

SİLTLERİN BOŞLUK BOYUTU DAĞILIMI VE RADYAL KONSOLIDASYON ÖZELLİĞİNİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNE ETKİSİ

Aşkın ÖZOCAK*, Mehmet TAPAN**

*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, 54187, Sakarya

**Teknik Sistem Yapı Denetim, İstanbul

aozocak@sakarya.edu.tr, mehmettapan83@hotmail.com

(Geliş/Received: 29.08.2012; Kabul/Accepted: 21.11.2013)

ÖZET

1999 Marmara depremini izleyen yoğun çalışmalar sonucunda siltli zeminlerin sıvılaşabilirliği konusunda Adapazarı kriteri olarak isimlendirilen yeni bir yöntem ortaya konulmuştur. Bu çalışmada ince daneli zeminlerin sıvılaşabilirliği üzerinde boşluk dağılımının ve sönümlenme karakteristiklerinin etkisinin anlaşılması hedeflenmiştir. Yeniden yapılandırılmış 16 farklı karışımın zemin-su karakteristik eğrileri basınç plakası ve filtre kağıdı yöntemleriyle belirlenerek buradan numunelerin boşluk boyutu dağılımları elde edilmiştir. Numunelerin sönümlenme karakteristikleri laboratuvarında hidrolik hücre yardımıyla ölçülmüş, radyal konsolidasyon karakteristikleri hücre duvarına yerleştirilen piyezometreler vasıtasıyla belirlenmiştir. Sonuçlar sıvılaşan ve sıvılaşmayan numunelerin boşluk boyutu dağılım eğrilerinin birbirinden ayrıldığını göstermektedir. Ortalama boşluk boyutu (r_{50}) 0,0004 mm'den küçük olan numunelerin sıvılaşmaya karşı dirençli oldukları görülmüştür. Sıvılaşan ve sıvılaşmayan bölgeleri birbirinden ayıran bir limit eğrinin geliştirilmesi mümkün olmuştur. Bunun yanında %10 kil oranında ortalama radyal konsolidasyon değerinin 10 m²/yıl civarında olduğunu söylemek mümkündür. Hem Adapazarı kriteri hem de dinamik deneylere göre sıvılaşma potansiyeli taşıyan kil oranı %10'dan küçük olan numuneler yumuşakça azalan parabolik bir eğri tipi gibi benzer bir sönümlenme davranışı göstermektedir. %10'dan daha fazla kil oranına sahip numunelerin sönümlenme eğrileri dikkat çekici bir şekilde drenaj vanasının açılmasıyla birlikte sert ve ani bir düşüş yapan boşluk suyu basıncı değerinin hemen sonrasında yüklemeye esnasında aldığı en büyük değeri aşmayacak büyüklükte artmakta ve daha sonra yine parabolik yumuşak bir eğri şeklinde azalmaktadır. Buna göre, laboratuvar sönümlenme eğrisi başlangıç kısmında boşluk suyu basıncı değerinde artış görülen zeminlerin sıvılaşma potansiyeli taşımayacakları görüşü ortaya çıkmaktadır.

Anahtar kelimeler:Silt, sıvılaşma, SWCC (zemin-su karakteristik eğrisi), boşluk geometrisi, laboratuvar sönümlenme deneyi, radyal konsolidasyon

THE INFLUENCE OF PORE SIZE DISTRIBUTION AND RADIAL CONSOLIDATION PROPERTIES ON THE LIQUEFACTION POTENTIAL OF SILTS

ABSTRACT

From the work done following the 1999 earthquakes, a new method called The Adapazarı Criteria has been proposed. A study to understand the contribution of the pores thus hydraulic conductivity and dissipation characteristics, on liquefiability of fine grained soils was attempted. The soil water characteristic curves for 16 reconstituted silty soils have been prepared by the pressure plate and filter paper methods than pore size distribution of the samples have been determined. Dissipation characteristics of samples have been measured with a hydraulic cell at laboratory and radial consolidation characteristics have been also measured in the process by means of piezometers embedded in the cell wall. The results show that pore size distribution curves for liquefiable and non-liquefiable samples are significantly different. It is found that those samples with average pore size of $r_{50} < 0.0004$ mm are not liquefaction prone. In addition, a limit curve has been developed that separates zones of liquefaction and non-liquefaction zones. Average radial consolidation coefficient values at

10% clay ratio can be said to be around 10 m²/year. Soil samples have liquefaction potential according to Adapazarı Criteria and dynamic tests which have less than 10% clay content, exhibit similar dissipation curves as a soft parabolic decreasing type curves. Dissipation curves of samples which have more than 10% clay content, make a sudden drop after the pore water pressure valf is opened then the curves rise but not to exceed the maximum value at the initial loading phase and decreases like a soft parabolic curve again. Upward trend that does not have the potential liquefaction of the samples with initial curve is fading.

Keywords:Silt, liquefaction, SWCC, pore geometry, laboratory dissipation tests, radial consolidation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kumlara özgü olduğu düşünülen sıvılaşma olayının depremlerde elde edilen gözlem sonuçları ve araştırmalar neticesinde silt boyutundaki ince daneli zeminlerde de oluşabileceği görülmüştür. Özellikle Çin depremlerinden elde edilen deneyimler önce Çin Kriteri olarak tanıtilan özelliklerle literatüre yansımıştır [1]. Çin kriteri siltin sıvılaşmasını doğal su muhtevası, likit limit, kil yüzdesi (< 5 µm) gibi fiziksel özelliklere bağlamıştır.

Siltlerde sıvılaşmanın, kumlarda görülen kolaylıkla oluşmadığı, hatta orta ve yüksek plastisiteli siltlerde olağan deprem koşullarında ($M_w < 7$, $t < 50$ s) belki de hiç belirmediği yolunda kuşku vardır. Buna bağlı olarak da siltlerin kumsu ve kilisi olarak ayırtlanması ve sıvılaşabilir grubun daha ziyade kumsular olduğu öne sürülmüştür [2]. Daha açık bir ifade ile, kilisi siltte ve killi zeminlerde sadece çevrimsel yumuşama olası iken kumsu karışımlarda tipik sıvılaşma belirtileri ortaya çıkmaktadır. Kesin yargıya varılmayan birçok durumda da dinamik deneyler yapılması hemen tüm araştırmacılarca önerilmektedir [3].

Zemin özelliklerinin hangi koşullarda belirlendiği ve geçerliliğini koruduğunu anlamadan ve bu konuda yeterli tecrübe birikimine sahip olmadan ve ekonomik mühendislik çözümleri elde etmek mümkün olmamaktadır [4]. 1999 Marmara depremindeki arazi gözlemleri ve sonraki ölçümler geoteknik açıdan laboratuvar kent hüviyetine sahip olduğu söylenebilecek olan Adapazarı'nda yer alan fluvial siltler üzerinde Sakarya Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiş araştırmalar siltlerin sıvılaşma yeteneğinin zeminin fiziksel özellikleri ile kolayca saptanabileceği bulgularını getirmiş ve bu amaca yönelik olarak Adapazarı Kriteri'nin revize edilmiş biçimi önerilmiştir [5,6].

Adapazarı Kriterleri olarak sunulan ve siltli zeminlerin 1999 depreminde performansını yansıtan bilgiler arazide sıvılaşmış/sıvılaşmamış sitelerde yapılan gözlemler ve buralardan alınan numunelerin deneye tabi tutulması ile geliştirildiğinden, güvenilirliği yüksek olarak nitelendirilebilir. Son biçimi ile Adapazarı Kriteri'ne göre bir ince daneli zeminin sıvılaşabilmesi için;

$$I_L \geq 0.9 \text{ (} w_p \text{ ölçülemiyor ise } w_n/w_L \text{ oranı)}$$

$$w_L \leq 33$$

$$C \text{ (kil oranı)} \leq \% 10$$

$D_{50} > 0.02$ mm koşullarının tümünün sağlanması gerekmektedir.

Bu kriterde $25 < w_L < 33$ ve $10 < \% C < 15$ aralıklarında numunelerin dinamik deneylerle değerlendirilmesi önerilmiştir [5]. Adapazarı kriterlerinde plastisite indisinin yer almamasının nedeni olarak düşük plastisiteli ile sıvılaşabilir NP zeminlerde plastik limitin ölçümdeki tutarsızlıklar gösterilebilir. Bölgenin üst sınırı ise $I_p = 12$ ile gösterilmiş olup, Bray ve Sancio'nun [7] önerisi ile uyum içindedir. Ancak, bu plastisite indisi değerinin deneyle ölçülebilir en alt sınırı göstermesi nedeniyle, belki de sadece NP siltlerin sıvılaşabileceği gerçeği tartışılır olmaktadır. Farklı kaynaklarda da sıvılaşmaya bağlı yenilme gösteren siltlerin düşük plastisite özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir [8]. Bunun yanında Önalp v.d.'nin yaptığı çalışmalar [9] sönümleme eğrilerinin kullanımının siltlerde sıvılaşmanın tahmininde ümit verici gelişmeler getireceği yönünde olmuştur.

Zeminlerin boşluk boyutu dağılımı fiziksel ve mekanik özelliklerinin çoğunu önemli derecede etkilemekte ancak ölçümü için genellikle civa sokulumu gibi sıradan laboratuvarlarda bulunmayan deney düzeneklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanında zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) ise diğer birçok zemin özelliği hakkında önemli bilgiler vermesinin yanı sıra zeminin boşluk boyutu dağılımı hakkında kullanışlı veri sağlayabilmektedir. Zeminin belirlenen zemin-su karakteristik eğrisi, kapiler denklemler kullanılarak, kılcal gerilme ($u_a - u_w$) değerinden yola çıkarak sürdürülen hesap yöntemi ile dane dağılımı eğrisine benzer şekilde boşluk boyutu ve dağılımını yansıtabilmektedir;

$$(u_a - u_w) = - \frac{RT}{v_w} \ln(RH) = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (1)$$

Burada T_s yüzey gerilim değerini (72mN/m), v_w suyun molar hacmini (18×10^{-6} m³/mol), α genellikle 0 kabul edilen, boşluk suyunun ıslatma açısını, RH ise bağıl nemi göstermektedir.

Bu çalışmada siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyeli üzerinde boşluk dağılımının ve sönümleme karakteristiklerinin etkisinin ortaya konması amaçlanmıştır. Adapazarı kent merkezinden alınan kumlu killi silt numunelerin sahip olduğu kum ve kil

içeriği ayıklandıktan sonra farklı oranlarda kil eklenerek bulamaçlar hazırlanmış, numuneler düşey gerilme altında konsolide edildikten sonra basınç plakası ve filtre kağıdı yöntemleri kullanılarak su-zemin karakteristik eğrileri elde edilmiş, aynı zamanda sınıflandırma deneyleri de gerçekleştirilmiştir. SWC eğrilerinden elde edilen boşluk boyutu dağılım eğrileri kullanılarak siltli zeminlerin hem dinamik deneyler hemde Adapazarı Kriteri ile belirlenen sıvılaşma potansiyelleri yorumlanmıştır. Ayrıca laboratuvar sönümleme eğrileri oluşturulmuş ve bu eğriler yardımıyla radyal konsolidasyon katsayıları hesaplanmıştır. Radyal sönümleme eğri tiplerinin ve radyal konsolidasyon katsayılarının sıvılaşma potansiyeli açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

2.ZEMİN NUMUNELERİ ve FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ(SOIL SAMPLES and THEIR PHYSICAL PROPERTIES)

Bu çalışmada kullanılan silt numuneler, Adapazarı kent merkezinde 1999 depreminde sıvılaşmanın gözlemlendiği bölgelerden sağlanmıştır. Deneyler için hazırlanan karışımlar iki ayrı siltli zemin ve bu zeminlerden ayrılan doğal kil numunesi kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu örselenmiş zemin numunelerinin temel özellikleri Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine [10] göre aldığı simgelerle birlikte toplu olarak Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan doğal zeminlerin fiziksel özellikleri(Physical properties of natural soils used in thiswork)

	Yenikent Silti	T.Sert Silti
Sembol (USCS)	ML	ML
Renk	Açık kahve	Açık kahve
Likit Limit (w_L)	30	34
Plastik Limit (w_p)	NP	23→NP
Plastisite İndisi (I_p)	NP	7→NP
Özgül Ağırlık (G_s)	2.69	2.72
Kil Oranı (C %)	9	10
SiltOranı (M %)	69	60
Kum Oranı (S %)	22	30

Araziden gelen numune ilk olarak 40 no’lu elekten elenerek havuza alınmış, karıştırılıp çökmesi sonrası üstte kalan su ve kil karışımı santrifüj yardımıyla daha büyük bir başka havuza alınmıştır. Kili ayrıştırılmış olan numune 200 no’lu elekten yıkanarak siltin eleğin altına geçmesi sağlanmıştır. Bu işlemler 5 kez tekrarlanarak, 40°C’lik etüvde 24 saat ve sonrasında havada kurutma ile “temiz silt” elde edilmiştir [11-13]. İki adet doğal silt ve ayrıştırılan doğal kil numunesinin yanı sıra hazırlanan temiz silt ve bu kil kullanılarak farklı oranlarda hazırlanan 13 adet karışım elde edilmiştir. Numuneler likit limit değerinin 1,5

katı su içeriğinde hazırlanarak bulamaç hale getirilmiştir. Hazırlanan bulamaçlar vakum ile kaynatıldıktan sonra basınç plakası ve filtre kağıdı deneylerinde kullanılmak üzere 100 kPa gerilme altında tek boyutlu konsolidasyona tabi tutulmuşlardır (Şekil 1). Karışım numunelerinin fiziksel deney sonuçları özet olarak Tablo 2’de görülmektedir. Görüldüğü gibi kullanılan doğal numuneler ve farklı kil oranlarında hazırlanan karışımların hepsi sıvılaşma potansiyeline sahip siltler gibi ML simgesi almaktadır. K184 nolu numune doğal siltten yüzdürme ile ayrılan kil numunesi olup CH simgesine sahiptir. Tablo 2’de ayrıca ince daneli numunelerin Adapazarı Kriteri’ne göre sıvılaşma potansiyelleri incelenmiştir. Burada K184, K144, ve K112 nolu, yani kil oranı %10’un üzerinde olan numunelerin sıvılaşmaya karşı dirençli olduğu, diğerlerinin ise sıvılaşma potansiyeli taşıdığı anlaşılmaktadır.



Şekil 1. Bulamaçın konsolidasyonu (Consolidation of the slurry)

3.DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEYLER (CYCLIC TRIAXIAL TESTS-CTX)

Karışım numunelerinin sıvılaşma potansiyellerinin Adapazarı Kriteri yanında dinamik deneyler ile teyidi amacıyla dinamik üç eksenli deneyler (CTX) yapılmıştır. Bu deneyler için aynı karışımlardan Şekil 1’dekine benzer şekilde ancak boyu 100 mm’nin üzerinde olacak şekilde hazırlanan bulamaç numuneler kademeli olarak 100 kPa’ya kadar çift yönlü düşey konsolidasyona tabi tutulmuşlardır.Şekil 2’de görülen dinamik üç eksenli test sistemi ile ASTM-D5311 [14] uyarınca gerçekleştirilen deneylerde frekans 0.5 Hz, CSR (Çevrimsel Gerilme Oranı) 0.35 alınmıştır. Şekil 3’te ise K072 nolu numunenin dinamik üç eksenli deney esnasındaki boşluk suyu basıncı oranının (r_u) değişimi verilmiştir. Deneylerde konsolidasyon sonu (çevrim başlangıcı) efektif çevre basıncı 100 kPa olduğundan, Idriss 1999’a [15] göre 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için boşluk suyu basıncının 15 çevrimden önce 100 kPa’ya eşitlenmesi zeminin sıvılaşmasının bir göstergesi olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2. Silt karışımların fiziksel özellikleri ve Adapazarı Kriterine göre sıvılaşma potansiyelleri
(Physical properties of the silt mixtures and liquefaction potentials according to Adapazarı Criteria)

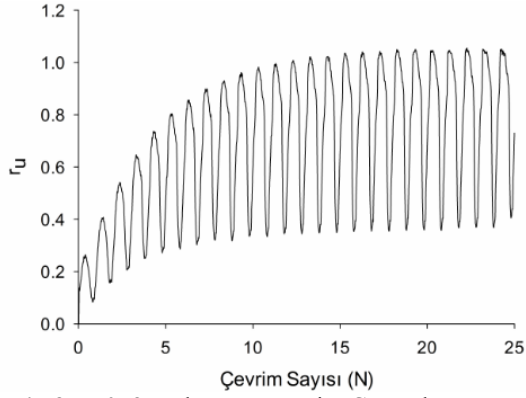
Numune no	W _L (Cas.)	W _L (Koni)	W _P	I _P =W _L -W _P	% C	D ₅₀ (mm)		G _s	Sınıf	Sıvılaşma*
						Hidrometre	Pipet			
K020	NP	38	NP	NP	2	0,037	0,037	2,72	ML	Evet
K024	NP	38	NP	NP	2,4	0,040	0,035	2,71	ML	Evet
K032	NP	36	NP	NP	3,2	0,039	0,038	2,72	ML	Evet
K040	NP	36	NP	NP	4	0,039	0,036	2,70	ML	Evet
K043	NP	35	NP	NP	4,3	0,037	0,035	2,70	ML	Evet
K048	NP	34	NP	NP	4,8	0,030	0,036	2,70	ML	Evet
K050	NP	35	NP	NP	5	0,031	0,035	2,70	ML	Evet
K056	NP	34	NP	NP	5,6	0,028	0,034	2,69	ML	Evet
K072	30	33	26	NP	7,2	0,030	0,034	2,70	ML	Evet
K080	32	36	23	9	8	0,025	0,027	2,73	ML	Evet
K096	33	37	24	9	9,6	0,024	0,024	2,72	ML	Evet
K112	34	37	22	12	11,2	0,021	0,030	2,72	ML	Hayır
K144	35	37	22	13	14,4	0,016	0,020	2,72	ML	Hayır
K184	55	52	27	28	18,4	0,007	0,007	2,71	CH	Hayır
T.Sert	NP	37	NP	NP	1,6	0,034	0,040	2,72	ML	Evet
Yenikent	NP	32	NP	NP	3,2	0,046	0,035	2,70	ML	Evet

(*Tüm numunelerde I_L≥0.9 kabul edilmiştir)

Tablo 3’de özetlenen CTX deney sonuçlarında N_{ru=1.00} boşluk suyu basıncı katsayısının 1.00 olduğu çevrim sayısını, r_{uN15} ise 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı katsayısını göstermektedir. Bu değerler Seed&Idriss, 1982 [16] önerisine göre değerlendirilerek numunelerin sıvılaşma potansiyelleri belirlenmiştir. Tablo 3 ‘de yer alan bu sonuçların Tablo 2’de Adapazarı Kriteri baz alınarak elde edilen sonuçlar ile tam bir uyum içinde olduğu görülmektedir

**Şekil 2.** Dinamik üç eksenli deney sistemi(Cyclic Triaxial Test System-CTX)**Tablo 3.** CTX verilerine göre sıvılaşma potansiyelleri
(Liquefaction potentials for CTX data)

Numune No	r _{uN15}	N _{ru=1.00}	Sıvılaşma
K020	1.00	10	Evet
K024	1.00	11	Evet
K032	1.00	11	Evet
K040	1.00	11	Evet
K043	1.00	11	Evet
K048	1.00	10	Evet
K050	1.00	11	Evet
K056	1.00	10	Evet
K072	1.00	12	Evet
K080	1.00	12	Evet
K096	1.00	14	Evet
K112	0.93	21	Hayır
K144	0.73	29	Hayır
K184	0.14	-	Hayır
T.Sert	1.00	10	Evet
Yenikent	1.00	8	Evet



Şekil 3. K072 nolu numunenin CTX deney sonucu (CTX test result of K072 sample)

4. ZEMİN-SU KARAKTERİSTİK EĞRİLERİ (SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVES)

Zemin-su karakteristlik eğrisi (SWCC) zeminlerin mekanik davranışı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Gözenekli bir ortam olan zeminlerin mekanik davranışının bu boşluklarının boyut ve dağılımından önemli derecede etkileneceği açıktır. Şekillenmesinde boşluk boyutu ve dağılımının önemli bir etken olduğu bilinen SWC eğrileri bu çalışmada numunelerin boşluk boyutunun belirlenmesi amacıyla oluşturulmuştur. SWC eğrileri

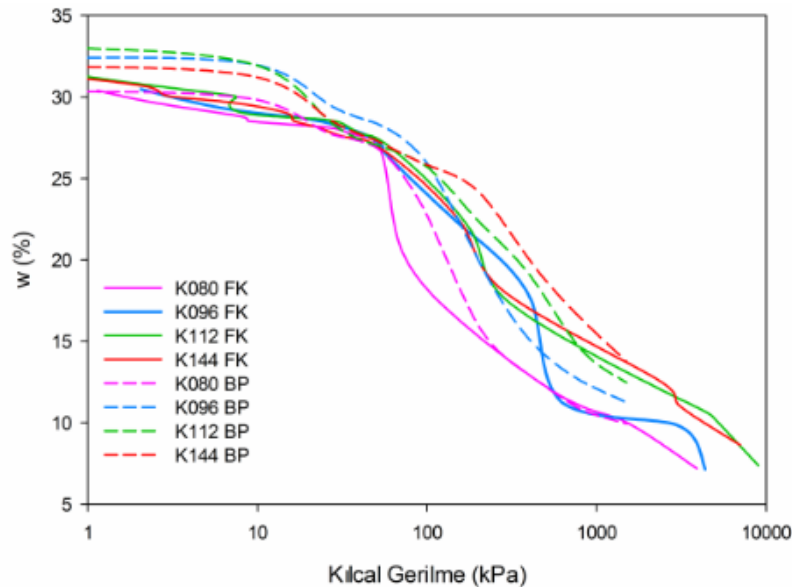
basınç plakası ve filtre kağıdı deneyleri yardımı ile belirlenmiştir. Whatman No.42 filtre kağıtları kullanılarak yapılan kılcal gerilme ölçümleri ASTM D 5298-94 [17] deney standardı uyarınca yürütülmüştür.

Filtre kağıdı yönteminde emme-su içeriği kalibrasyon eğrisi bilinen bir filtre kağıdı toplam emme ölçümünde buhar alış-verişi için numunenin yakınına, kılcal gerilme ölçümünde ise sadece boşluk suyu akışı için numune ile tam temas halinde yerleştirilerek nem dengesinin sağlanması beklenmektedir. Bu süre toplam emme ölçümünde 7 ila 14 gün, kılcal gerilme ölçümünde ise 6-8 gün arası olmaktadır. Denge sonrası filtre kağıdının yaş ve kuru ağırlığı hassas terazide alınarak hesaplanan kağıt su içeriğine örnekleri Tablo 4'te verilen bazı aştırmacılara ait kalibrasyon eğrisi denklemlerinde karşılık gelen emme değeri bulunmaktadır.

Filtre kağıdı deneyi K080, K096, K112 ve K144 isimli numunelere uygulanmıştır. Basınç plakası deneyi ile elde edilemeyen yüksek kılcal gerilme değerleri elde edilmiş ve 14 hafta süren deneyler sonucunda SWCC'ler oluşturulmuştur (Şekil 4).

Tablo 4. Filtre kağıdı kalibrasyon denklemleri (Calibration equations of filter papers)

Kaynak	Filtre kağıdı	Su içeriği (%)	\log_{10} Emme(kPa)
McQueen ve Miller, 1968 [18]	Schleicher&Schuell	<54	5.058-0.0688 w
		>54	1.882-0.0102 w
Chandler, vd., 1992 [19]	Whatman no.42 (kuruma)	<47	4.842-0.0622 w
		>47	6.050-2.48logw
Ridley, 1995 [20]	Whatman no.42 (ıslanma)	≤ 15.47	4.842-0.0622 w
		$>15.47 \leq 57.2$	4.573-0.0449w
		>57.2	2.904-0,0158w
Bulut, vd., 2000 [21]	Schleicher&Schuell	Tek eğri	$1.1247w^{0.8473}$

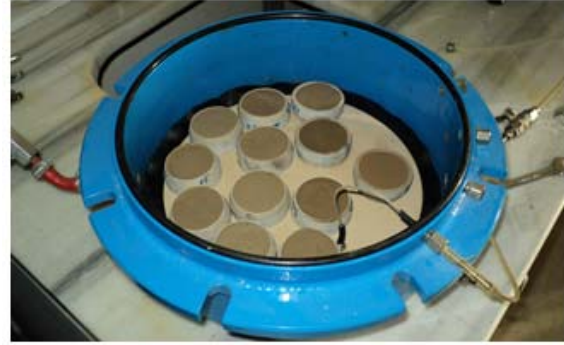


Şekil 4. Dört numune için hem filtre kağıdı hem de basınç plakası deneylerinden elde edilen SWC eğrileri (SWCC's of four samples formed with both filter paper and pressure plate tests)

Şekilde aynı zamanda numunelerin filtre kağıdı deneyi ile oluşturulan eğrileri de çizilerek teyit edilmiştir. Bunun yanında tüm numunelerin SWCC'leri basınç plakası yöntemi ile oluşturulmuştur. Numuneler 100 kPa'a konsolide edilerek 5 cm çap 2 cm yüksekliğe sahip özel ringlerin içine alınmıştır. 1500 kPa kabarcıklanma basıncı değerli seramik üzerine (Şekil 5) yerleştirilen doygun numunelere plaka üst girişinden hava basıncı (u_a) seramik girişinden de su basıncı (u_w) uygulanmıştır. 10 kPa'dan başlayarak artan adımlarla 1500 kPa'a kadar uygulanan emme kademelerinde dengeye gelmeleri için her adımda en az bir hafta beklenmiştir. Siltli numunelerde hacim ölçümünün zorluğundan dolayı ve numuneler halkalardan çıkartılmadan deneyler yapılmak zorunda olduğundan SWCC eğrileri sadece su muhtevasına göre ve kuruma ayağı için oluşturulmuştur.

Şekil 6'da tüm karışımların basınç plakası deneyinden elde edilen zemin-su karakteristik eğrileri yer almaktadır. Eğrilerde ilk göze çarpan kil oranı arttıkça eğrilerin yukarı doğru ötelenmesidir. Yine eğrilerin doygunluk oranları kil oranı ile artmaktadır. İdeal bir SWCC'de eğri, kabarcıklanma basıncına dek çok düşük eğimlerde devam etmekte ve bu noktadan sonra geçiş safhası denilen ikinci aşamada zemin boşluklarına hava girişi olmasıyla yüksek eğimde azalmaktadır. İkinci aşamadan sonra ise kalıcı su içeriği denilen son aşamaya geçilmektedir. Bu aşamada ise su en ince boşluklara çekilerek eğrinin eğimini yataya yaklaştırmaktadır. Basınç plakası ile 1500 kPa gerilme uygulanabilirken filtre kağıdı

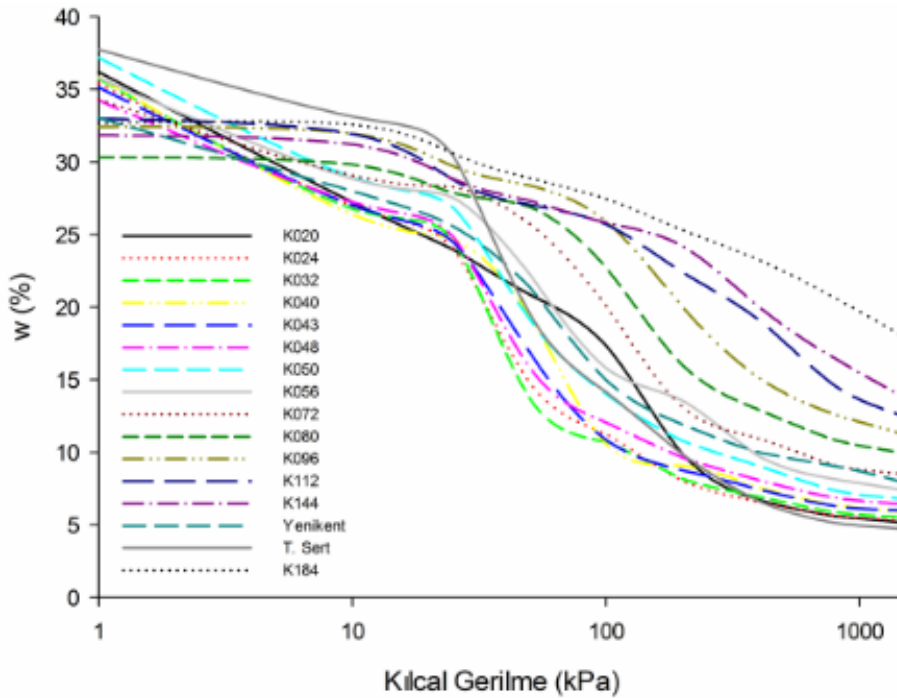
yöntemiyle 10000 kPa'a varan kılcal gerilme değerlerine ulaşılabilmiştir [22].



Şekil 5. Basınç plakası zemin numuneleri (Pressure plate soil samples)

5. BOŞLUK BOYUTU DAĞILIMI (PORE SIZE DISTRIBUTION)

Boşluk geometrisi fiziksel ve mekanik davranışönemli derecede etkileyen önemli bir özelliktir. Zemin su içeriği ile zemin emmesi arasındaki ilişkiyi tanımlayan zemin-su karakteristik eğrisi ise diğer birçok zemin özelliği hakkında önemli bilgiler vermesinin yanı sıra zeminin boşluk boyutu dağılımı hakkında kullanışlı veri sağlayabilmektedir. Burada, yukarıda anlatılan hesap yöntemi uygulanarak SWC eğri verileri kullanılarak söz konusu numunelerin boşluk boyutu dağılımları elde edilmiştir. Bir danenin etrafındaki film kalınlığı da denklem (1)'deki kapiler denklem ile birlikte hesaba katıldığında,



Şekil 6. Basınç plakası deneylerinden elde edilen zemin-su karakteristik eğrileri (Soil-water characteristic curves formed with pressure plate tests)

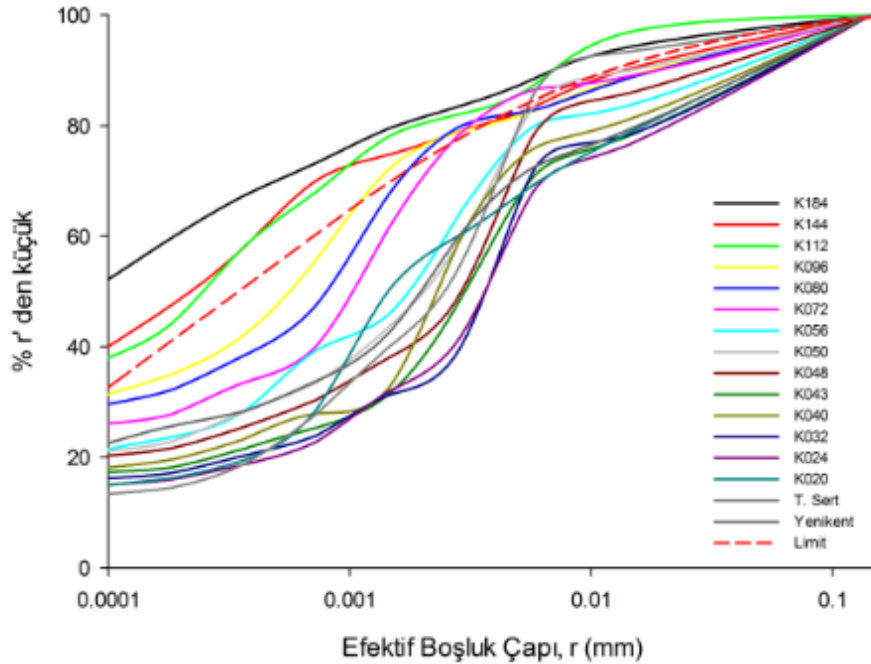
$$t_i = \tau \left[-\frac{5}{\ln(RH)} \right]^{1/3} \quad (2)$$

boşluk boyutu dağılım eğrileri elde edilebilmektedir. Burada, τ sorbat molekülünün efektif çapını (2,77 Å) temsil etmektedir [23].

Şekil 7'de boşluk boyutu dağılım eğrileri noktalanmıştır. Tablo 2'de ve Tablo 3'te yer alan sıvılaşma potansiyelleri ile ilgili değerlendirmelere bakıldığında kil oranı %10'dan fazla olan numunelerin sıvılaşma potansiyeli taşımadıkları anlaşılmaktadır. Şekil 7 incelendiğinde numunelerin boşluk boyutu dağılım eğrilerinin yukarıda açıklanan değerlendirmelere göre sıvılaşan ve sıvılaşmayan numuneler olmak üzere iki kümeye ayrıldığı görülmektedir. Bu iki grup arasında çizilen kırmızı sınır eğri sıvılaşabilirlik açısından bir sınır eğri görevi yapabilecektir. Bunun yanında tek bir değer ile ifade etmek gerekirse ortalama boşluk boyutunun (r_{50}) 0.0004'ten küçük değer alması durumunda sıvılaşmaya karşı dirençli olacağı anlaşılmaktadır. Şekil 7'de çizilen sınır eğrinin denklemi

$$y = 103.157 \cdot \frac{x}{0.0004} \left[1 + \frac{x}{0.0004} \right]^{-0.5638} \quad (3)$$

şeklinde ortaya çıkmaktadır. Burada x efektif boşluk çapını (r), y ise r 'den küçük yüzde miktarını göstermektedir.

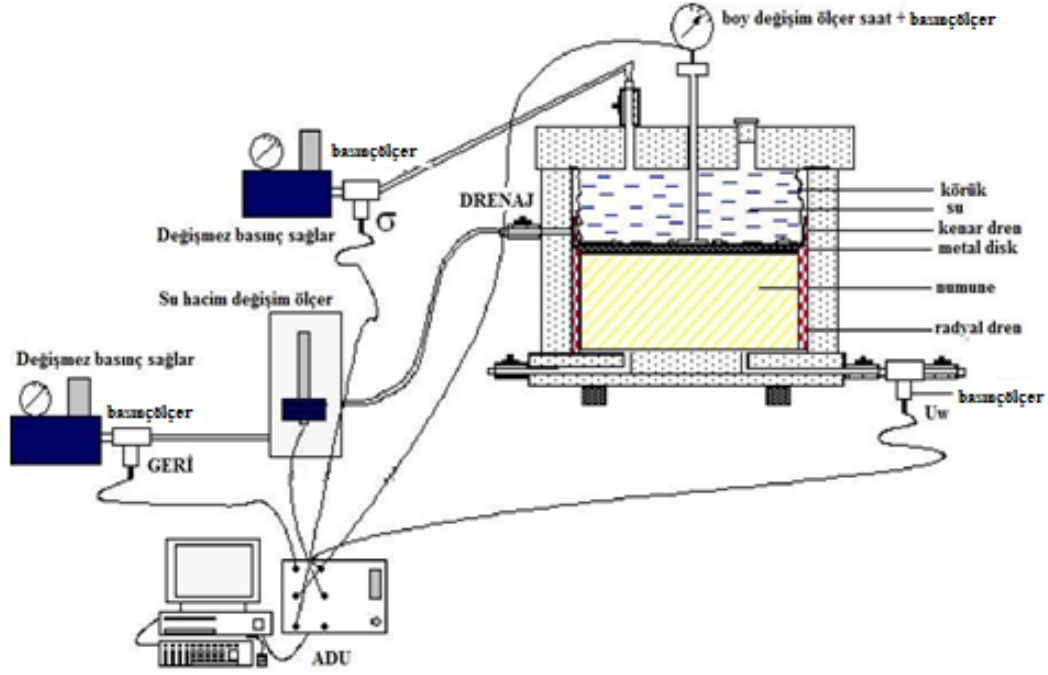


Şekil 7. Numunelerinin boşluk boyutu dağılım eğrileri (Pore size distribution curves of samples)

6. SÖNÜMLENME DENEYLERİ (DISSIPATION TESTS)

Ayrıbir malzeme olan zeminlerin diğer önemli özelliklerinden biri de konsolidasyon özelliğidir. Konsolidasyon özelliği de yine dolaylı olarak geçirimsizlik özelliğine dolayısıyla boşluk suyu basıncı artışının azalmasını ifade eden sönümlenme özelliğine bağlıdır. Sönümlenme ölçümlerini kullanarak konsolidasyon parametrelerini belirlemek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada ayrıca zeminin konsolidasyon özelliği ile sıvılaşma yeteneği arasındaki ilişkinin ortaya konması amaçlanmıştır. Sönümlenmenin daha çok yatay konsolidasyon katsayısı tarafından kontrol edildiği bilindiğinden deneylerde radyal konsolidasyon katsayıları ölçülmüştür.

Bu çalışma kapsamında yürütülen laboratuvar sönümlenme deneyleri 150 mm çaplı hidrolik konsolidasyon hücresi deney setinde gerçekleştirilmiştir. Deney sisteminin ayrıntıları Şekil 8'de verilmiştir. Bu şekillerden de görüleceği gibi drenaj radyal dren vasıtasıyla sağlanmakta, hücre kenarından verilen drenaj çıkışı hacim değişim ölçer ve geri basıncın verildiği değişmez basınç sağlar pompaya bağlanmaktadır. Numune boy değişimi üst tarafta hem mekanik hem de elektronik olarak ölçülmektedir. Değişmez basınç sağlarların çıkış basınçları ve boşluk suyu basınçları basınçölçerler ile ölçülmektedir. Elektronik değerler veri toplama cihazı (ADU) yardımıyla bilgisayarda toplanmaktadır.



Şekil 8. Hidrolik sönümlenme deney düzeneği (Hydraulic dissipation test system) [24]

Bulamaç halinde hazırlanan karışım numuneleri hücre içine $5,0 \pm 0,5$ cm yüksekliğinde yerleştirilmektedir. Hücre basıncı ile geri basınç arasında 10 kPa fark olacak şekilde 50 kPa'lık adımlarla 500 kPa geri basınca ulaşılmaktadır. Drenaj koşulları, içten dışa doğru radyal drenaj biçiminde uygulanmıştır. Yükleme ve drenaj vanasının açılmasını takiben 6 sn ile başlayan boşluk suyu basıncı okumaları iki kat artan aralıklar en az 24 saat ya da 500 kPa geri basınç değerine ulaşana dek sürdürülmüştür. Literatüre bakıldığında, hidrolik hücrede içten dışa doğru drenaj koşullarında ölçülen t_{50} ve t_{90} değerleri kullanılarak radyal konsolidasyon katsayısının [25];

$$c_{ro} = 0.131 \frac{T_{ro} D^2}{t} \quad (4)$$

ifadesi ile bulunduğu görülmektedir. Burada D: numune çapını (mm), t: zamanı (dk), T_{ro} : teorik zaman faktörünü göstermektedir. Eşit oturma ve serbest oturma durumları için kullanılacak zaman faktörleri de Tablo 5'te verilmektedir.

Sürekli okuma alınan laboratuvar hidrolik hücre sönümlenme deneyi grafik sonuçlarına örnek olarak Şekil 9 ve Şekil 10'daki eğriler verilmiştir.

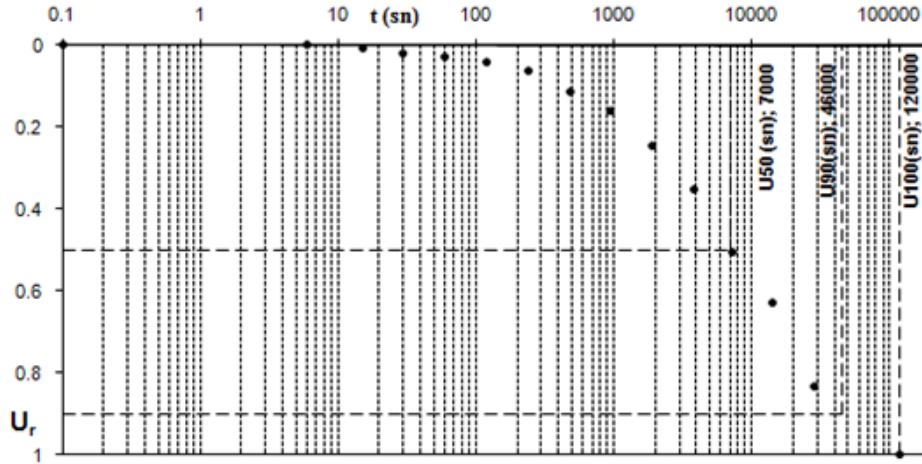
Sönümlenme deneylerinden belirlenen t_{50} (%50 konsolidasyonun tamamlandığı süre) ve t_{90} (%90 konsolidasyonun tamamlandığı süre) değerleri ile radyal konsolidasyon katsayıları hesaplanmıştır. t_{50} ve t_{90} değerlerine ulaşmak için sönümlenme eğrileri U_r -t eksenlerinde çizilip buradan konsolidasyon yüzdesi U_{50} , U_{90} ve U_{100} için t_{50} , t_{90} ve t_{100} değerleri okunmuştur. Burada

$$U_r = 1 - \frac{\Delta u_w}{\Delta u_{w0}} \quad (5)$$

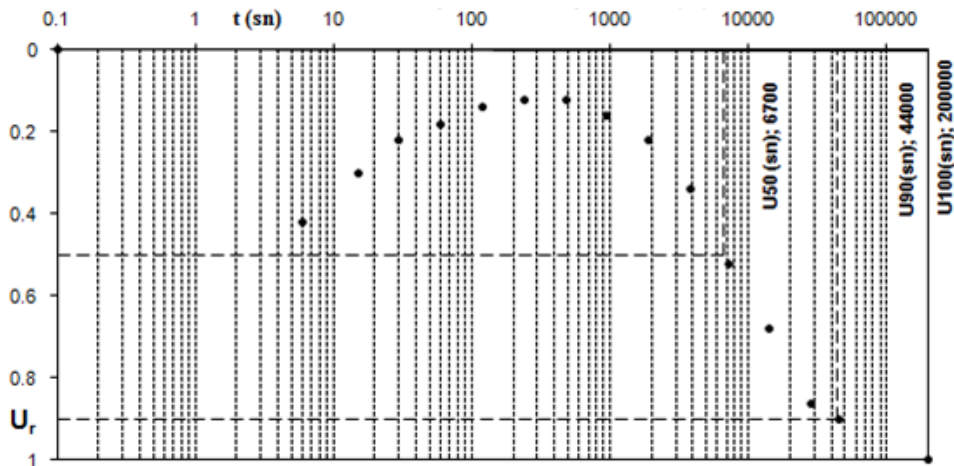
olarak alınmıştır. Şekil 9'da % 8 kil oranına sahip numunenin, Şekil 10'da ise %18,4 kil oranına sahip numunenin sönümlenme eğrileri görülmektedir. Bu şekillerde özetlenen durum incelendiğinde sıvılaşımpotansiyeline sahip olmayan numunelerde boşluk suyu basıncında ani bir düşüş sonrası yumuşak bir yükselme ve azalma eğilimi görülürken sıvılaşıma potansiyeli bulunan numunelerde boşluk suyu basıncının yatay bir eğilimden sonra azalma gösterdiği söylenebilir. Sıvılaşıma potansiyeli bulunmayan numunelerin geçirimsizlik özelliğinin düşük olması drenaj vanası açık olmasına rağmen artan boşluk suyu basıncı değerinin artması sonucunu getirmektedir.

Tablo 5. Radyal konsolidasyon zaman faktörleri(Radial consolidation time factors)

Drenaj yönü	Oturma	Konsolidasyon konumu	Zaman Faktörü	
			T_{50}	T_{90}
Radyal Dışa doğru	Serbest	Ortalama	0,0632	0,335
		Merkezi	0,200	0,479
	Eşit	Ortalama	0,0866	0,288
		Merkezi	0,173	0,374



Şekil 9. %8 kil oranına sahip numunenin sönümlenme eğrisi (sıvılaşma var)
(Dissipation curve of 8% clay content soil sample (liquefiable))

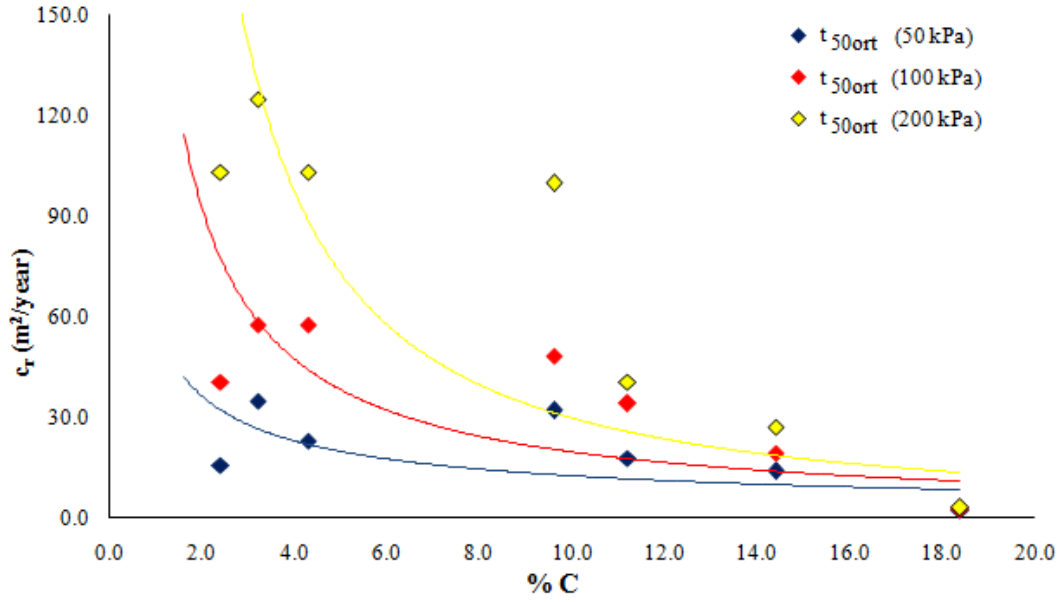
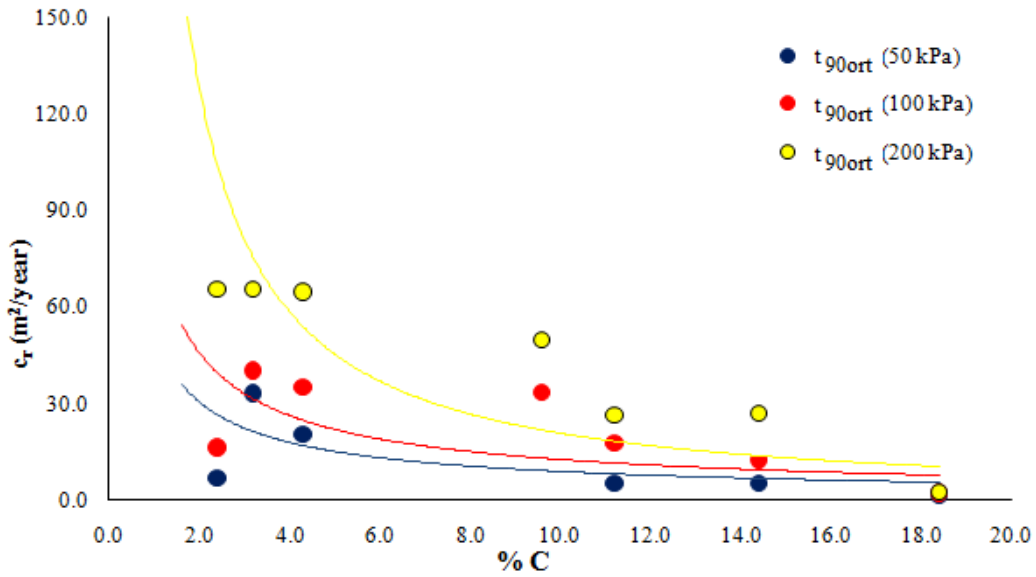


Şekil 10. %18,4 kil oranına sahip numunenin sönümlenme eğrisi (sıvılaşma yok)
(Dissipation curve of 18,4% clay content soil sample (non-liquefiable))

Sönümlenme deney sonuçları kullanılarak hesaplanan t_{50} ve t_{90} değerlerinin kil oranına göre çizilen grafikler Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmektedir. Şekil 11'de 50, 100 ve 200 kPa gerilme artış kademelerinde ölçülen t_{50} değerine göre hesaplanan radyal konsolidasyon katsayı değerlerinin değişimi verilmektedir. Bunun yanında sönümlenme deney sonuçlarının ve radyal konsolidasyon katsayısı değerlerinin detayları Tablo 6'da görülebilmektedir.

Siltli zeminlerde, artan kil oranı ile t_{50} ve t_{90} değerleri artmakta, radyal konsolidasyon katsayısı ise artan kil

oranı ile azalmaktadır. Kademeler halinde uygulanan gerilme büyüklüğü arttığında ölçülen sönümlenme zamanları azalmakta ve konsolidasyon katsayısı değerleri artmaktadır. Deney sonuçlarına göre belirlenen t_{50} ve t_{90} değerlerinden hesaplanan radyal konsolidasyon katsayısı değerleri benzer sonuçlar vermektedir. Sıvılaşan ve sıvılaşmayan numunlerin radyal konsolidasyon özellikleri incelendiğinde radyal konsolidasyon katsayısı değerinin ortalama olarak $10 \text{ m}^2/\text{yıl}$ değerinden küçük olması durumunda sıvılaşmanın belirmeyeceği söylenebilir.

Şekil 11. t_{50} değerinden hesaplanan c_r değerleri (c_r values calculated from t_{50})Şekil 12. t_{90} değerinden hesaplanan c_r değerleri (c_r values calculated from t_{90})

Tablo 6. Sönümlenme deney sonuçları (Dissipation test results)

Numune No	Sınıf (USCS)	σ (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	t_{50} (sn)	t_{90} (sn)	t_{100} (sn)	t_{50} (dak)	t_{90} (dak)	t_{100} (dak)	c_{ro} m ² /yıl (t_{50} ile)		c_{ro} m ² /yıl (t_{90} ile)	
										ort	merkezi	ort	merkezi
K016	ML	600-500	50	2500	9700	40000	41,7	161,7	666,7	6,0	12,0	5,1	6,7
		700-500	100	1100	4700	28800	18,3	78,3	480,0	13,6	6,6	10,6	13,8
		900-500	200	740	3400	28800	12,3	56,7	480,0	20,2	9,8	14,6	19,0
K020	ML	600-500	50	45	224	480	0,8	3,7	8,0	332,7	161,5	222,3	288,6
		700-500	100	17	88	240	0,3	1,5	4,0	880,6	427,4	565,7	734,7
		900-500	200	5,5	43	120	0,1	0,7	2,0	2721,8	1321,1	1157,8	1503,5
K024	ML	600-500	50	960	7250	14400	16,0	120,8	240,0	15,6	7,6	6,9	8,9
		700-500	100	370	3060	14400	6,2	51,0	240,0	40,5	19,6	16,3	21,1
		900-500	200	145	760	10200	2,4	12,7	170,0	103,2	50,1	65,5	85,1
K032	ML	600-500	50	430	1500	3840	7,2	25,0	64,0	34,8	16,9	33,2	43,1
		700-500	100	260	1240	7200	4,3	20,7	120,0	57,6	27,9	40,1	52,1
		900-500	200	120	760	3840	2,0	12,7	64,0	124,8	60,6	65,5	85,1
K040	ML	600-500	50	380	1380	3840	6,3	23,0	64,0	39,4	19,1	36,1	46,8
		700-500	100	240	1050	7200	4,0	17,5	120,0	62,4	30,3	47,4	61,6
		900-500	200	70	460	1920	1,2	7,7	32,0	213,9	103,8	108,2	140,5
K043	ML	600-500	50	650	2450	7200	10,8	40,8	120,0	23,0	11,2	20,3	26,4
		700-500	100	260	1420	3840	4,3	23,7	64,0	57,6	27,9	35,1	45,5
		900-500	200	145	770	7200	2,4	12,8	120,0	103,2	50,1	64,7	84,0
K048	ML	600-500	50	2800	11000	28800	46,7	183,3	480,0	5,3	2,6	4,5	5,9
		700-500	100	1500	6500	14400	25,0	108,3	240,0	10,0	4,8	7,7	9,9
		900-500	200	1250	5000	14400	20,8	83,3	240,0	12,0	5,8	10,0	12,9
K050	ML	600-500	50	6300	30000	86400	105,0	500,0	1440,0	2,4	1,2	1,7	2,2
		700-500	100	3000	10500	28800	50,0	175,0	480,0	5,0	2,4	4,7	6,2
		900-500	200	1700	6700	28800	28,3	111,7	480,0	8,8	4,3	7,4	9,6
K056	ML	600-500	50	7200	28800	46000	120,0	480,0	766,7	2,1	1,0	1,7	2,2
		700-500	100	4000	10700	28800	66,7	178,3	480,0	3,7	1,8	4,7	6,0
		900-500	200	3000	10200	46000	50,0	170,0	766,7	5,0	2,4	4,9	6,3
K072	ML	600-500	50	6000	21000	28800	100,0	350,0	480,0	2,5	1,2	2,4	3,1
		700-500	100	4400	13500	21600	73,3	225,0	360,0	3,4	1,7	3,7	4,8
		900-500	200	3000	10000	12600	50,0	166,7	210,0	5,0	2,4	5,0	6,5
K080	ML	600-500	50	17000	30000	150000	283,3	500,0	2500,0	0,9	0,4	1,7	2,2
		700-500	100	16000	60000	120000	266,7	1000,0	2000,0	0,9	0,5	0,8	1,1
		900-500	200	7000	46000	120000	116,7	766,7	2000,0	2,1	1,0	1,1	1,4
K096	ML	600-500	50	470	2500	3800	7,8	41,7	63,3	31,9	15,5	19,9	25,9
		700-500	100	310	1500	7000	5,2	25,0	116,7	48,3	23,4	33,2	43,1
		900-500	200	150	1000	3800	2,5	16,7	63,3	99,8	48,4	49,8	64,7
K112	ML	600-500	50	850	9500	72000	14,2	158,3	1200,0	17,6	8,5	5,2	6,8
		700-500	100	440	2800	22000	7,3	46,7	366,7	34,0	16,5	17,8	23,1
		900-500	200	370	1880	28800	6,2	31,3	480,0	40,5	19,6	26,5	34,4
K144	ML	600-500	50	1080	13000	150000	18,0	216,7	2500,0	13,9	6,7	3,8	5,0
		700-500	100	780	5200	86400	13,0	86,7	1440,0	19,2	9,3	9,6	12,4
		900-500	200	550	2400	28800	9,2	40,0	480,0	27,2	13,2	20,7	26,9
K184	CH	600-500	50	6700	44000	200000	111,7	733,3	3333,3	2,2	1,1	1,1	1,5
		700-500	100	5900	24000	160000	98,3	400,0	2666,7	2,5	1,2	2,1	2,7
		900-500	200	5000	21000	200000	83,3	350,0	3333,3	3,0	1	2,4	3,1

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

1964 depremlerinden sonra Geoteknik Deprem Mühendisliğinde ince daneli zeminlerin sismik davranışının değerlendirilmesinde önemli adımlar atılmıştır. Siltli zeminlerin sıvılaştırılabilirliğinin incelenmesi amacıyla bu çalışmada, bir sıvılaştırma bölgesinden alınan siltli numune çökeltme işlemine tabi tutularak ve yıkanarak kumundan ve kilinden arındırılmıştır. İçerdiği kilden farklı oranlarda katılmak suretiyle 16 farklı silt kil karışım numunesi elde edilmiştir. Likit limit değerinin 1,5 katı su içeriğinde bulamaç haline getirilen karışımlar arazi örtü yüküne benzer şekilde 100 kPa düzey gerilme altında konsolide edilmişlerdir. Karışımların sıvılaştırma potansiyeli taşıyıp taşımadıkları hem Adapazarı Kriteri hem de dinamik üç eksenli deneyler yardımı ile belirlenmiştir. Numunelerin boşluk boyutu dağılım eğrileri zemin-su karakteristik eğrileri kullanılarak elde edilmişlerdir. Sonuçlar sıvılaştırılan ve sıvılaştırılmayan numunelerin boşluk boyutu dağılım eğrilerinin birbirinden ayrıldığını göstermektedir. Ortalama boşluk boyutu (r_{50}) 0,0004 mm'den küçük olan numunelerin sıvılaştırmaya karşı dirençli oldukları görülmüştür.

Siltli zeminlerde, artan kil oranı ile t_{50} ve t_{90} değerleri artmakta, radyal konsolidasyon katsayısı ise artan kil oranı ile azalmaktadır. Gerilme büyüklüğü arttığında ölçülen sönümlenme zamanları azalmakta ve konsolidasyon katsayısı değerleri artmaktadır. t_{50} ve t_{90} değerlerinden hesaplanan radyal konsolidasyon katsayısı değerleri benzer sonuçlar vermektedir. %10 kil oranında radyal konsolidasyon katsayısı değerlerinin ortalama olarak 10 m²/yıl civarında olduğu söylenebilir.

Sıvılaştırma potansiyeli taşıyan, kil oranı %10'dan küçük olan numuneler yumuşakça azalan parabolik bir eğri tipi gibi benzer bir sönümlenme davranışı göstermektedir. %10'dan daha fazla kil oranına sahip numunelerin sönümlenme eğrileri dikkat çekici bir şekilde drenaj vanasının açılmasıyla birlikte sert ve ani bir düşüş yapan boşluk suyu basıncı değerinin hemen sonrasında yükleme esnasında aldığı en büyük değeri aşmayacak büyüklükte artmakta ve daha sonra yine parabolik yumuşak bir eğri şeklinde azalmaktadır. Buna göre, laboratuvar sönümlenme eğrisi başlangıç kısmında boşluk suyu basıncı değerinde artış görülen zeminlerin sıvılaştırma potansiyeli taşımayacakları görüşü ortaya çıkmaktadır.

8. SEMBOLLER(SYMBOLS)

α	: Boşluk suyu ıslatma açısı
c_r	: Radyal konsolidasyon katsayısı
CSR	: Çevrimsel gerilme oranı
C (%)	: Kil yüzdesi
D	: Numune çapı

D_{50}	: Ortalama dane boyutu
G_s	: Özgül ağırlık
I_L	: Sıvılık indisi
I_p	: Plastisite indisi
r	: Efektif boşluk çapı
r_{50}	: Ortalama boşluk boyutu
r_u	: Boşluk suyu basıncı oranı
RH	: Bağlı nem
SWCC	: Zemin-su karakteristik eğrisi
t	: zaman
T_{50}	: % 50 konsolidasyon zaman faktörü
T_{90}	: % 90 konsolidasyon zaman faktörü
T_{r0}	: Teorik zaman faktörü
T_s	: Yüzey gerilim kuvveti
τ	: Sorbat molekülü efektif çapı
U_r	: Radyal konsolidasyon yüzdesi
$(u_a - u_w)$: Kılcal gerilme
u_a	: Boşluk hava basıncı
u_w	: Boşluk suyu basıncı
v_w	: Suyun molar hacmi
w	: Su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_p	: Plastik limit

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Wang, W.S., "Some Findings in Soil Liquefaction", **Research Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute**, Beijing, 1979.
2. Idriss, I.M. ve Boulanger, R.W., "Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes", **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, Elsevier, Vol26, 115-130, 2006.
3. Seed, R.B., Çetin, K.Ö., Moss, R.E.S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E., ve Faris, A., "Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework", **26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Seminar**, Keynote Presentation, H.M.S., Queen Mary, Long Beach, California, April 30, 2003.
4. Bağrıaçık, B. ve Laman, M., "Distribution of Stresses in Unreinforced and Reinforced Soils Induced by a Circular Foundation", **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Vol 26, No 4, 787-800, 2011.
5. Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S. ve Özocak, A., "Liquefaction of Silts: The Adapazarı Criteria", **Bulletin of Earthquake Engineering**, Vol 8, 859-873, 2010.
6. Önalp, A. ve Arel, E., "Siltlerin Sıvılaştırma Yeteneği: Adapazarı Kriteri", **Zemin Mekaniği**

- ve **Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi**, İ.T.Ü., İstanbul, 363-372, 2002.
7. Bray, J.D. ve Sancio, R.B., "Assessment of Liquefaction Susceptibility of Fine Grained Soils", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol27, No 2, 31-41, 2006.
 8. Arel, E., ve Önalp, A., "Geotechnical Properties of Adapazarı Silt", **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, Springer, Vol 71, No 4, 709-720, 2012.
 9. Önalp, A., Arel, E., Bol, E., Özocak, A. ve Sert, S., "Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesinde Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) Sönümlenme Yönteminin Uygulanması", **TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu Projesi**, no.104M387, Aralık 2007.
 10. ASTM D 2487-00. "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes", Unified Soil Classification System.
 11. Kanbur, M.A., **Siltlerde Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesinde Boşluk Geometrisinin Etkisi**, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bil. Ens., 2011.
 12. Tapan, M., **Siltlerde Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesinde Yanal Konsolidasyon Özelliğinin Etkisi**, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bil. Ens., 2011.
 13. Özocak, A. ve Tapan, M., "Siltlerde Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesinde Hidrolik Hücre Deney Sonuçlarının Etkisi", **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi**, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 4-5 Eylül 2012.
 14. ASTM D 5311-92 "Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil", 2004..
 15. Idriss, I.M., "An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential", **Proc. TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction**, January, Publication No. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Administration, 1999.
 16. Seed H.B. ve Idriss I.M., "**Ground motions and soil liquefaction during earthquakes**", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, 134 pp, 1982.
 17. ASTM D 5298-94 "Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper", Annual Book of ASTM Standards.
 18. McQueen, I.S. ve Miller, R.F., "Calibration and evaluation of a wide range method of measuring moisture stress", **Journal of Soil Science**, Vol 106, No 3, 225-231, 1968.
 19. Chandler, R.J., Crilly, M.S., ve Montgomery-Smith, G.A., "A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings", **Proc. Institution of Civil Eng.**, May, 82-89, 1992.
 20. Ridley, A.M., Discussion on "Laboratory filter paper suction measurements", by Houston et al., **Geotechnical Testing Journal**, Vol 8, No 3, 391-396, 1995.
 21. Bulut, R., Park, S-W., ve Lytton, R.L., "A new matric suction calibration curve", **Proc. Asian Conference on Unsaturated Soils**, Singapore, 18-19 May, 263-267, 2000.
 22. Özocak, A. ve Kanbur, M.A., "Pore Geometry Influence on the Liquefaction Potential of Silts", **15th WC on Earthquake Engineering**, Lisboa, Portugal, 24-28 September, 2012.
 23. Lu, N. Ve Likos, W.J., **Unsaturated Soil Mechanics**, New Jersey: Wiley, 2004.
 24. Özocak, A., Önalp, A. ve Bol, E., "İnce Daneli Zeminlerde Laboratuvar Sönümlenme Deneyleri", **ZMTM 12. Ulusal Kongresi**, Selçuk Üniversitesi, Konya, 16-17 Ekim, 295-302, 2008.
 25. Fredlund, D.G., Rahardjo, H. Ve Fredlund, M.D., **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**, New York: Wiley, 2012.

