values defined by the Taylor's Square Root of Time Fitting Method, which is obtained from the conventional oedometer tests, with the c_v values calculated by Terzaghi's One Dimensional (1D) Consolidation Theory, which is obtained from the permeability-consolidation tests performed with a combined apparatus specifically designed for this study. In addition, an empirical relation is developed to determine c_v using the coefficient of permeability (k) and index properties of the soils. The c_v values obtained from the permeability-consolidation tests using the combined apparatus were found to be larger than the c_v values defined by the Taylor's method, which is one of the oedometer tests. The findings showed that the difference was more prominent in the soil samples with a high plasticity. It was also found that the c_v calculated by the Taylor's method exhibited a distribution in a wide range with the increased load depending on the degree of plasticity of the soil. The c_v obtained from the combined apparatus it decreased with low load values and increased with higher load levels. The c_v obtained by the proposed empirical relationship showed good agreement with the c_v defined by permeability-consolidation relationships.

Atf bilgisi: Asadi, R., Kayabali, K., Balci, M.C. 2021. Investigation of the coefficient of consolidation of fine-grained soils using combined apparatus. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 166, 71-83. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.835936>

*Başvurulacak yazar: Mehmet Can BALCI, mcanbalci@gmail.com

1. Giriş

Mühendislik yapılarının sağlam ve ekonomik tasarımlarını yapabilmek için yapıların üzerinde bulunduğu zemin özelliklerinin tanımlanması ve farklı yükleme durumlarında zeminlerin davranışlarının tahmin edilmesi potansiyel zemin problemlerinin ortaya konulması açısından oldukça önemlidir. Önemli projelerde karşılaşılabilecek zemin problemlerinin başında oturmalar gelmektedir. Yapı önem katsayısı ve zemin türüne bağlı olarak zeminlerde izin verilebilir oturma miktarı tanımlanır. Yapının tasarım ömrü boyunca oturma bileşenlerinin izin verilebilir limitlerin üzerinde olması durumunda, üst yapıda kırık, çatlak ve yarık gibi istenmeyen yapısal bütünlüğü bozan bazı hasarlar ortaya çıkar. Bu etki ileri seviyeye ulaşırsa yapı kısmen hasar görür, daha da ilerleyen aşamalarda ise tamamen kullanılmaz hale gelir.

Geçirgenliği düşük doygun zeminler yüke maruz kaldıkları zaman gerçekleşen oturmanın büyük bir kısmını konsolidasyon oturması oluşturmaktadır. Konsolidasyon oturması (s_c) zamana bağlı olarak gelişen bir süreç olup bazı zeminlerde oldukça uzun zaman diliminde gerçekleşebilir. Bir yapının tasarım ömrünün belirlenmesinde yükleme koşulları altında zeminde meydana gelecek konsolidasyon oturmasının ne kadar sürede gerçekleşeceği oldukça önemlidir. Holtz ve Kovacs (1981)'in da belirttiği gibi, konsolidasyon katsayısı (c_v) konsolidasyon oturmasını hız bakımından kontrol eden tek parametredir. Bu parametre zemin iyileştirmelerinde ve önyüklemeye tekniğinin kullanımında çok önemlidir. Konsolidasyon katsayısı Terzaghi (1925)'nin 1B Teorisi'nden üretilen bir terimdir. Terzaghi (1925)'nin 1B Konsolidasyon Teorisi'nden yola çıkarak zemin permeabilitesi (k) ile konsolidasyon katsayısı (c_v) ve hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır.

$$c_v = k / (m_v \gamma_w) \quad (1)$$

Burada γ_w (kN/m^3) suyun birim hacim ağırlığıdır.

Tek yönlü konsolidasyon deneylerinden c_v 'nin hesaplanmasına dair birçok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle farklı matematiksel yaklaşımları ve eğri uyarlama yöntemlerini içermektedir. c_v 'yi hesaplamaya dair geliştirilmiş olan eğri uyarlama yöntemleri özet olarak Çizelge 1'de verilmiştir.

Casagrande ve Fadum (1940) ile Taylor (1948), geliştirdikleri ampirik yöntemleri gözlemsel laboratuvar deney verilerini Terzaghi'nin konsolidasyon teorisine yaklaşık olarak uyarlamak üzere geliştirmişlerdir. Feng ve Lee (2001) 'ye göre her iki yöntem de rutin laboratuvar deneylerindeki en kullanışlı yöntemler olarak bilinmektedir. Ancak, Casagrande'nin logaritma-zaman yönteminden tanımlanan konsolidasyon katsayısı, deformasyon (ϵ) - zaman (t) eğrisinin birincil sıkışma ve ikincil sıkışmasından etkilenmektedir (Sridharan ve Prakash, 1995; Cortellazzo, 2002). Taylor Karekök Zaman yönteminde ise konsolidasyon derecesinin %100'ü yerine %90'ı kullanıldığı için ikincil sıkışmadan daha az etkilendiği buna karşın birincil sıkışmadan ise daha çok etkilendiği düşünülmektedir (Sridharan ve Prakash, 1995; Cortellazzo, 2002). Sridharan vd. (1995) konsolidasyon katsayısının birincil sıkışmadan etkilendiğinde daha yüksek ve ikincil sıkışmadan etkilendiğinde daha düşük miktarlar göstermesi gerektiğini öne sürmüştür.

Ancak, literatürde bulunan çok sayıda yöntemin varlığı, bu yöntemlerin her koşulda geçerli olmadığına bir göstergesidir. Ayrıca, farklı yöntemlerle elde edilen c_v değerleri çok farklı olduklarından, en azından laboratuvar test koşullarındaki zemin davranışına göre konsolidasyon katsayıları için makul bir karar vermek zordur. Sridharan ve Nagaraj (2004)'a göre farklı durumlarda ve farklı malzemelerde eğri uyarlama yöntemlerin hiçbirisi tam olarak doğru sonucu veya doğruya yakın sonucu sağlamamaktadır. Al-Zoubi (2004) eğri uyarlama yöntemlerinden tanımlanan konsolidasyon katsayılarının aralarındaki

Çizelge 1- c_v 'yi hesaplamak için geliştirilmiş eğri uyarlama yöntemleri.

Kaynak	Yöntem
Casagrande ve Fadum(1940)	log t50
Taylor (1948)	$\sqrt{t}90$
Su (1958)	Maksimum eğim
Sivaram ve Swamee (1977)	Hesaplama
Sridharan vd. (1987)	Dikdörtgen hiperbol
Sridharan ve Prakash (1993)	$\delta t-t/\delta t$
Robinson ve Allam (1996)	Erken evre log-t
Mesri vd. (1999)	Dönüm noktası
Feng ve Lee (2001)	$\sqrt{t}60$
Al-Zoubi (2010)	SRS

büyük değişikliklerin özel bir yükleme kademesi sırasında konsolidasyon katsayılarının değişimi, nihai konsolidasyon oturmasını tayin etme prosedürü, ikincil sıkışmayı da kapsayan yükleme zamanı ve bu yöntemlerde kullanılan ilave varsayımlar gibi sebeplerden kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Lovisa ve Sivakugan (2013) eğri uyarlama yöntemleri kullanılarak belirlenen c_v değerlerini karşılaştırmışlardır. Eğri uyarlama yöntemleri ile ilgili yukarıda sıralanan birçok tartışmalı hususa rağmen mevcut jeoteknik uygulamalarda c_v 'nin belirlenmesinde yaygın olarak Taylor karekök zaman yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Taylor (1948) c_v 'nin bulunmasında konsolidasyon deneyi sırasında geçen zamanın karekökünü kullanarak bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, konsolidasyon deneyi süresince alınan komparatör saati okumaları ile deney sırasında numune üzerine uygulanan yükün numuneye etkime süresinin karekökü arasındaki ilişkiyi gösteren bir eğri çizilir. Bu eğrinin düz olan başlangıç kısmı düşey eksenine kesene kadar uzatılır. Elde edilen kesişme noktasındaki değer 1,15 katına karşılık gelecek şekilde yine başlangıç noktasından ikinci bir doğru çizilir. İkinci doğrunun konsolidasyon deneylerinden elde edilen eğriyi kestiği noktanın absisindeki izdüşümü, birincil konsolidasyonun %90'lık bölümünün gerçekleşmesi için geçen süreyi (t_{90}) ifade eder. $U = \%90$ için zaman faktörü 0,848 alınarak c_v aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$c_v: T_v d^2/t_{90} \quad (2)$$

Burada T_v zaman faktörü, d drenaj yolu uzunluğu ve t_{90} konsolidasyon oturmasının %90'ının gerçekleştiği zaman olarak ifade edilmektedir. Eğri uyarlama yöntemleri ile c_v hesaplamalarında karşılaşılan sorunlardan dolayı farklı araştırmacılar tarafından farklı araştırmalar geliştirilmiştir. Çizelge 2'de gösterilen bazı araştırmacılar zeminin indeks özelliklerini kullanarak ödometre deneyinden bağımsız olarak c_v 'yi hesaplamaya çalışmışlardır.

Carrier (1985) zeminlerin likitlik indeksini, plastiklik indeksini, ve aktivitesini dikkate alarak c_v 'nin tanımlanmasına yönelik bir denklem geliştirmiştir. Narasimha vd. (1995) likit limitteki boşluk oranı ve sahadaki mevcut örtü basıncını göz önüne alarak normal konsolide killer için c_v 'nin hesaplamasına dair bir başka ampirik denklem önermiştir. Solanki ve Desai (2008) Hindistan'ın Güney Gujarat bölgesinde

Çizelge 2- c_v 'nin hesaplanması için geliştirilen bazı ampirik ilişkiler.

Carrier (1985)	$c_v = \frac{9.04(10^{-7})(1.192 + ACT^{-1})^{6.993}(4.135LI + 1)^{4.29}}{PI(2.03LI + 1.192 + ACT^{-1})^{7.993}}$
Narasimha vd. (1995)	$c_v = \left(\frac{1+e_{LL}(1.23-0.276 \log \sigma'_v)}{e_{LL}} \right) \left(\frac{1}{\sigma'_{v(0.353)}} \right) (10^{-3}) e_{LL} = \left(\frac{LL(\%)}{100} \right) G_s$
Sridharan ve Nagaraj (2004)	$c_v = \frac{3}{100(SI)^{3.54}}$
Solanki ve Desai (2008)	$c_v = 10^8(LL^{-6.7591}), c_v = 7.7525(PI^{-3.1021})$
Al-Ameri vd. (2011)	$c_v = 4258(LL^{-1.75})$

ACT: Aktivite, eLL: Likit Limitteki boşluk oranı, G_s: Özgül Ağırlık, LI: Likidite İndeksi, LL: Likil Limit, PI:Plastisite İndeksi, SI: Büzülme İndeksi, σ'_v : Düşey Efektif Gerilme

alüvyonlu killerin konsolidasyon parametrelerini inceleyerek likit limit ve plastiklik derecesi ile c_v arasında bir ilişki önermişlerdir. Sridharan ve Nagaraj (2004) büzülme indeksinin c_v ile ilişkisinin likit limit ve plastisite indeksine göre daha tutarlı olduğunu önermiştir. Al-Ameri vd. (2011) farklı 280 noktadan alınan siltli killer üzerinde inceleme yaparak likit limit ve c_v arasında yeni bir ilişki kurmuşlardır. Olek ve Pilecka (2019) büyük ölçekli Rowe hücrelerini, Chow vd. (2020) ve Vinod ve Sridharan (2015) ise boşluk suyu basıncı ölçümünü c_v 'nin belirlenmesi için değerlendirmiştir. Nguyen vd. (2019) yapay zeka yaklaşımını yumuşak zeminlerin c_v değerlerini tahmin etmede kullanmışlardır. Yukarıda sıralanan çalışmaların yanı sıra Olson (1986), eğri uyarma yöntemlerinden elde edilen konsolidasyon katsayılarındaki büyük farklılıkları göz önüne alarak c_v 'nin Terzaghi yöntemi ile tanımlanmasının tek akılcı yöntem olduğunu önermiştir.

Bu çalışmanın amacı ise, farklı plastiklik özelliğine sahip, yoğrulmuş zeminlerden hazırlanmış özdeş numuneler üzerinde geleneksel tek yönlü konsolidasyon deneyleri yaparak c_v 'yi Taylor Karekök Zaman Yöntemi ile belirleyip, aynı numuneler üzerinde bu çalışma için özel olarak geliştirilen kombine düzenek ile permeabilite-konsolidasyon deneyleri yaparak c_v 'yi Terzaghi'nin tanımladığı ilişkiyle belirleyerek her iki yöntemin sonuçları arasında karşılaştırma yapmak ve geleneksel tek yönlü konsolidasyon deneyinden elde edilen c_v 'nin güvenilirlik derecesini sorgulamaktır.

2. Materyal

2.1. Kombine Düzenek

Permeabilite-konsolidasyon deneyleri bu çalışma için özel tasarlanmış olan kombine hücrelerde gerçekleştirilmiştir. Bu hücreler, numunelerin yüklenmesi esnasında içerisinde suyun akımına imkân sağlayan özelliktedir. Kombine hücreler; taban, başlık ve pleksiglas gövdeden oluşmaktadır. Silindirik şekilde olan pleksiglas gövdenin iç çapı 50 mm, dış çapı 70 mm ve yüksekliği 125 mm'dir. Tabanda biriken suyun dışarı aktarılması için su çıkış noktası öngörülmüştür. Başlığın merkezinde yükleme pistonunun giriş noktası bulunmaktadır. Yükleme pistonu ile başlık arasındaki buluşma noktasında sürtünmenin minimuma indirmesine özel önem verilmiştir. Hücre birleştirdikten sonra bu noktadan suyun kaçmasını engellemek için bir o-ring eklenmiştir. Kombine düzeneğin ayrıntıları Şekil 1'de verilmiştir.

2.2. Zemin Numuneleri

Deneysel 12 adet yoğrulmuş zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma parametrik olduğundan ve çok sayıda zemin numunesine ihtiyaç olduğundan, yoğrulmuş zemin karışımları laboratuvar ortamında hazırlanarak numune ihtiyacı karşılanmıştır.

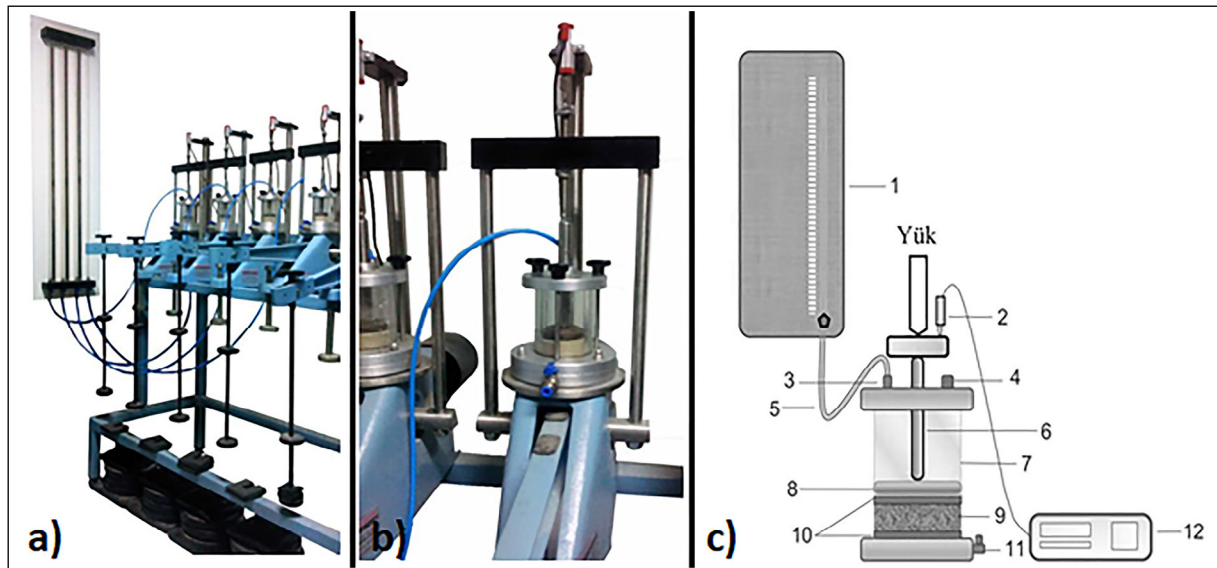
Çalışmada kullanılan zeminlerin indeks özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

3. Yöntem

3.1. Numune Hazırlama

Zemin numunelerinin her biri önce 40 numaralı elekten elenmiştir. Daha sonra numuneler LL ve PL değerleri arasında bir su muhtevasında (daha çok LL'e yakın su içeriğinde) homojen hale gelinceye kadar iyice karıştırılıp çapı 50 mm ve yüksekliği 20 mm olan ringlere doldurulmuştur. Bu ringler numune hazırlama santrifüj cihazı için özel olarak tasarlanmış hücrelere yerleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılan zemin numuneleri Balcı vd. (2018) çalışmasında kullanılan zemin numunesi hazırlama prosedürlerine göre laboratuvar ortamında konsolide edilerek hazırlanmıştır. Her bir zemin, zemin numunesi hazırlama santrifüjünde 6 saat süreyle 6 farklı önkonsolidasyon gerilmesine maruz bırakılıp toplamda 72 adet farklı yapay zemin numunesi elde edilmiştir. Her bir zemin numunesinden de 2 adet hazırlanarak deneyler toplamda 144 zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlama sırasında zemin numunesi hazırlama santrifüjünde artırılarak uygulanan DDS değerlerinin numunelerin sıkışması üzerine etkisi Şekil 2'de ve Çizelge 4'de görülmektedir. Numune hazırlamada



Şekil 1- Kombine düzeneğin detayları; a) genel görünüm, b) ödometre deney düzeneği üzerindeki yakından görünümü ve c) şematik gösterim (ölçeksiz): 1) su göstergesi, 2) deformasyon ölçer, 3) su giriş vanası, 4) hava alma vanası, 5) şeffaf hortum 6) yükleme pistonu, 7) pleksiglas hücre, 8) yükleme başlığı, 9) zemin numunesi, 10) poroz taş, 11) su çıkış vanası, 12) veri toplayıcı.

Çizelge 3- Test edilen zemin numunelerinin indeks özellikleri.

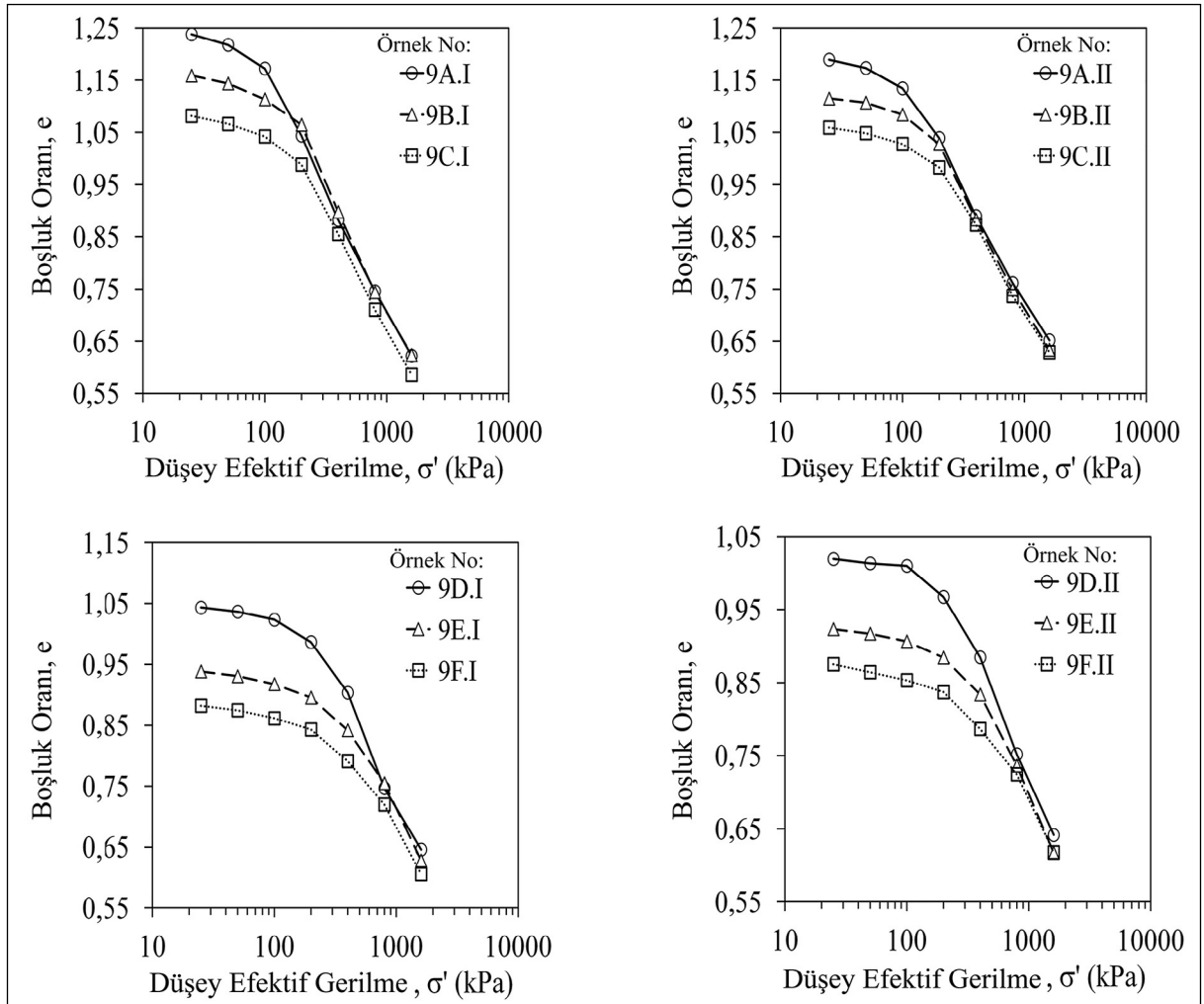
Örnek Numarası	SL	PL	LL	PI	USCS	G _s
1	17,2	19,6	38,0	18,4	CL	2,69
2	13,6	29,8	48,2	18,4	ML	2,73
3	14,8	28,0	53,2	25,2	CH	2,80
4	26,1	33,0	69,0	36,0	CH	2,78
5	13,8	22,0	59,7	37,7	CH	2,96
6	14,8	35,6	74,1	38,5	MH	2,60
7	18,9	27,5	67,0	39,5	CH	2,84
8	15,1	21,0	64,6	43,6	CH	2,65
9	11,4	20,0	64,4	44,4	CH	2,65
10	22,7	37,0	82,0	45,0	CH	2,77
11	20,9	37,0	87,0	50,0	CH	2,71
12	19,7	37,0	92,0	55,0	CH	2,70

SL: Büzülme Limiti, PL: Plastik Limit, LL: Likit Limit, PI: Plastisite İndeksi, USCS: Birleşik Zemin Sınıflama Sistemi, G_s: Özgül Ağırlık.

kullanılan DDS değerlerinin artmasıyla numunelerin boşluk oranlarının azaldığı görülmektedir. DDS değerlerindeki artışın sıkışma derecesinde de artışa sebep olduğu tespit edilmiştir.

3.2. Permeabilite-Konsolidasyon Deneyi

Permeabilite-konsolidasyon deneylerinde, düşen seviyeli permeabilite deneyinin ilkeleri uygulanarak



Şekil 2- Geleneksel ödometre deneylerinden elde edilen e-σ' eğrileri.

Çizelge 4- Geleneksel 1-B ödometre deneylerinden elde edilen $e-\sigma'$ değerleri.

Örnek Numarası	DDS	σ' (kPa)						
		25	50	100	200	400	800	1600
					e			
9A.I	500	1,24	1,22	1,17	1,04	0,88	0,75	0,62
9B.I	600	1,16	1,14	1,11	1,06	0,90	0,74	0,62
9C.I	700	1,08	1,07	1,04	0,99	0,86	0,71	0,59
9D.I	800	1,04	1,04	1,02	0,99	0,90	0,75	0,65
9E.I	900	0,94	0,93	0,92	0,90	0,84	0,75	0,63
9F.I	1000	0,88	0,87	0,86	0,84	0,79	0,72	0,61
9A.II	500	1,19	1,17	1,13	1,04	0,89	0,76	0,65
9B.II	600	1,12	1,11	1,08	1,03	0,88	0,75	0,63
9C.II	700	1,06	1,05	1,03	0,98	0,87	0,74	0,63
9D.II	800	1,02	1,01	1,01	0,97	0,88	0,75	0,64
9E.II	900	0,92	0,92	0,91	0,88	0,83	0,74	0,62
9F.II	1000	0,88	0,86	0,85	0,84	0,79	0,72	0,62

DDS: dakikadaki dönüş sayısı, σ' : efektif gerilme, e: boşluk oranı.

permeabilite katsayısı (k) değerleri elde edilmiştir. Permeabilite-konsolidasyon deneyinin geleneksel tek yönlü konsolidasyon deneyine göre farkı, permeabilite ve konsolidasyon deneylerinin birlikte ve aynı hücrelerde yapılıyor olmasıdır. Permeabilite-konsolidasyon deneyleri konsolidasyon aşaması ve permeabilite aşaması olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Birinci aşama olan konsolidasyon aşamasında; kombine düzenek yükleme ünitesine yerleştirdikten sonra, deneye tabi tutulan zemin numunesinin tamamen doymuş hale gelmesi için üst seviyesinden 1cm yukarısına kadar suyla doldurulmuş ve 1 gün boyunca şişme etkisini kontrol etmek için bekletilmiştir. Numune şişmeye maruz kaldıktan sonra üzerindeki yük kontrollü bir şekilde artırılarak şişmesine izin verilmemiştir. Yükleme işlemi konvansiyonel ödometre ünitesinde yapılmıştır. Uygulanan yük, yükleme pistonu vasıtası ile numuneye aktarılmış, gelişen deformasyon miktarı piston üzerinde bulunan deformasyon ölçeği vasıtası ile veri toplayıcıya aktarılıp kaydedilmiştir. Yükleme işlemi geleneksel bir boyutlu konsolidasyon deneylerinde olduğu gibi ASTM D2435 / D2435M-11 (2020)'e göre yapılmıştır.

İkinci aşama olan permeabilite aşamasında ise ilk başta yükleme kolu destekleyici vidalarla sabitlenerek yüklemenin devam etmesi engellenmiştir. Daha sonra kombine düzeneğinin boş kısmı su ile doldurulup hortum vasıtası ile su gösterge panosuna bağlanılmıştır. Su ile dolu hortum, hücrenin üst kısmında bulunan su giriş vanasına bağlanarak su akımı sağlanmıştır. Hortumun diğer tarafı permeabilite deneyi boyunca

suyun hidrolik seviyesinin düşümünü göstermek için su gösterge panosuna bağlanmıştır. Deneyi başlatmadan önce hücrenin üst kısmında bulunan hava vanası yardımıyla hortumda ve hücrede kalan hava kabarcıkları dışarı çıkartılmıştır. Permeabilite işlemine bir gün süreyle devam edilmiştir. Bu süreçte hidrolik gradyanın 20 ile 30 aralığında olması için özen gösterilmiştir. Sonraki yük aşamalarında yükleme kolu sabit durumundan çıkarılıp, aynı işlemler tekrar edilerek deneye devam edilmiştir. Her permeabilite deneyin başında ve sonunda hortumdaki su seviyesi zamana göre kaydedilerek permeabilite katsayısı hesaplanmıştır. Deney bittikten sonra numune hücreden çıkartılarak doymuş ve kuru birim ağırlıkları belirlenmiştir.

Permeabilite-konsolidasyon deneyinden elde edilen sonuçlar: farklı yüklemelerdeki oturma miktarlarını, permeabilite sürecinde su seviyesinin düşümünü ve farklı yüklemelerde elde edilen zaman içindeki deformasyonları kapsamaktadır. Geleneksel bir boyutlu konsolidasyon deneylerinden Taylor Karekök Zaman Yöntemi ile elde edilen c_v değerleri kombine düzenek kullanılarak yapılan permeabilite-konsolidasyon deneylerinden Terzaghi yöntemi ile elde edilen c_v değerleri ile karşılaştırılmıştır.

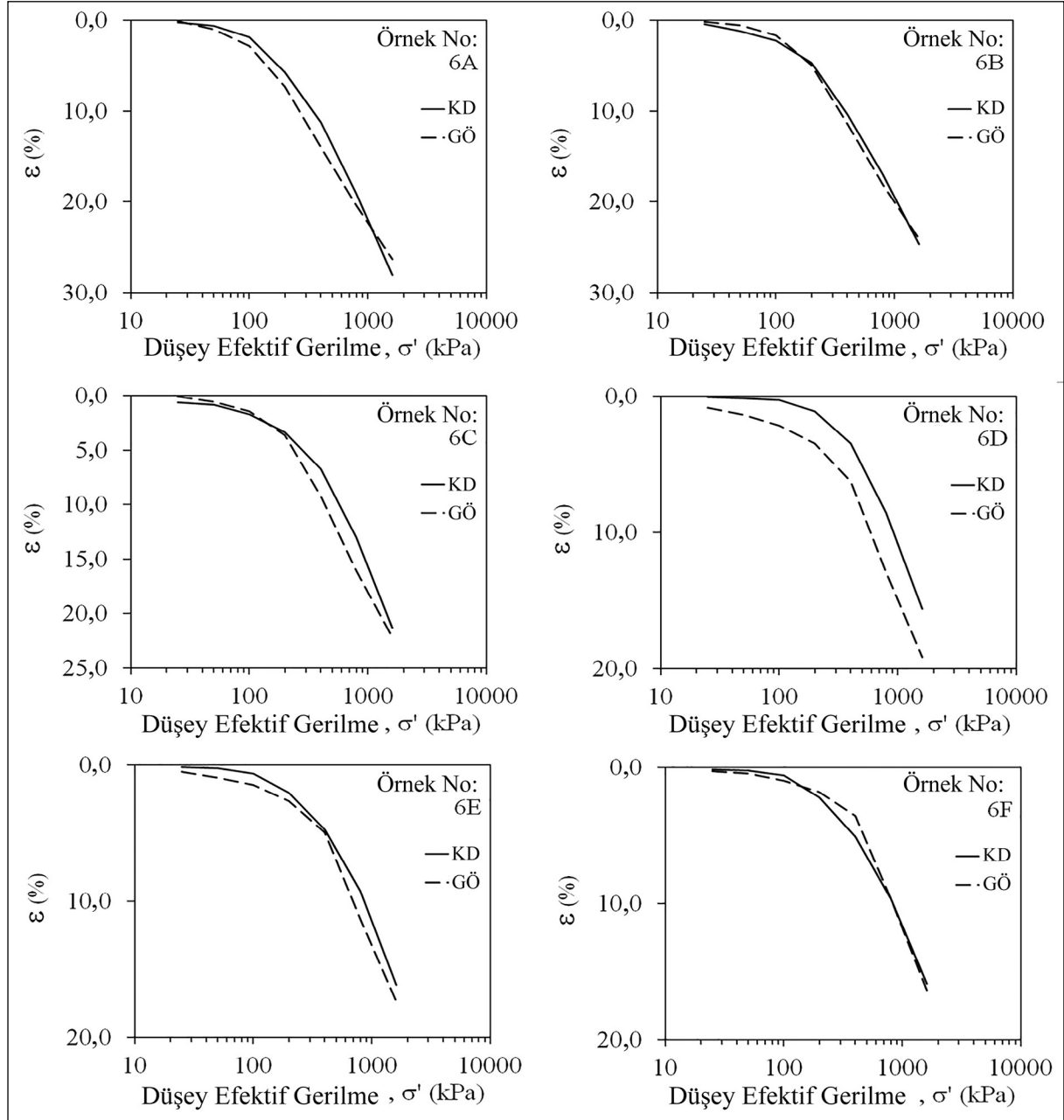
4. Deneysel Sonuçlar

Kombine düzeneğinden permeabilite-konsolidasyon deneyleri ile elde edilen $\varepsilon-\sigma'$ grafikleri ile geleneksel 1B ödometre deneylerinden elde edilen $\varepsilon-\sigma'$ grafikleri arasındaki karşılaştırma Şekil 3'te ve Çizelge 5'te verilmiştir. Farklı yükleme kademelerinde kombine

düzenek ile konvansiyonel ödometrede yapılan deneylerin sonuçları arasında oldukça iyi bir benzerlik görülmektedir. c_v değerlerinin, kombine düzeneğin tasarımındaki farklılıklardan ve deneyin yükleme kademelerindeki değişiklerden ciddi bir şekilde etkilenmediği görülmektedir. Bu yüzden c_v 'nin bulunmasında kullanılan eğri uyarlama yöntemlerinin, permeabilite-konsolidasyon deneylerinde farklı yükleme kademelerinden elde edilen zaman-

deformasyon eğrileri için de kullanılabilir oldukları düşünlmektedir.

Kombine düzenek kullanılarak elde edilen k değerleri ile geleneksel 1B deneylerden Taylor Karekök Zaman(t_{90}) yöntemi ile elde edilen k değerlerinin her bir yükleme kademesine göre değişimi Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Düşük yük seviyelerinde sonuçlar arasındaki farklılıkların



Şekil 3- Geleneksel düzenekten ve kombine düzenekten elde edilen ε - σ' eğrilerinin karşılaştırılması (KD: kombine düzenek, GÖ: geleneksel 1B ödometre).

Çizelge 5- Geleneksel 1B ödometre deneylerinden (GY) ve kombine düzenek (KD) deneylerinden elde edilen konsolidasyon parametreleri.

Örnek Numarası	DDS	GY			KD		
		C _r	C _c	σ' _p (kPa)	C _r	C _c	σ' _p (kPa)
6A.I	500	0,072	0,45	130	0,055	0,40	120
6B.I	600	0,021	0,37	180	0,035	0,41	250
6C.I	700	0,039	0,32	200	0,030	0,35	270
6D.I	800	0,036	0,46	330	0,021	0,34	350
6E.I	900	0,030	0,51	390	0,020	0,29	420
6F.I	1000	0,013	0,44	400	0,013	0,29	400
6A.II	500	0,062	0,50	140	0,044	0,45	140
6B.II	600	0,030	0,48	180	0,052	0,34	200
6C.II	700	0,037	0,49	200	0,035	0,36	290
6D.II	800	0,037	0,44	380	0,029	0,34	350
6E.II	900	0,030	0,49	400	0,028	0,43	440
6F.II	1000	0,015	0,48	420	0,010	0,45	400
9A.I	500	0,066	0,47	100	0,029	0,41	160
9B.I	600	0,050	0,35	180	0,019	0,37	240
9C.I	700	0,050	0,31	190	0,009	0,35	340
9D.I	800	0,023	0,20	240	0,009	0,37	355
9E.I	900	0,025	0,12	400	0,002	0,24	480
9F.I	1000	0,024	0,12	450	0,006	0,23	300
9A.II	500	0,053	0,39	100	0,030	0,39	140
9B.II	600	0,027	0,41	180	0,031	0,38	200
9C.II	700	0,034	0,40	190	0,002	0,34	260
9D.II	800	0,020	0,40	220	0,012	0,34	320
9E.II	900	0,021	0,35	450	0,009	0,28	340
9F.II	1000	0,035	0,28	500	0,012	0,28	300

DDS: dakikadaki dönüş sayısı, C_r: yeniden sıkışma indeksi, C_c: sıkışma indeksi, σ'_p: önkonsolidasyon gerilmesi.

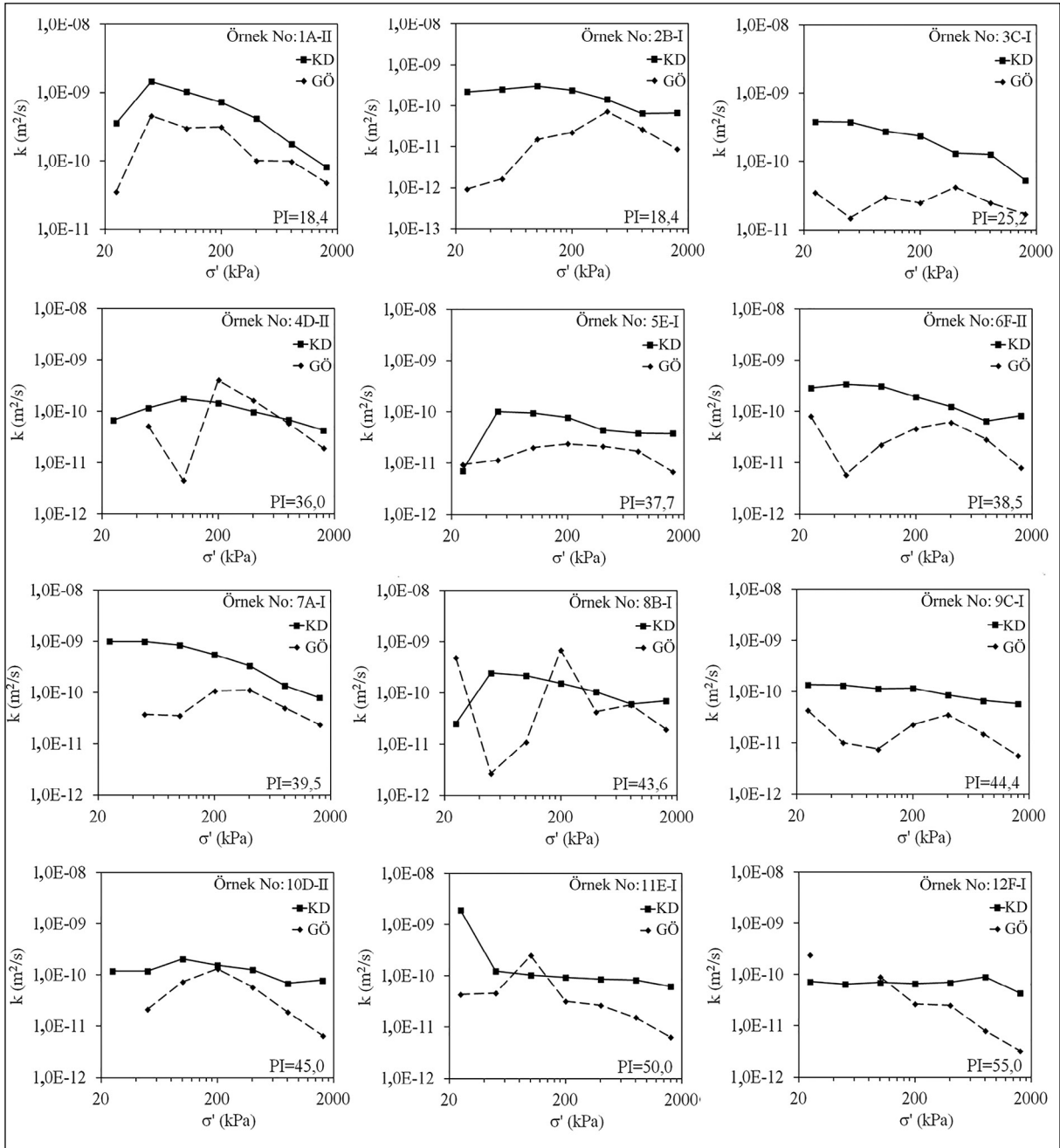
fazla olduğu görülmektedir. Sonuçlar arasındaki farklılıkların plastisiteyle ilişkili olduğu, yüksek plastisiteli numunelerde bu farkın daha az olduğu görülmektedir.

Kombine düzenekten permeabilite-konsolidasyon ilişkisi kullanılarak elde edilen c_v değerleri ile geleneksel 1B ödometre deneylerinden Taylor karekök zaman (t₉₀) yöntemi ile elde edilen c_v değerlerinin 1:1 grafiğinde karşılaştırması Şekil 6'da verilmiştir. Yüksek yük seviyelerinde kombine düzenekten elde edilen c_v değerlerinin, Taylor t₉₀ yöntemi ile belirlenen c_v değerlerinden daha büyük olduğu açık olarak görülmektedir. Buradan yola çıkarak numunelerin e değerleri, SL değerleri, LL değerleri ve k değerleri arasında regresyon katsayısı 0,66 olan aşağıdaki ilişki geliştirilmiştir. Yapılan regresyon analizinin detayları Çizelge 6'da verilmiştir.

$$k \text{ (m/s)} = \exp(0,113 \text{ SL} - 0,084 \text{ LL} + 3,792 \text{ e} - 23,154) \quad (3)$$

Zemin numunelerinin kombine düzenek kullanılarak belirlenen k değerleri ile önerilen yeni ampirik ilişki ile belirlenen k değerleri arasındaki karşılaştırma 1:1 grafiğinde Şekil 7'de gösterilmiştir. Dağılıma bakıldığında elde edilen sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu söylemek mümkündür.

Kombine düzenek kullanılarak elde edilen k değerlerinden hesaplanan c_v değerleri ile yeni geliştirilen ampirik ilişkiden hesaplanan k değerleri kullanılarak belirlenen c_v değerleri Şekil 8'de karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemden elde edilen c_v değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 9'da k değerleri kullanılarak ampirik eşitlikten hesaplanan c_v değerleri ile Taylor t₉₀ yönteminden elde edilen c_v değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

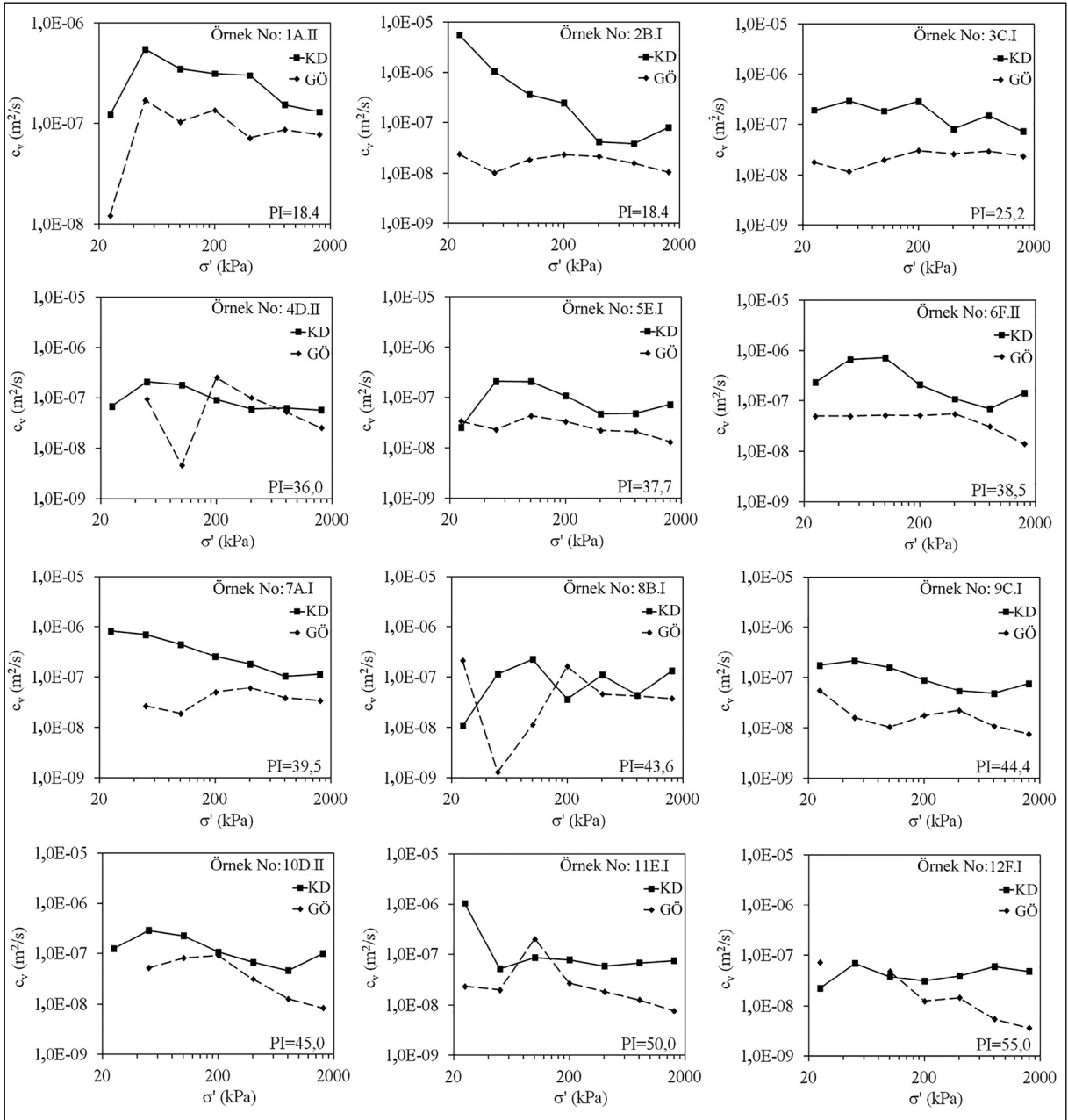


Şekil 4- Yük artışıyla birlikte k değerlerindeki değişim (KD: kombine düzenek, GÖ: geleneksel 1B ödometre).

Her iki yöntemle belirlenen değerler arasında yüksek saçılım gözlenmiştir. Kombine düzenek kullanılarak geliştirilen Eş. (3)'deki ampirik denklemden hesaplanan c_v değerleri ile zeminlerin indeks özelliklerini içeren farklı parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Regresyon analizi sonucunda c_v ile m_v ve LL arasında regresyon katsayısı (R^2) 0,96 olan aşağıda verilen Eş. (4) denklemi önerilmiştir. Yapılan regresyon analizinin detayları Çizelge 7'de verilmiştir.

$$c_v \text{ (m}^2\text{/s)} = (1,5)(10^{-10}) / (LL^{1,053})(m_v^{1,247}) \quad (4)$$

Eşitlik (3)'ten hesaplanan c_v değerleri ile Eşitlik (4)'ten hesaplanan c_v değerlerinin karşılaştırılması Şekil 10'da gösterilmiştir. İki yaklaşımdan elde edilen c_v değerleri arasında güçlü bir korelasyon olduğu görülmektedir. Eş. (4)'den hesaplanan c_v değerleri ile Taylor karekök zaman (t_{90}) yönteminden elde edilen c_v değerleri arasındaki karşılaştırma Şekil 11'de verilmiştir. Sonuçlar arasında iyi bir



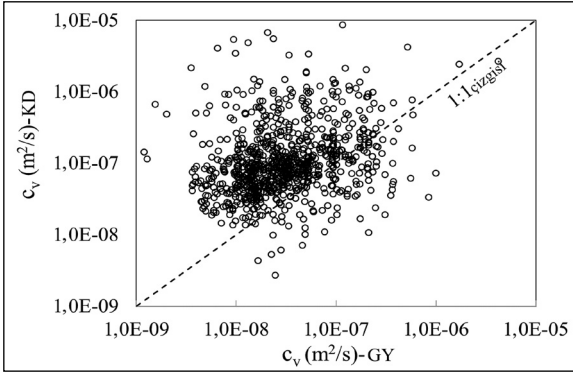
Şekil 5- Yük artışıyla birlikte c_v değerlerindeki değişim(KD: kombine düzenek, GÖ: geleneksel 1B ödometre).

korelasyon olmadığı görülmektedir. Bunun sebebinin laboratuvarında hazırlanan numunelerin oldukça yüksek plastisiteye sahip olmalarına karşın, arazideki numunelerin plastiklik derecelerine göre plastisite bakımından daha dar bir aralığı temsil etmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

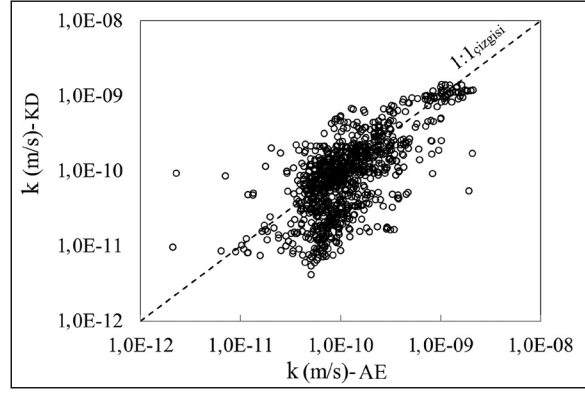
5. Tartışma

Kombine düzenek kullanılarak yapılan permeabilite-konsolidasyon deneylerinden elde edilen

c_v değerlerinin, geleneksel 1B ödometre deneylerinden Taylor t_{90} yöntemi ile elde edilen c_v değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun yanında, özellikle yüksek plastiklik derecesine sahip zemin numunelerinde her iki deney yöntemi ile belirlenen c_v değerleri arasındaki farkın daha da belirgin olduğunu söylemek mümkündür. Taylor t_{90} yönteminin uygulamasında yüksek plastiklik derecelerine sahip numunelerde düşük plastiklik derecelerine sahip numunelere göre daha istikrarlı sonuçların alındığı düşünülmektedir. Her iki deney yönteminin



Şekil 6- Geleneksel 1B ödometre deneylerinden elde edilen c_v değerleri ile kombine düzeneden elde edilen c_v değerlerinin karşılaştırılması (GY: geleneksel ödometre yöntemi, KD: kombine düzener).



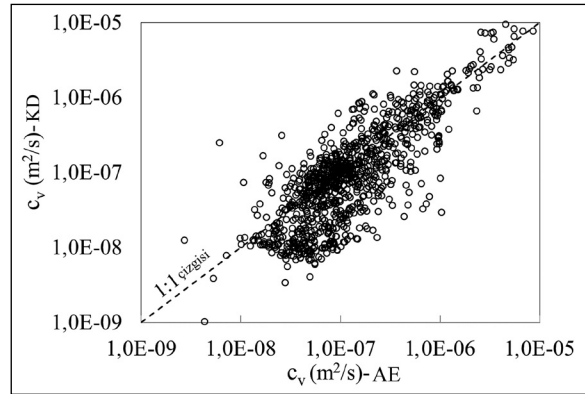
Şekil 7- Ampirik eşitlikten elde edilen k değerleri ile kombine düzeneden elde edilen k değerlerinin karşılaştırılması (AE: ampirik eşitlik, KD: kombine düzener).

Çizelge 6- Eşitlik (3)'e ait regresyon analizi detayları.

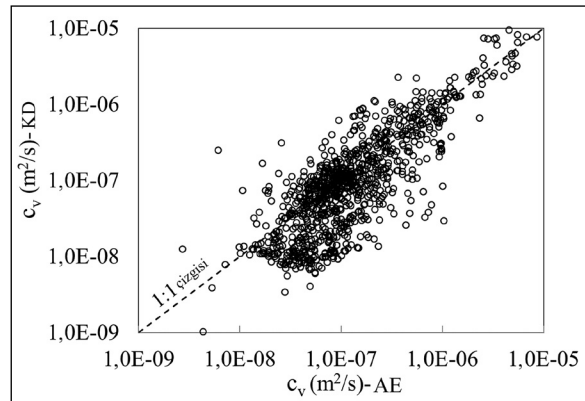
Eşitlik	$k \text{ (m/s)} = \exp(0,113 \text{ SL} - 0,084 \text{ LL} + 3,792 \text{ e} - 23,154)$
Model Tanımı	$Y = \exp(ax1+bx2+cx3+d)$
Gözlem Sayısı	991
Çözüm Türü	Doğrusal Olmayan
Doğrusal Olmayan İterasyon Limiti	250
Yapılan Doğrusal Olmayan İterasyon Sayısı	10
Artık Tolerans	1E-10
Artık Toplamı	2,30E+06
Ortalama Artık	2,32E+03
Artık Kareler Toplamı (Mutlak)	2,95E-03
Artık Kareler Toplamı (Bağıl)	2,95E-03
Tahminin Standart Hatası	1,73E+03
Belirlilik Katsayısı (R^2)	0,658620984
Durbin-Watson istatistiği	1,040230
Güven Aralığı	%99
F Oranı	634,738

sonuçlarının diğer eğri uyarlama yöntemleriyle (log t_{50} , maksimum eğim, hesaplama, dikdörtgen hiperbol, $\delta t-t/\delta t$, erken evre log-t, dönüm noktası, $\sqrt{t60}$, SRS) de değerlendirilmesi önerilmektedir.

Yüksek yüklenme kademelerinde kombine düzeneden permeabilite-konsolidasyon ilişkisi ile elde edilen ve geleneksel 1B ödometre deneylerinden Taylor t_{90} yöntemi gibi eğri uyarlama yöntemi ile elde edilen konsolidasyon katsayıları arasında değişikliğin önemli bir nedeninin; Taylor t_{90} yönteminin zemindeki boşluk oranındaki değişiklikleri göz önüne almayı, sadece numunenin sıkışması ve boy kışalmasını



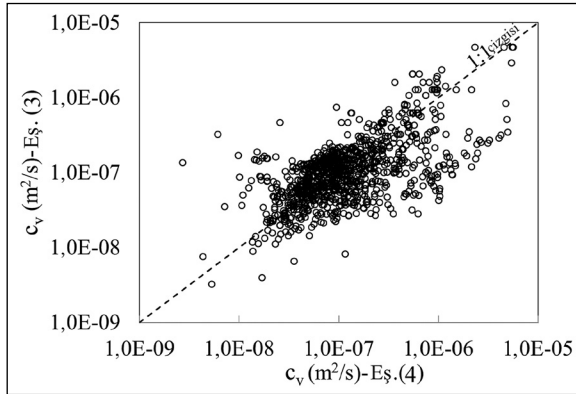
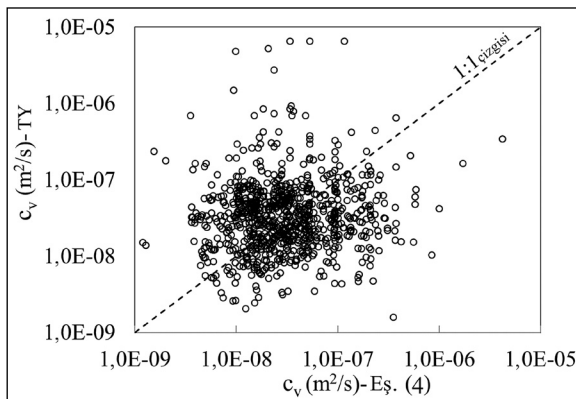
Şekil 8- Ampirik eşitlikle belirlenen c_v değerleri ile kombine düzeneden belirlenen c_v değerlerinin karşılaştırılması (AE: ampirik eşitlik, KD: kombine düzener).



Şekil 9- Taylor t_{90} yönteminden belirlenen hesaplanmış c_v değerleri ile kombine düzeneden belirlenen hesaplanmış c_v değerlerinin karşılaştırılması (AE: ampirik eşitlik, KD: kombine düzener).

Çizelge 7- Eşitlik (4)'e ait regresyon analizi detayları.

Eşitlik	$c_v \text{ (m}^2\text{/s)} = (1,5) (10^{-10}) / (LL^{1,053}) (m_v^{1,247})$
Model Tanımı	$Y = ax^{1^b}x^{2^c}$
Gözlem Sayısı	976
Çözüm Türü	Doğrusal Olmayan
Doğrusal Olmayan İterasyon Limiti	250
Yapılan Doğrusal Olmayan İterasyon Sayısı	250
Artık Tolerans	1E-10
Artık Toplamı	1,76E+10
Ortalama Artık	1,80E+07
Artık Kareler Toplamı (Mutlak)	3,36E+04
Artık Kareler Toplamı (Bağıl)	3,36E+04
Tahminin Standart Hatası	5,88E+07
Belirlilik Katsayısı	0,956013
Durbin-Watson istatistiği	0,968071
Güven Aralığı	%99
F Oranı	10,5736

Şekil 10- Eşitlik.(3)'ten hesaplanan c_v değerleri ile Eşitlik (4)'ten hesaplanan c_v değerlerinin karşılaştırılması.Şekil 11- Eşitlik (4)'ten hesaplanan c_v değerleri ile Taylor t_{90} yönteminden belirlenen c_v değerlerinin karşılaştırılması (Eş (4): Eşitlik 4, TY: Taylor t_{90} yöntemi).

dikkate alması olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden ikincil sıkışmanın etkili olduğu yüksek yüklemeye kademelerinde Taylor t_{90} yöntemi ile hesaplanan c_v değerleri, gerçek c_v değerlerine göre daha küçük olarak bulunmuş ve kombine düzenekten elde edilen c_v değerleri ile arasındaki fark daha da belirginleşmiştir.

Permeabilite-konsolidasyon ilişkisinden elde edilen c_v değerleri ile Taylor t_{90} yönteminden bulunan c_v değerleri arasında yüksek yük seviyelerindeki farklılıkların, ikincil sıkışmadan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmanın sonuçlarından yola çıkarak yüksek yük kademelerinde yapılan ödometre deneylerinden elde edilen c_v 'nin, permeabilite-konsolidasyon ilişkisinden elde edilen c_v ile karşılaştırılması ve ikincil sıkışmanın c_v 'ye olan etkilerinin araştırılması önerilir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada kullanılan zeminler için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Her iki deney yöntemi arasındaki ilişkiden yola çıkarak; bu çalışma için özel olarak geliştirilmiş kombine düzenekten elde edilen c_v değerlerinin, geleneksel IB ödometre deneylerinden elde edilen c_v değerleri ile karşılaştırılabilir nitelikte olduğu görülmüştür. Kombine düzenekten konsolidasyon-permeabilite ilişkisi ve eğri uyarlama yöntemleriyle c_v 'nin tanımlanabilmesi, geleneksel yöntemden elde edilen sonuçlara da karşılaştırılabilir nitelikte olması bu düzeneğin kullanılabilirliği açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Permeabilite ile zeminlerin indeks özellikleri arasındaki ilişki regresyon analizleriyle değerlendirilerek SL-LL-e arasında $R^2=0,66$ olan aşağıdaki ilişki önerilmiştir:

$$k \text{ (m/s)} = \exp(0,113 \text{ SL} - 0,084 \text{ LL} + 3,792 \text{ e} - 23,154) \quad (3)$$

Önerilen ampirik ilişki ile belirlenen k , deney yolu ile tanımlanan m_v ile birlikte Terzaghi'nin permeabilite-konsolidasyon ilişkisinde kullanılarak c_v 'nin hesaplanabilmesi mümkündür. c_v değerleri (permeabilite-konsolidasyon ilişkisinden hesaplanan) ile zeminin indeks özellikleri (e ve m_v) gibi farklı parametreler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Regresyon analizleri sonucunda c_v ile m_v -LL arasında aşağıda verilen regresyon katsayısı (R^2) 0,96 olan bağıntı önerilmiştir.

$$c_v \text{ (m}^2\text{/s)} = (1,5)(10^{-10}) / (LL^{1,053})(m_v^{1,247}) \quad (4)$$

Geleneksel 1B konsolidasyon deneylerinden Taylor t_{90} yöntemi ile tanımlanan c_v değerlerinde yüksek plastisite değerlerine sahip numunelerde yük artışıyla beraber azalma tespit edilirken, düşük plastisite değerlerine sahip numunelerde c_v değerlerinde düzenli bir davranış gözlenmemiştir. Buna karşın kombine düzenden permeabilite-konsolidasyon deneyleri ile elde c_v değerlerinde; genel olarak ilk yükleme kademelerinde yük artışıyla beraber azalma, sonraki yüksek yükleme kademelerinde ise yük artışıyla beraber artma görülmüştür.

Düşük plastisite derecelerine sahip zemin numunelerinde, kombine düzener kullanılarak permeabilite-konsolidasyon ilişkisinden elde edilen c_v değerlerinin Taylor t_{90} yönteminden elde edilen c_v değerlerine göre daha az saçılım gösterdiği net bir şekilde görülmüştür.

Değerlenen Belgeler

- Al-Ameri, A. F., Al-Tae, A. Y. 2011. Estimation of relationship between coefficient of consolidation and liquid limit of middle and south Iraqi soils. *Journal of Engineering* 17(3), 430-440.
- Al-Zoubi, M. S. 2004. Coefficient of Consolidation (v_c) from The Linear Segment of the $t_p - \delta$ Curve. *Proceedings of the International Engineering Conference at Mutah University*, 26-29.
- Al-Zoubi, M. S. 2010. Consolidation analysis using the settlement rate-settlement (SRS) method. *Applied Clay Science* 50, 34-40.
- Balcı, M. C., Kayabali, K., Asadi, R. 2018. Miniature centrifuge modeling for conventional consolidation test. *Geotechnical Testing Journal* 41(3), 590-600.
- Carrier, W. D. 1985. Consolidation parameters derived from index tests. *Geotechnique* 35(2), 211-213.
- Casagrande, A., Fadum, R. E. 1940. Notes on Soil Testing for Engineering Purposes, Harvard University Graduate School of Engineering Publications.
- Chow, J. K., Wang, Y. H., Lui, H. L., Huang, E. 2020. Determination of consolidation parameters based on the excess pore water pressure measurement using a newly developed U-oedometer. *Acta Geotechnica* 15, 2665-2680.
- Cortellazzo, G. 2002. Comparison between laboratory and in situ values of the coefficient of primary consolidation c_v . *Canadian Geotechnical Journal* 39(1), 103-110.
- Feng, T. W., Lee, Y. J. 2001. Coefficient of consolidation from the linear segment of the $t/2$ curve. *Canadian Geotechnical Journal* 38(4), 901-909.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C. 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall, 733.
- Lovisa, J., Sivakugan, N. 2013. An in-depth comparison of c_v values determined using common curve-fitting techniques. *Geotechnical Testing Journal* 36(1), 30-39.
- Mesri, G., Feng, T. W., Shahien, M. 1999. Coefficient of consolidation by inflection point method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125(8), 717-718.
- Narasimha, R. P., Pandian, N. S., Nagaraj, T. S. 1995. Analysis and estimation of the coefficient of consolidation. *Geotechnical Testing Journal* 18(2), 252-258.
- Nguyen, M. D., Pham, B. T., Tuyen, T. T., Yen, H., Phan, H., Prakash, I., Dou, J. 2019. Development of an artificial intelligence approach for prediction of consolidation coefficient of soft soil: a sensitivity analysis. *The Open Construction and Building Technology Journal* 13(1).
- Olek, B. S., Pilecka, E. 2019. Large-scale Rowe cell experimental study on coefficient of consolidation of coal mine tailings. *E3S Web of Conferences* 2019.
- Olson, Roy E. 1986. State of the art: consolidation testing. *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*. ASTM International.
- Robinson, R., Allam, M. 1996. Determination of coefficient of consolidation from the early stage of $\log t$ plot. *Geotechnical Testing Journal* 19(3), 316-320.
- Sivaram, B., Swamee, P. 1977. A computational method for consolidation-coefficient. *Soils and Foundations* 17(2), 48-52.
- Solanki, C. H., Desai, M. D. 2008. Role of Atterberg limits on time rate settlement of alluvial deposits. *Journal of Engineering and Technology, Sardar Patel University* 21, 12-15.
- Sridharan A., Prakash, K. 1993. $\delta-t/\delta$ Method for the determination of coefficient of consolidation. *Geotechnical Testing Journal* 16(1), 131-134.
- Sridharan, A., Prakash, K. 1995. Critical Appraisal of Laboratory Determination of C_v . *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, 561-572.

- Sridharan, A., Nagaraj H. B. 2004. Coefficient of consolidation and its correlation with index properties of remolded soils. *Geotechnical Testing Journal* 27(5), 469-474.
- Sridharan, A., Murthy, N. S., Prakash, K. 1987. Rectangular hyperbola method of consolidation analysis. *Geotechnique* 37(3), 355-368.
- Sridharan, A., Prakash, K., Asha, S. R. 1995. Consolidation behavior of soils. *Geotechnical Testing Journal* 18(1), 58-68.
- Su, H. L. 1958. Procedure for rapid consolidation test. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 84(3), 1729-1.
- Taylor, D. W. 1948. *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley and Sons Inc., 711.
- Terzaghi, K. A. R. L. 1925. Principles of soil mechanics, *Engineering News - Record* 95, 19-32.
- Vinod, J. S., Sridharan, A. 2015. Laboratory determination of coefficient of consolidation from pore water pressure measurement, *Géotechnique Letters* 5(4), 294-298.