

Silt Kum Karışımlarının Sıvılaşma Davranışı ve Sıvılaşma Sonrası Hacimsel Deformasyon Özellikleri

Eyyüb KARAKAN¹
Selim ALTUN²

ÖZ

Sunulan çalışmada, silt kum karışımlarının sıvılaşma davranışları ve sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon özellikleri araştırılmıştır. Çalışma, İzmir Bayraklı bölgesinden temel kazısı sırasında elde edilen silt kum karışımı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada silt içeriğinin sıvılaşma dayanımına etkisinin araştırılması için 8 farklı ince tane içeriğinde (FC=%0, 5, 10, 20, 40, 60, 80,100) dinamik üç eksenli deney aleti ile JGS 0542-2000 standardına uygun olarak drenajsız deneyler gerçekleştirilmiş ve deneyler sonucunda hacimsel deformasyon özelliklerinin belirlenmesi için drenaj vanaları açılarak çıkan su miktarları büret yardımıyla ölçülmüştür. Sıvılaşma deneyleri rölatif sıklık yerine, artan silt içerikleri ile birlikte kaba daneler ve ince daneler arası boşluk oranı kavramlarına göre sıvılaşma kriterleri belirlenmiştir. Ayrıca bu durumda sıvılaşma dayanımında eşik silt içeriği bulunmuştur. Sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon davranışları ise silt içeriğine bağlı olarak yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Silt kum karışımı, sıvılaşma, hacimsel deformasyon, kaba - ince daneler arası boşluk oranı.

ABSTRACT

Liquefaction Behavior of Silt Sand Mixtures and Post Liquefaction Volumetric Strain Properties

In this study, the liquefaction behavior silty sand mixtures and volumetric deformation properties were investigated. The study was implemented on samples of silt sand mixtures obtained during an excavation at Bayraklı, Izmir, Turkey. In order to investigate the liquefaction behavior of silty sand, undrained cyclic triaxial compression tests were carried out according to JGS 0542-2000, for 8 different fines contents (0, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100%). To determine the volumetric deformation properties, the water content change was measured by allowing drainage into a burette upon completion of a cyclic test. The liquefaction criteria was determined by using intergranular-interfine void ratios. A

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 02.02.2015 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2016 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Kilis 7 Aralık Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kilis - eyyubkarakan@gmail.com
2 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - sealtun@gmail.com

threshold fines content to serve as liquefaction criterion has also been determined. The volumetric deformation properties behavior were reviewed depending on the silt content.

Keywords: Silt Sand Mixtures, Liquefaction, Volumetric Strain, intergranular - interfine void ratios.

1.GİRİŞ

Temiz kumların tekrarlı yükler altında davranışı elli yıldır derinlemesine araştırılmış olsa da, değişen miktarlarda siltli kum içeren ince daneli zeminlerde bu olgu, yaklaşık yirmi yıldır gerçek bir ilgi uyandırmıştır. Bu konudaki araştırmalar bu tip zeminlerin, temiz kumlara göre sıvılaşmaya karşı daha duyarlı olduğunu göstermiştir. Ancak literatürde hala siltli kumların sıvılaşmaya direncinin ince dane etkisiyle ilgili sonuçların çelişkili olduğu görülmektedir. İnce dane içeren kumların sıvılaşma potansiyeli ile ilgili olarak arazide yapılan araştırmalarda ince danenin varlığının sıvılaşma dayanımını arttırdığı görülmüştür [1, 2]. Ancak laboratuvar deney sonuçları ince dane oranının %30'dan daha az olması durumunda farklı bir eğilim göstermiştir [3, 4]. Koester [4] sıvılaşma davranışında ince dane oranının, plastisite indisinden daha önemli olduğunu iddia ederken, Ishihara [5], ve Prakash ve Guo [6] ise, inceleri yüksek plastisiteli olan zeminlerin sıvılaşma davranışını değiştirebildiğini söylemişlerdir. Finn vd. [7], birçok araştırmacının, sıvılaşma dayanımında ince dane oranının etkisini araştırırken farklı kriterler kullandıkları için farklı sonuçlar elde ettiklerini iddia etmiştir.

Sıvılaşmaya dirençte ince dane oranı etkisi, dane çapı büyüklüğüne bağlı dane çapı mekanizmalarına dayanmaktadır. Laboratuvar deney sonuçları, %30'dan daha az ince dane içeren zeminlerde, kum daneleri arasındaki boşlukların zemin dayanımına etkisinin olmadığını göstermiştir. Bu sonuç global boşluk oranını (e_0) azaltır. Böylece, artan ince dane oranı ile sıvılaşma direnci, aynı global boşluk oranındaki zeminlere göre azalır ve farklı intergranüler boşluk oranlarındaki kum iskelet (e_{SK}) daha baskın davranış gösterir [8, 9, 10, 11]. Benzer şekilde, daha fazla ince dane olması durumunda, ince daneler kum matrisinden daha baskındır ve genel davranış büyük ölçüde ince danelere bağlı olur. Amini ve Qi [12] ince dane oranı arttıkça, siltli kum karışımlarının tekrarlı dayanımlarının sürekli arttığını, ancak Belkhatir vd. [13] ve Stamatopoulos [14], ince dane miktarının artışı ile silt kum karışımlarının tekrarlı dayanımlarının azalacağını bildirmişlerdir. Öte yandan, Koester [4]; Papadopoulou ve Tika, [15]; Polito ve Martin, [8]; Xenaki ve Athanasopoulos, [16], ince dane miktarının artışının silt kum karışımlarının tekrarlı dayanımlarını eşik ince dane miktarına kadar azalttığı, daha sonra arttırdığını gözlemlemişlerdir.

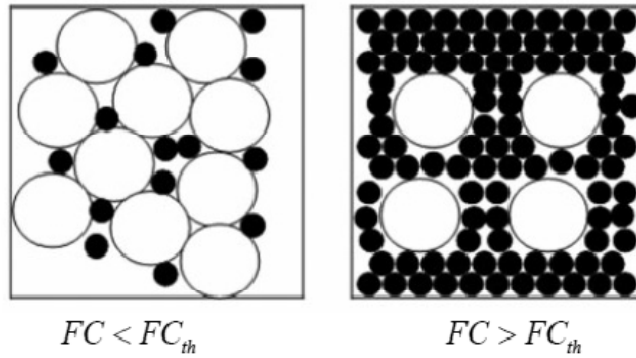
Silt kum karışımlarında, eşik silt içeriği değeri, kumdan silte geçişi belirleyen önemli bir parametredir. Bu eşik değer, kumun tipine, ince dane türüne ve global boşluk oranına göre değişmektedir. Bu nedenle global boşluk oranı yaklaşımı kullanılırsa, silt kum karışımlarının sıvılaşma direnci üzerinde silt içeriği etkisi ile ilgili farklı sonuçlar çıkarılabilir. Özellikle, Troncoso [4], ince dane oranı %30'a kadar arttıkça, sıvılaşma dayanımlarının azaldığını bulmuştur. Diğer taraftan, Xenaki ve Athanasopoulos [16], yaptıkları deneylerde kritik ince dane oranının %44 olduğu sonucuna varmıştır. Polito [17] tarafından rapor edilen sonuçlarda plastik olmayan silt kum karışımlarının eşik silt içeriği değerinin $25 < FC_{thr} < 45$ arasında olduğunu göstermiştir.

Silt kum karışımlarının tekrarlı yükler altında davranışı araştırılırken ince dane oranının etkisi önemli bir parametredir. Yine de, bu zeminlerin sıvılaşmasında ince dane oranının etkisiyle ilgili tutarsız sonuçlar vardır. Düşük ince dane içeriğinde, ince daneler pasif olarak kalır ve boşluklarda yüzer. Bu nedenle, silt kum karışımlarının kayma dayanımını değerlendirmek için böyle “intergranüler” ve “interfine” boşluk oranları gibi yeni endeks parametreleri kullanmak gerekmektedir [9,18]. Sonuç olarak, gerilme şekil değiştirme davranışları üzerinde etkisi konusunda fikir edinmek için kaba ve ince taneli olmak üzere iki alt matrise ihtiyaç vardır.

Bu çalışmanın temel amacı, İzmir, Bayraklı’da bir temel kazısından toplanan siltli kumun, dinamik davranışında ince dane oranının etkisini tanımlamak ve silt kum karışımlarının sıvılaşma dayanımlarının intergranüler-interfine boşluk oranı ile ilişkili olup olmadığını araştırmaktır. Çalışmanın ikinci amacı, ise dinamik deney sonucunda bürette toplanan suyun ölçülerek zeminin silt içeriğine bağlı olarak hacimsel deformasyon özelliklerini tanımlamaktır. Bu amaçla çalışma kapsamında temiz kum ve değişik ince dane içeriğine sahip silt kum karışımları üzerinde yapılan drenajsız tekrarlı üç eksenli basınç deneylerinin (CTX) sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

1.1. Eşik İnce Dane Oranı

Bilindiği gibi, ince dane oranı belli bir değerin altında ise, zemin davranışı sadece kum danelerinin iskeleti tarafından yönetilir. Bu durumda ince daneler pasif durumdadır ve kayma dayanımına katkıları yoktur. Ancak, ince daneler içeriği bir sınır değeri aştığında, bunlar zemin davranışında hakimdir ve bu durumda kum daneleri boşluk olarak kabul edilir. Bu sınır değer “eşik ince dane oranı” (FC_{th}) olarak adlandırılır (Şekil 1). Literatürde eşik ince dane oranı ile ilgili iki farklı tanımlama bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, Polito ve Martin [8] tarafından önerilen ve kum iskeleti sabit tutularak, boşluklardaki maksimum ince dane içeriği olarak adlandırılan “ince dane oranı”dır. Yang vd. [19] tarafından kullanılan diğer tanım, zeminin doruk dayanımını pozitiften negatife çeviren oran olarak yapılmıştır.



Şekil 1. İnce dane içeren iki zemin yapısı

1.2. İntergranüler – İnterfine Boşluk Oranı

Kuerbis vd. [20] tarafından önerilen intergranüler boşluk oranı kavramı, ince dane içeriği hacmi boşluk olarak kabul edilerek, ince dane parçacıklarının basitçe kaba parçacıklar arasındaki boşluğu doldurması olarak tanımlanabilir. İntergranüler boşluk oranı, Dash ve Sitharam [21]; Kuerbis vd. [20]; Polito ve Martin [8] kum iskeleti boşluk oranı, Dasari vd. [22] granüler boşluk oranı olarak isimlendirilmiştir. İntergranüler boşluk oranı, kaba danelerin özgül ağırlığının, ince danelerin özgül ağırlığına eşit olduğunu varsayarak, Thevayanagam [9] tarafından önerilen formül ile kolayca hesaplanabilir;

$$e_g = \frac{e + f_c}{1 - f_c} \quad (1)$$

Burada; e global boşluk oranı, e_g intergranüler boşluk oranı, f_c ise ince dane oranıdır ($f_c=FC/100$).

Birçok araştırmacı, aynı intergranüler boşluk oranında, ince dane oranının artışıyla zeminlerin tekrarlı dayanımlarının arttığını bildirmişlerdir [14, 15, 16, 20]. Polito ve Martin [8], iki farklı kumu incelemiş ve verilen intergranüler boşluk oranı için, ince dane oranı arttıkça Yasteville kumunun tekrarlı dayanımı hafifçe artarken, Monterey kumunun tekrarlı dayanımının sabit kaldığını gözlemlemiştir.

İkinci açıklama ise interfine boşluk oranı olarak tanımlanabilir. Yüksek miktarda ince dane içeren karışımlar için kum daneleri ayrılmış olarak kabul edilir, bu durumda interfine boşluk oranı daha uygun bir parametre olarak kullanılabilir.

$$e_f = \frac{e}{f_c} \quad (2)$$

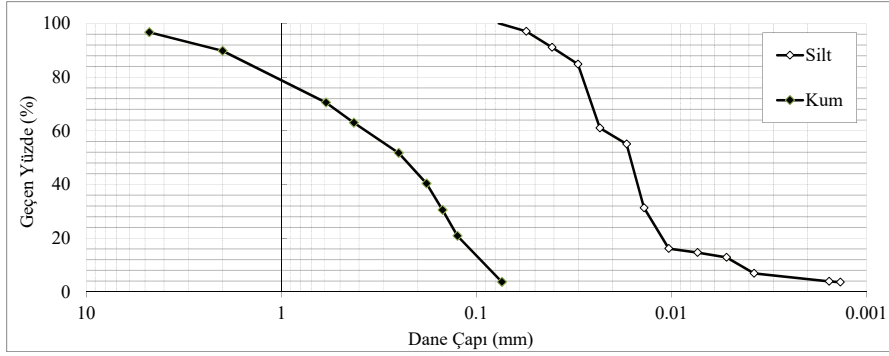
2. DENEY YÖNTEMİ

2.1. Kullanılan Malzeme

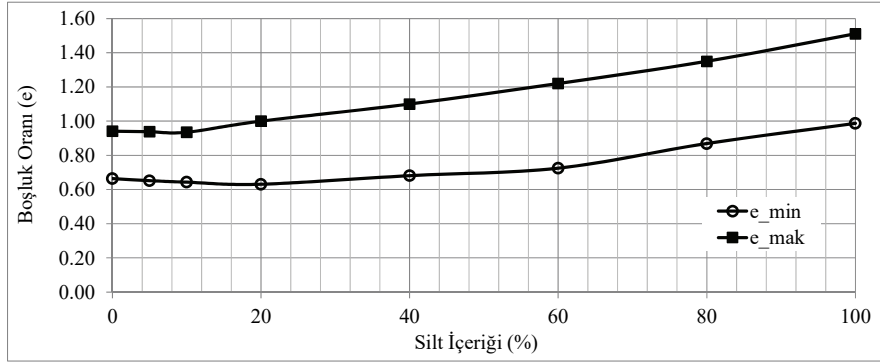
İzmir, Bayraklı'da bir kazı alanından çıkarılan doğal zemin örneği siltli kumdur. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma sistemine göre SM olarak sınıflandırılır. Sekiz farklı değişik karışım numunenin No4 ile No200 eleklerden elenmesi ile elde edilmiştir. Temiz kum siltli kumun elenmesinden elde edilmiştir. 74 mikrondan küçük parçalar (ince daneler) farklı karışımların hazırlanması için ayrılmıştır. Kum köşeli ve yuvarlak danelerden oluşmakta ve $C_u=4.22$ mm, $D_{50}=0.24$ mm dir. Maksimum ve minimum boşluk oranları sırasıyla 0.941 ve 0.664 dür. Kullanılan siltin likit limiti $w_L=40$ ve plastisite indisi $I_p=13$ 'tür. Kum ve siltin özgül ağırlığı $G_s=2.7$ dir. Kum ve siltler farklı oranlarda (0, 5, 10, 20, 40, 60, 80 ve 100) karışımlar elde etmek üzere karıştırılmıştır. Kum ve silt için elde edilen dane çapı dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Doğal zeminin (SM) silt oranı %20 olarak ölçülmüştür.

Zemin karışımlarının maksimum ve minimum boşluk oranlarını belirlemede ASTM standardı kullanılmıştır. Karışımlar için ölçümler üçer kez tekrarlanmış, elde edilen

maksimum ve minimum boşluk oranları Şekil 3’de gösterilmiştir. Karışıma belirli bir miktara kadar ince dane ilave edilirse boşluk oranının azalma eğilimi gösterdiği, daha sonra artan ince dane oranı ile artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. İnce dane oranının tam aralığı için (%0-100) geçerli maksimum ve minimum boşluk oranını belirlemek için herhangi bir standart olmadığı bilinmektedir. ASTM 4254-91 ve ASTM-4253-93 standartları maksimum %15 ince dane oranına sahip malzemeler için geçerlidir. Ancak, birçok araştırmacı ince dane oranı %15’den daha fazla olan zeminlerde, maksimum ve minimum boşluk oranını belirlemek için ASTM prosedürünü kullandığı görülmektedir [9, 12, 14, 16].



Şekil 2. Dane çapı dağılımı



Şekil 3. Silt içeriğine bağlı olarak değişen maksimum ve minimum boşluk oranı

2.2. Dinamik Üç Eksenli Deney Sistemi

Silt kum karışımlarının dinamik davranışı üzerindeki gerilme - şekil değiştirme parametrelerinin etkilerini araştırmak için, dört takım üzerinden, 58 dinamik üç eksenli deney (CTX) yapılmıştır. Deneyde kullanılan karışımların özellikleri ve deney koşulları, intergranüler ve interfine boşluk oranı yaklaşımı kullanılarak elde edilen sonuçların özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir. Rutin deney programına ek olarak rastgele seçilen bazı deneyler, aynı boşluk oranında numune hazırlama ve aynı yükleme koşullarında sonuçların

Silt Kum Karışımlarının Sıvılaştırma Davranışı ve Sıvılaştırma Sonrası Hacimsel ...

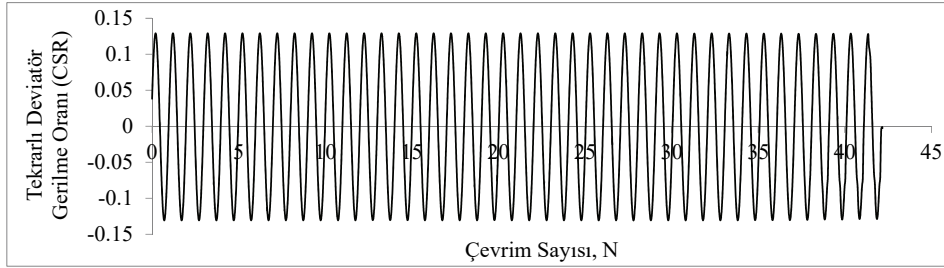
doğruluğunu kontrol etmek için tekrarlanmıştır. Deneyler çapı 50 mm ve boyu 100 mm numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm örnekler kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanmıştır. Ayrıca tüm deneyler 100 kPa efektif çevre basıncı altında yapılmıştır.

Deneyler gerilme kontrollü olarak Seiken firması imalatına ait tam otomatik dinamik üç eksenli deney sistemi kullanılarak yapılmıştır. Örnekler JGS 0520-2000 standardına uygun olarak hazırlanmış ve deneyler JGS 0542-2000 standardına uygun olarak yapılmıştır. Doygunluğu sağlamak için örneklerden ilk olarak CO₂ daha sonra su geçirilmiştir. Ardından numunelere geri basınç uygulanarak, tüm deneylerde 0.96'dan daha büyük Skempton B değeri sağlanmıştır. Örnekler izotrop olarak 100 kPa efektif gerilme altında konsolide edilerek daha sonra drenajsız koşullarda gerilme kontrollü olarak tekrarlı yüklemeler uygulanmıştır.

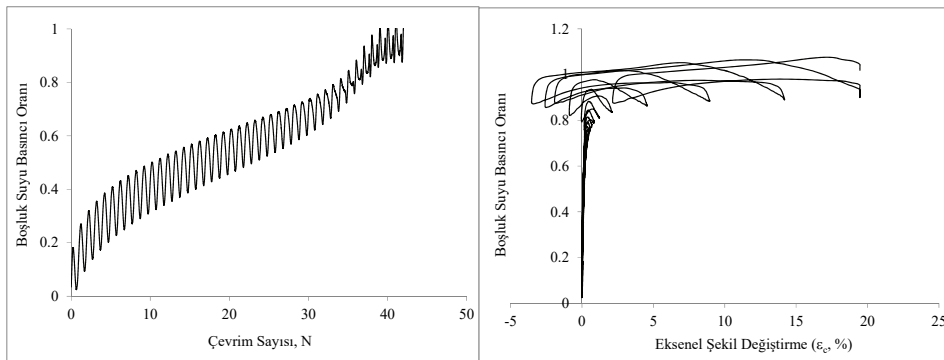
Tablo 1. Dinamik üç eksenli deney özellikleri

Test No	Numune Boyutları		Silt içeriği (%)	Boşluk Oranı e	İntergranüler es	İnterfite ef	Maksimum		Boşluksuyu Basıncı Katsayısı, B	Hücre Basıncı (kPa)	Geri Basıncı (kPa)	CSR	Çevrim Sayısı N
	D(mm)	H(mm)					e max	e min					
1	50	99	0	0.858	0.858		0.941	0.664	0.997	275	175	0.156	30
2	48.52	99.76	0	0.858	0.858		0.941	0.664	1	180	80	0.222	2.5
3	49.18	99.11	0	0.858	0.858		0.941	0.664	1	200	100	0.187	10.5
4	49.59	99	0	0.858	0.858		0.941	0.664	0.97	270	170	0.133	103
5	49.32	99.18	0	0.858	0.858		0.941	0.664	1	280	180	0.105	29
6	49.7	99.09	5	0.852	0.95		0.938	0.652	1	225	125	0.226	5
7	50	98.89	5	0.852	0.95		0.938	0.652	0.96	360	260	0.246	2.5
8	49.96	98.98	5	0.852	0.95		0.938	0.652	0.987	250	150	0.127	76.5
9	49.92	99	5	0.852	0.95		0.938	0.652	0.982	250	150	0.172	15.5
10	49.44	99.1	5	0.852	0.95		0.938	0.652	1	175	75	0.102	425
11	50	98.88	10	0.847	1.053		0.935	0.643	0.965	300	200	0.258	1.5
12	49.84	98.88	10	0.847	1.053		0.935	0.643	0.977	225	125	0.209	3.5
13	49.56	98.98	10	0.847	1.053		0.935	0.643	0.983	175	75	0.185	10.5
14	49.67	98.97	10	0.847	1.053		0.935	0.643	0.984	200	100	0.141	53
15	49.88	99.01	20	0.889	1.362		1	0.631	0.993	275	175	0.140	38.5
16	50	99	20	0.889	1.362		1	0.631	0.997	300	200	0.111	199
17	49.7	98.91	20	0.889	1.362		1	0.631	1	275	175	0.167	15
18	49.48	98.96	20	0.889	1.362		1	0.631	1	175	75	0.197	6.5
19	49.57	98.8	40	0.974	2.291		1.1	0.681	1	250	150	0.130	38.5
20	49.52	98.78	40	0.974	2.291		1.1	0.681	1	250	150	0.108	241
21	49.52	98.78	40	0.974	2.291		1.1	0.681	1	275	175	0.163	14.5
22	49.57	98.77	40	0.974	2.291		1.1	0.681	1	250	150	0.187	4.5
23	49.54	98.71	60	1.072		1.786	1.22	0.725	1	225	125	0.142	28.5
24	49.53	98.65	60	1.072		1.786	1.22	0.725	1	225	125	0.114	95.5
25	49.39	98.41	60	1.072		1.786	1.22	0.725	1	200	100	0.171	7.5
26	49.75	98.56	60	1.072		1.786	1.22	0.725	1	275	175	0.197	3.5
27	49.52	98.14	80	1.206		1.507	1.35	0.869	1	250	150	0.131	17.5
28	49.35	98.23	80	1.206		1.507	1.35	0.869	1	175	75	0.112	163
29	49.33	98.45	80	1.206		1.507	1.35	0.869	1	175	75	0.197	2.5
30	49.78	98.22	80	1.206		1.507	1.35	0.869	1	225	125	0.125	73.5
31	49.63	98.26	100	1.354		1.354	1.511	0.987	1	225	125	0.156	13.5
32	49.5	98.45	100	1.354		1.354	1.511	0.987	1	175	75	0.105	163.5
33	49.47	98.94	100	1.354		1.354	1.511	0.987	0.985	375	275	0.133	35.5
34	49.42	98.47	100	1.354		1.354	1.511	0.987	1	200	100	0.198	4.5
35	49.92	99.44	0	0.803	0.803		0.941	0.664	0.981	225	125	0.208	19
36	50	99.34	0	0.803	0.803		0.941	0.664	0.973	400	300	0.255	6
37	49.71	99.42	0	0.803	0.803		0.941	0.664	0.978	200	100	0.162	151
38	49.64	99.38	0	0.803	0.803		0.941	0.664	0.995	200	100	0.327	2.5
39	50	99.12	20	0.816	1.269		1	0.631	0.978	275	175	0.273	2.7
40	49.52	99.21	20	0.816	1.269		1	0.631	1	175	75	0.209	7
41	49.53	99.2	20	0.816	1.269		1	0.631	1	175	75	0.163	32
42	49.6	99.22	20	0.816	1.269		1	0.631	1	200	100	0.136	126.5
43	49.7	99.12	40	0.891	2.151		1.1	0.681	0.992	225	125	0.274	1.5
44	49.52	99.08	40	0.891	2.151		1.1	0.681	0.995	175	75	0.221	5
45	49.92	98.97	40	0.891	2.151		1.1	0.681	1	250	150	0.163	35
46	49.55	99.15	40	0.891	2.151		1.1	0.681	1	175	75	0.137	95
47	49.6	98.78	60	0.973		1.621	1.22	0.725	1	175	75	0.279	0.5
48	49.58	99.07	60	0.973		1.621	1.22	0.725	1	180	80	0.225	3.5
49	49.55	99.02	60	0.973		1.621	1.22	0.725	0.995	175	75	0.164	29.5
50	49.51	99.02	60	0.973		1.621	1.22	0.725	0.992	175	75	0.124	423
51	49.95	98.77	80	1.11		1.387	1.35	0.869	0.987	250	150	0.265	0.5
52	49.72	98.79	80	1.11		1.387	1.35	0.869	0.995	250	150	0.210	4
53	49.69	98.85	80	1.11		1.387	1.35	0.869	0.992	225	125	0.164	26
54	49.54	98.86	80	1.11		1.387	1.35	0.869	1	200	100	0.140	61
55	49.4	98.79	100	1.249		1.249	1.511	0.987	1	175	75	0.138	132
56	49.41	98.81	100	1.249		1.249	1.511	0.987	1	175	75	0.210	5.5
57	49.48	98.99	100	1.249		1.249	1.511	0.987	1	175	75	0.169	30
58	49.82	98.97	100	1.249		1.249	1.511	0.987	0.992	250	150	0.265	0.5

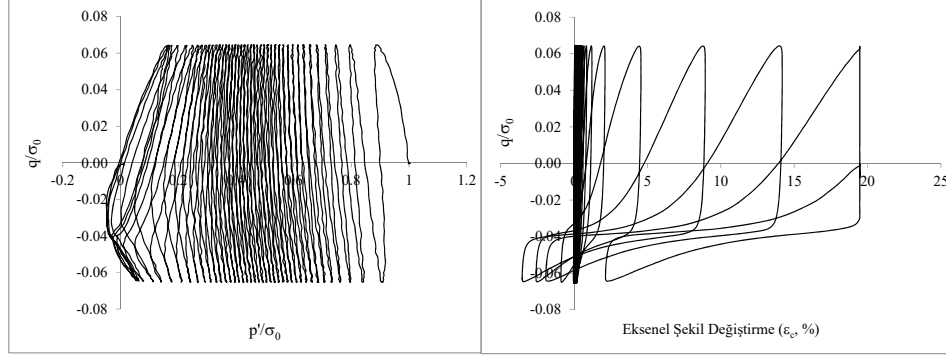
Tekrarlı yüklemeler sırasında sürekli kayıt alınarak, numunedeki aşırı boşluk suyu basıncı, tekrarlı şekil değiştirme ve tekrarlı deviatör gerilme oranı ölçülmüştür. JGS 0542-2000 standardında sıvılaşmayı tanımlamak için iki ölçüt dikkate alınır. Tekrarlı yüklemenin genliği büyük ise, sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı, efektif çevre gerilmesinin %95'ine ulaşmak için gereken maksimum aşırı boşluk suyu basıncı olarak, aksi takdirde, numunede çift genlikteki eksenel şekil değiştirme %5 seviyesine ulaştığı aşama olarak tanımlanır. Silt kum karışımı zeminlerde yapılan bir dinamik üç eksenli deneyden elde edilen tipik test sonuçları Şekil 4 (a)-(d) arasında gösterilmiştir. Numuneye uygulanan tekrarlı deviatör gerilme oranı ile çevrim sayısı Şekil 4a'da gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi çift yönlü dinamik koşulları benzetebilmek için, tekrarlı yüklemeye basma ve çekme şeklinde düzenli olarak 42 çevrim uygulanmıştır. Çevrimsel yükün şiddeti, tekrarlı deviatör gerilme oranı (CSR) ve buna karşılık gelen çevrim sayısını geniş bir aralıkta üretebilmek için değiştirilmiştir. Bu çalışmada çevrim sayısının 1 ile 1000 arasında değiştiği görülmüştür. Şekil 4b'de boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ve eksenel şekil değiştirme ile değişimi gösterilmiştir. Çevrim sayısı ile boşluk suyu basıncı oranı ilerleme hızı sürekli artan bir seyir izlemektedir. Şekil 4b'de tekrarlı eksenel şekil değiştirmenin pozitif olmasından dolayı, normalize edilmiş gerilme izi basınç tarafındadır (Şekil 4c). Şekil 4c'de, normalize edilmiş gerilme izi de gösterilmiştir. Uygulanan deviatör gerilme oranı düşük deformasyon seviyelerinde iken örnekler dengelerini korurken, artan deformasyonlar ve çevrim sayısı ile beraber zemin sıvılaşır. 35 çevrimden sonra, boşluk suyu basıncı oranı %90'ın üzerine çıkar. Bu durumda tekrarlı eksenel şekil değiştirmeler geniş bir aralıkta önemli ölçüde değişir (Şekil 4d). Son olarak Şekil 4d'de tekrarlı eksenel şekil değiştirmenin çevrim sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Burada son çevrim sayılarında elde edilen eksenel şekil değiştirmelerin çok büyük değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.



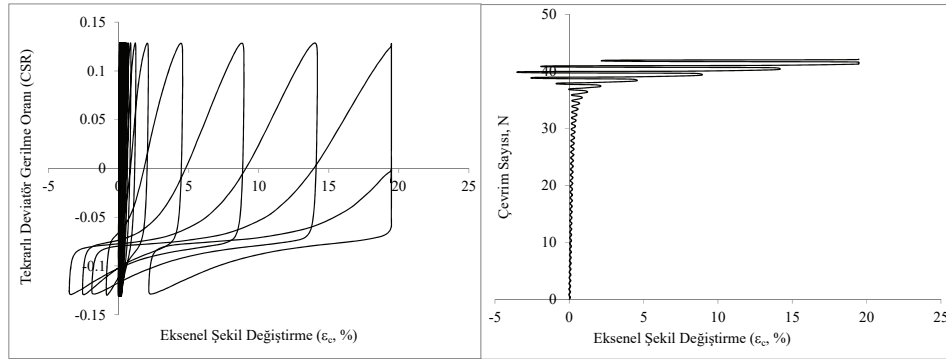
(a)



(b)



(c)



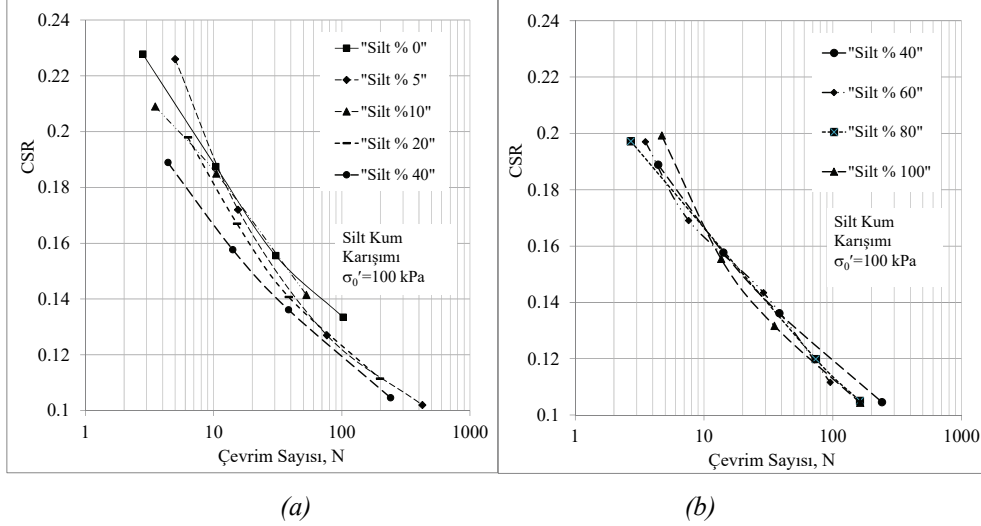
(d)

Şekil 4. a) CSR- çevrim sayısı değişimi; b) Normalize edilmiş gerilme izi; c) q/σ_0 ' ile aksenel şekil değiştirme; d) Boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı; e) Çevrim sayısı ile aksenel şekil değiştirme

3. DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEY SONUÇLARI

3.1. Silt Kum Karışımlarının Drenajsız Tekrarlı Yükler Altında Sıvılaşma Davranışları

Bu bölümde, silt içeriğinin etkisinin yanı sıra global boşluk oranı ile intergranüler-interfene boşluk oranlarının sıvılaşmaya etkileri arasında bir karşılaştırma sunulmaktadır. Tekrarlı gerilme genliği oranına (CSR) bağlı olarak, boşluk oranının etkisini araştırabilmek için çok sayıda dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır. Deneye tabi tutulan silt kum karışımlarının sıvılaşma dayanımları CSR-N eğrileri şeklinde Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5 global boşluk oranının sabit bir değeri için, silt kum karışımlarının sıvılaşma dayanımında silt içeriği etkisini göstermektedir. Global boşluk oranının sabit bir değeri için, silt kum karışımlarında, silt içeriğinin %40'a kadar artmasıyla sıvılaşma direncinin azaldığı görülmüştür. Bu değer eşik silt içeriği (FC_{th}) olarak tanımlanır. Eğer silt içeriği %40'ın üzerinde ise eğilim tersine dönmekte ve sıvılaşma direnci yükselmektedir (Şekil 5a, 5b).

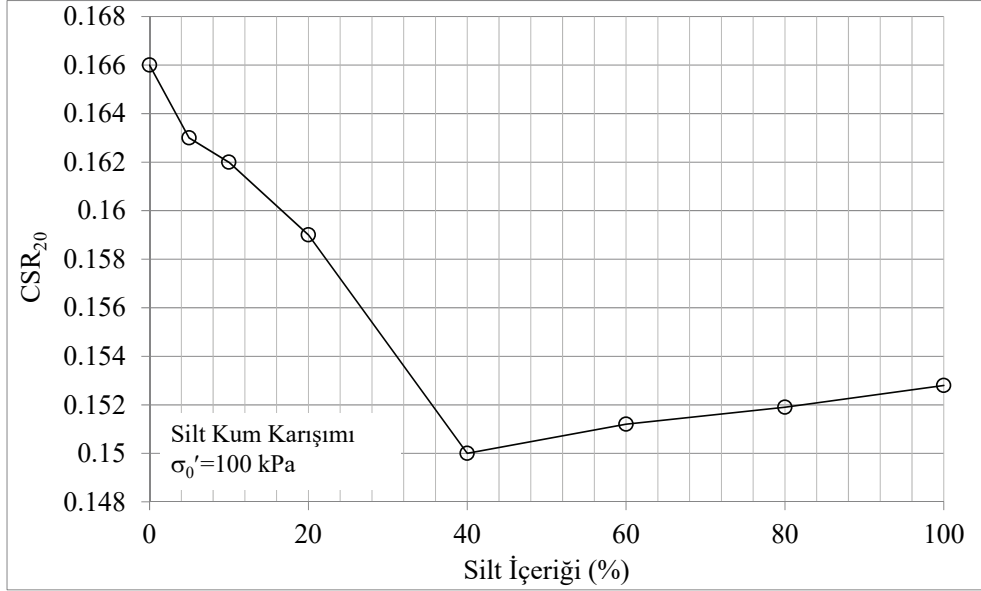


Şekil 5. Silt kum karışımlarının sıvılaşma dayanımında silt içeriği etkisi
(a) $0 < FC < 40$ (b) $40 < FC < 100$ ($\sigma'_0 = 100 \text{ kPa}$)

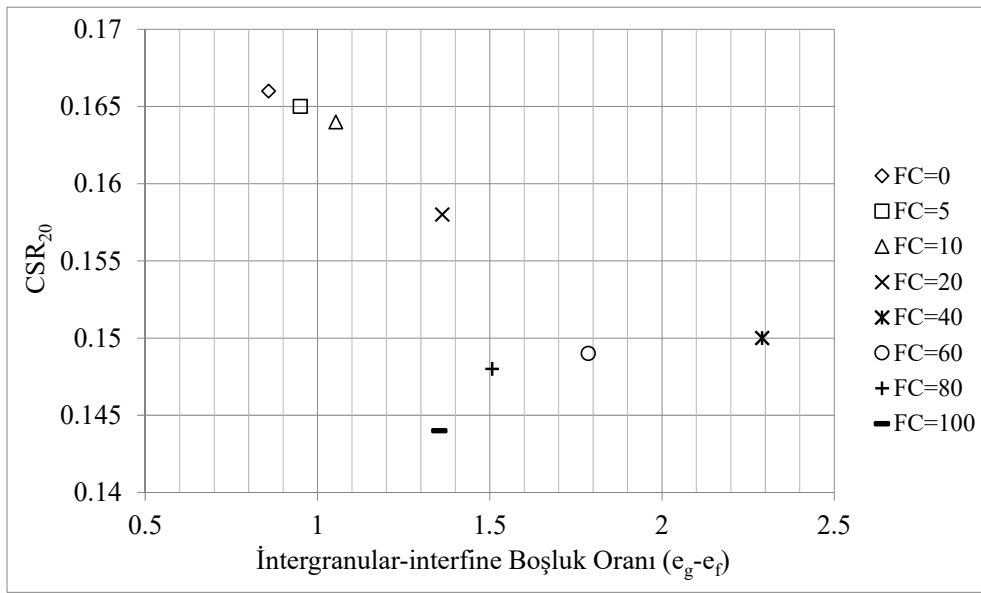
Bu kritik değerden sonra Tevayanagam'ın [9] kavramsal çerçeve açıklaması, eşik değer ile çakışmaktadır. Bu eğilim tersine döner ve silt içeriği arttıkça sıvılaşma direnci artar. Şekil 6, Şekil 5'de gösterilen eğrilerden, 100 kPa çevre gerilmesi altında ve 20 çevrime karşılık gelen silt içeriklerine karşılık tekrarlı gerilme genliği oranı (CSR_{20}) elde edilmiştir. Bu çalışmada, CSR_{20} değeri, 20 çevrimde çift genlikteki aksenal şekil değiştirmenin %5 olduğu tekrarlı gerilme genliği oranı olarak tanımlanır. Şekil 6'da kritik silt içeriği değerinin %40 olduğu açık bir şekilde gösterilmiştir. Kritik silt içeriği değeri, sıvılaşma dayanımının artışı ile azalışı arasındaki silt içeriği aralığını belirlemektedir.

Silt kum karışımlarının sıvılaşma direncine silt içeriğinin etkisi, intergranüler ve interfine boşluk oranları için Şekil 7'de gösterilmiştir. Eşik değerinin altındaki silt içerikleri için, aynı koşullardaki silt içeriğinin artışının CSR_{20} değerini azalttığı açık bir şekilde görülmektedir. Silt kum karışımlarının sıvılaşma dayanımında silt içeriğinin, interfine boşluk oranının etkisine ilişkin farklı bir eğilim Şekil 7'de görülmektedir. Bu durumda ($FC > FC_{th}$) aynı koşullarda silt içeriğindeki artış, CSR_{20} değerini azaltmaktadır.

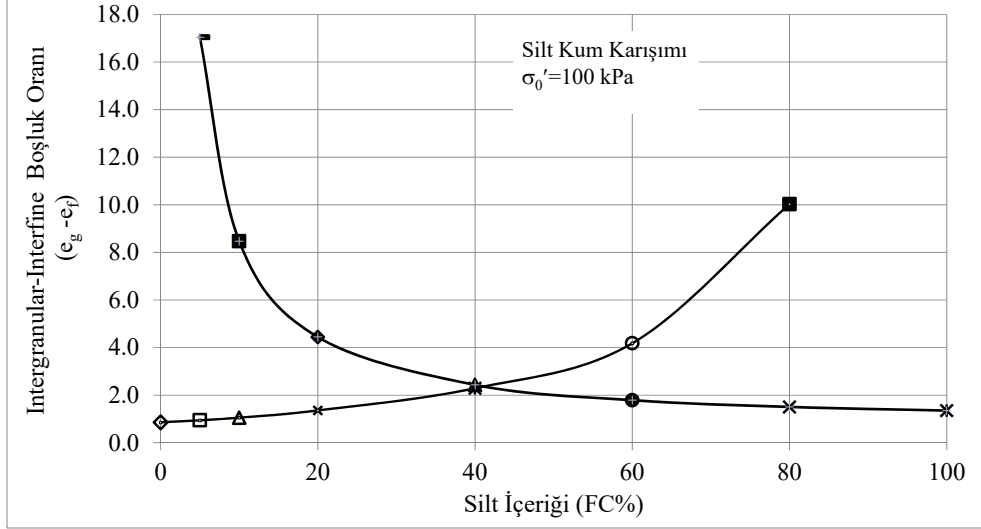
Diğer bir deyişle, Şekil 7'de gösterildiği gibi, silt içeriğinin eşik silt içeriğinden daha küçük olduğu durumda ($FC < FC_{th}$), değeri artarsa, 20 çevrime karşılık gelen CSR_{20} değeri azalmakta ancak intergranüler boşluk oranı artmaktadır. Öte yandan, silt içeriği eşik silt içeriğinden büyük olduğunda ($FC > FC_{th}$), silt içeriği yükselirse, 20 çevrime karşılık gelen CSR_{20} değeri azalır ve interfine boşluk oranı da düşer. Şekil 8'de intergranüler ve interfine boşluk oranlarına karşılık silt içeriğinin değişim grafiği elde edilmiştir. Silt içeriği arttıkça interfine boşluk oranının azaldığı, buna karşılık intergranüler boşluk oranının arttığı görülmektedir. Her ikisinin kesişimi olan %40 silt içeriği ise eşik silt içeriği olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 6. Silt kum karışımlarında CSR₂₀- Silt içeriği etkisi



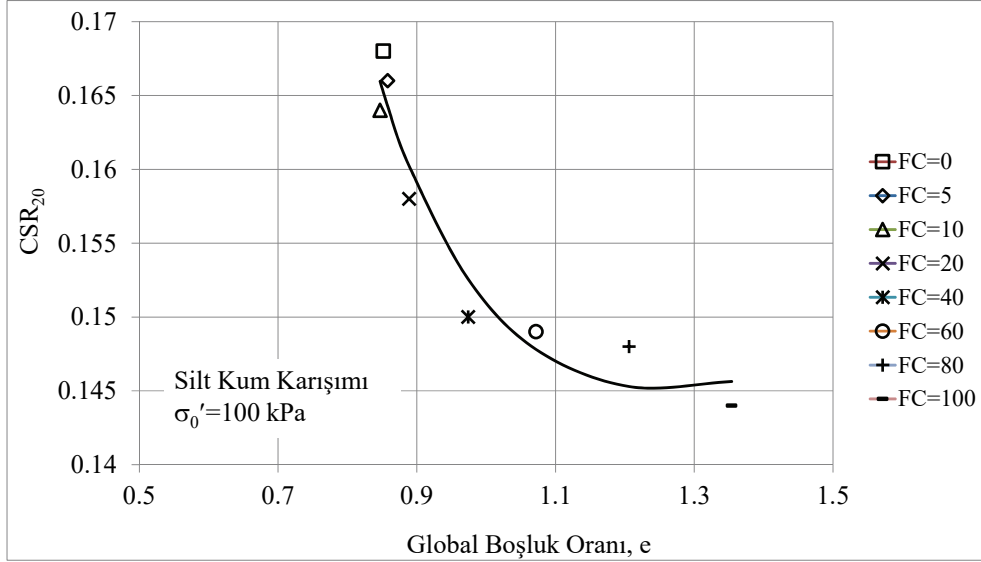
Şekil 7. Silt kum karışımlarında CSR₂₀-İntergranüler- interfine boşluk oranı sıvılaşma davranışı



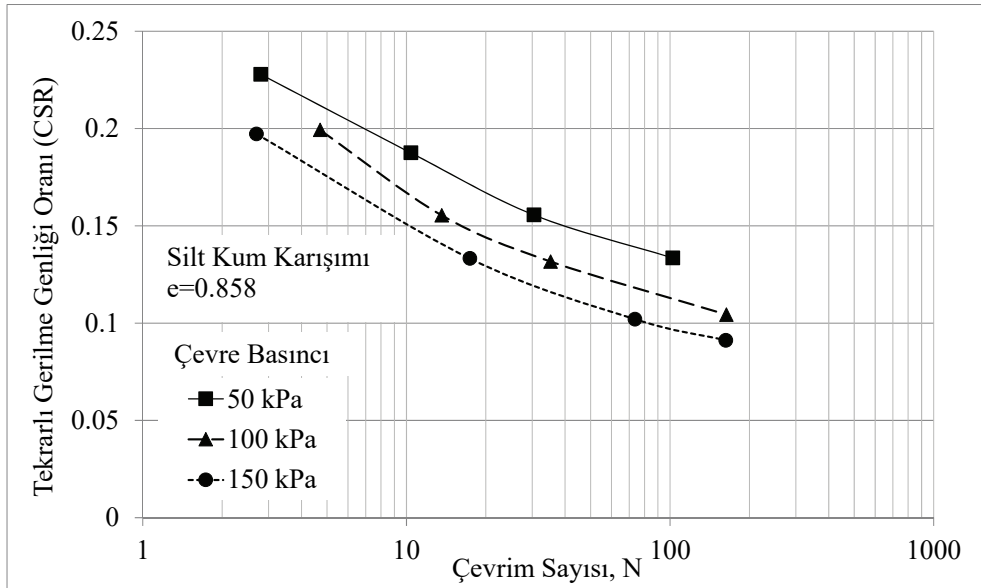
Şekil 8. Silt kum karışımlarında İntergranüler- interfine boşluk oranı için eşik silt içeriği

Farklı silt içeriği değerleri için, silt kum karışımlarının global boşluk oranındaki sıvılaşmaya karşı dayanımı Şekil 9'da gösterilmiştir. 20 çevrime karşılık gelen tekrarlı gerilme genliği oranı "sıvılaşma dayanımı" olarak tanımlanmıştır. Şekil 9'da global boşluk oranındaki artış, silt kum karışımı zeminlerin sıvılaşmaya karşı dayanımını azalttığını göstermiştir. CSR₂₀ için silt kum karışımlarında, Şekil 9'da gösterilen eğrinin deneysel verilerden elde edilen en uygun eğri olduğu görülmektedir. Sabit boşluk oranı e değeri için, silt içeriği arttıkça, intergranüler boşluk oranı değeri e_g, artarken, interfine boşluk oranı değeri e_f, azalmaktadır. Silt içeriği eşik silt içeriğinden daha az ise (FC < FC_{th}), silt kum karışımlarının davranışı kum daneleri tarafından kontrol edilmekte, ince danelerin intergranüler temas etkileri sınırlı olacağı için sıvılaşma dayanımları düşmektedir. Silt içeriği eşik değerin üstünde olursa, kaba daneler sadece bir takviye etkisi yaparak interfine boşluk oranının etkisi önemli hale gelir (Şekil 7 ve Şekil 8).

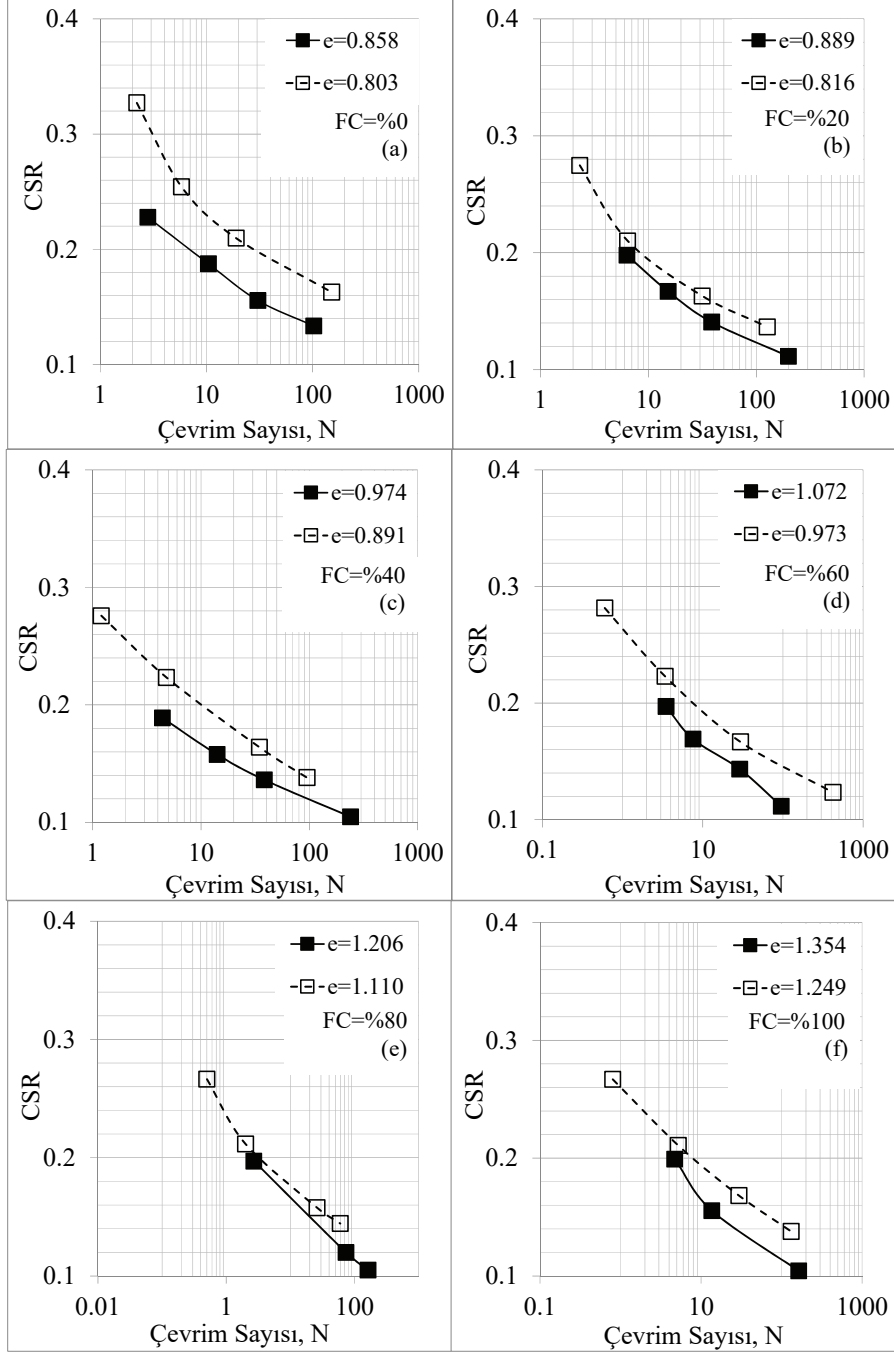
Farklı silt içeriği değerleri için sabit boşluk oranında tekrarlı gerilme genliği oranı (CSR) - çevrim sayısı (N) ilişkisi Şekil 10'da gösterilmiştir. Efektif gerilme değeri 50 kPa'dan 150 kPa'a artarken, belirli çevrim sayısında tekrarlı gerilme genliği oranının azaldığı FC=%0 için gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar literatürdeki diğer sonuçlarla da uyum göstermektedir [15, 17]. Sabit boşluk oranında, tekrarlı gerilme genliği ile çevrim sayısı arasında silt içeriğinin etkisi Şekil 11'de gösterilmiştir. Belirli çevrim sayısında, tekrarlı gerilme genliği oranı (CSR), artan silt içeriğine bağlı olarak eşik silt içeriği değerine kadar artarken, eşik değerden sonra artan silt içeriği ile tekrarlı gerilme genliği oranı (CSR), azalmaktadır.



Şekil 9. Silt kum karışımlarında CSR_{20} - global boşluk oranı için sıvılaşma davranışı



Şekil 10. Silt kum karışımlarında CSR - çevrim sayısı ilişkisi, sabit global boşluk oranı için sıvılaşma davranışına çevre basıncı etkisi



Şekil 11. Silt kum karışımlarında sabit boşluk oranı için CSR – Çevrim sayısı ilişkisinde silt içeriği etkisi ($\sigma'_0 = 100$ kPa)

3.2. Drenajsız Tekrarlı Yükleme İzleyen Yeniden Konsolidasyon Süresince Hacim Değişimi

Deprem yüklerine maruz kalan kumların sıkılaşıma eğilimi gösterdiği bilinmektedir. Deprem sonrasında zemin alt tabakalarında meydana gelen sıkılaşıma ise zemin yüzeyinde toplam ve farklı oturma olarak kendini göstermektedir. Deprem nedeniyle oluşan oturmalar sığ temeller üzerindeki yapılarda ve genellikle sığ derinliklerde yer alan alt yapı sistemlerinde büyük hasarlara yol açmaktadır. Kuru kumlar çok çabuk sıkışır, böylece deprem sonunda oturma hareketi hızla gerçekleşir. Suya doygun kum zeminlerin sıkışması ise ince dane etkisine bağlı olarak daha uzun sürmektedir. Bu tür zeminlerde oturma deprem nedeniyle oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile gerçekleşir. Oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi ince dane oranı, zeminin rölatif sıkılığı, drenaj boyu, efektif çevre gerilmesi gibi parametrelere bağlıdır.

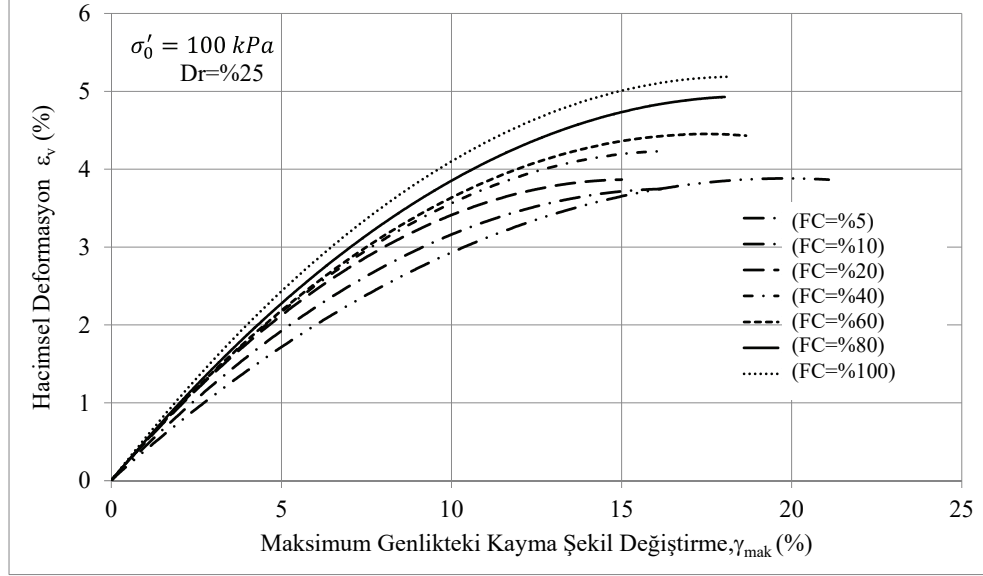
Lee ve Albaisa [23], Tatsuoka vd. [24] ve Ishihara vd. [25], tarafından laboratuvarda kumlarda yapılan dinamik tekrarlı yükleme deneyleri ile aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesinden dolayı beliren hacim değişim davranışını araştırmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda, zeminlerde sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirmeyi zeminlerin birim hacim ağılıklarından ziyade dinamik deneylerde tekrarlı yükler boyunca oluşan maksimum kayma birim deformasyonunun etkilediğini göstermişlerdir. Tokimatsu ve Seed [26], buradan yola çıkarak, sıvılaşma sonrası oturmaların tahmininde kullanılacak bir yöntem geliştirdiler. Daha sonra Ishihara ve Yoshimine [27] sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirmeyi etkileyen temel parametre olarak maksimum kayma birim deformasyonu ile güvenlik katsayısına bağlı olarak zemin yüzeyindeki oturmaların tahmini için bir yöntem geliştirdiler.

Birçok laboratuvar deneyi kumların hacim değişim özellikleri boşluk suyu basıncı gelişiminin dağılması süresince drenajsız koşullardaki tekrarlı kayma gerilmeleri sonucu yapılmıştır. Silt kum karışımı örneklerle dinamik üç eksenli deney aleti ile 100 kPa çevre basıncı altında izotrop olarak konsolide edilmiş ve farklı silt içerikleri ve rölatif sıkılıklar için gerilme kontrollü olarak drenajsız durumda kesme gerilmelerine maruz bırakılmıştır. Tablo 2’de yapılan deneylere ait deney şartları, yükleme koşulları, elde edilen kayma gerilmeleri ve hacimsel deformasyon değerleri gösterilmiştir. Drenajsız durumda yükleme tamamlandıktan sonra artan boşluk suyu basıncının sönmülmesi için drenaj vanaları açılarak zemin örneklerindeki hacim değişimleri ölçülmüştür. Hacim değişimi, dinamik yükleme süresince sıvılaşan zeminlerin oturma karakterleri ile ilgili olduğunu göstermiştir.

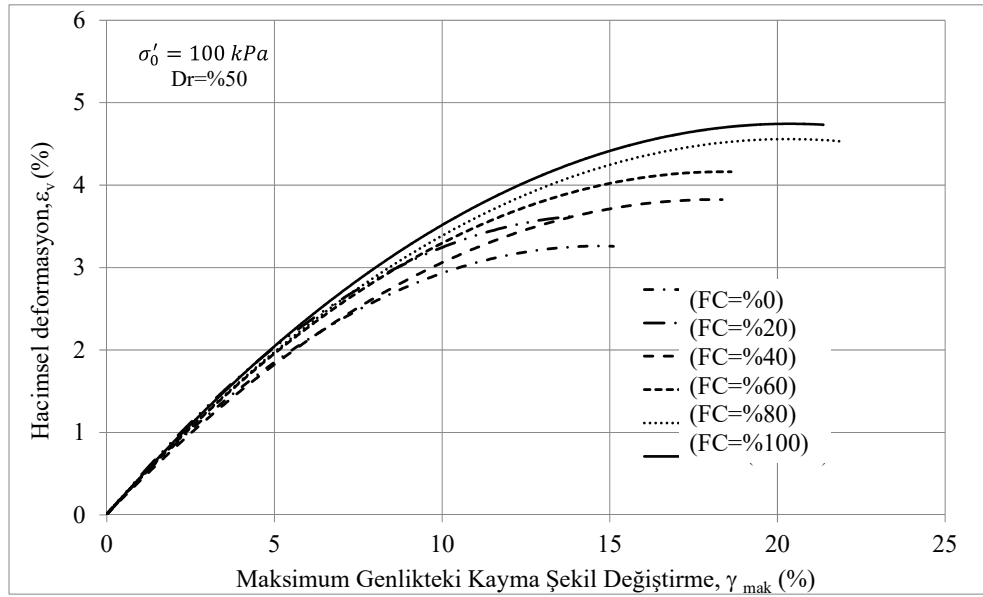
Çalışma kapsamında gerçekleştirilen dinamik üç eksenli deney özet sonuçları drenajsız tekrarlı yüklemelerde elde edilmiştir. Yeniden konsolidasyon süresince hacimsel deformasyona karşılık ϵ_v , maksimum genlikteki kayma deformasyonu, γ_{mak} , çizilmiştir. İki farklı rölatif sıkılıkta ve sekiz farklı silt içeriğinde hazırlanan silt kum karışımı örnekleriyle dinamik üç eksenli deney gerçekleştirilmiş ve böylece elde edilen eğriler Şekil 12 ve Şekil 13’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Deneylerden elde edilen sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme ve güvenlik sayısı değerleri ($\sigma'_3 = 100\text{kPa}$)

Deney No	Silt İçeriği (%)	Tekrarlı Gerilme (kPa)	Tekrarlı Gerilme Genliği Oran (CSR)	Çevrim Sayısı, N	Hacimsel Şekil Değiştirme (%)	Eksenel Şekil Değiştirme (ϵ_a) _{sa} (%)	DA %5 için CSR _{N20} çevrimde elde edilen CSR değerleri	Güvenlik Sayısı $F_f = \text{CSR}_{N20} / \text{CSR}$	Kayma Şekil Değiştirme (%)
1	0	31.123	0.156	30	3.198	7.176	0.167	1.073	10.764
2	0	44.350	0.222	2.5	3.188	10.731	0.167	0.753	16.097
3	0	37.414	0.187	10.5	3.246	8.467	0.167	0.893	12.700
4	0	26.669	0.133	103	3.044	8.824	0.167	1.252	10.148
5	0	21.073	0.105	29	3.003	5.075	0.167	1.585	7.613
6	5	45.111	0.226	8	3.486	10.467	0.164	0.727	15.701
7	5	49.243	0.246	5	3.556	10.687	0.164	0.666	16.031
8	5	25.445	0.127	76.5	3.100	10.898	0.164	1.289	12.533
9	5	34.481	0.172	15.5	3.215	10.114	0.164	0.951	15.171
10	5	20.351	0.102	425	3.080	7.909	0.164	1.612	11.863
11	10	51.543	0.258	1.5	3.896	14.059	0.168	0.652	21.089
12	10	41.802	0.209	3.5	3.752	12.794	0.168	0.804	19.191
13	10	37.000	0.185	10.5	3.960	12.961	0.168	0.908	16.201
14	10	28.292	0.141	53	3.957	8.704	0.168	1.188	13.056
15	20	28.016	0.140	38.5	3.714	8.169	0.157	1.121	12.254
16	20	22.276	0.111	199	3.568	6.971	0.157	1.410	10.456
17	20	33.409	0.167	15	3.661	7.866	0.157	0.940	12.979
18	20	39.434	0.197	6.5	3.804	10.009	0.157	0.796	15.014
19	40	25.943	0.130	38.5	4.398	8.728	0.15	1.156	13.091
20	40	21.516	0.108	241	4.330	8.480	0.15	1.394	12.720
21	40	32.553	0.163	14.5	4.347	10.692	0.15	0.922	14.435
22	40	37.378	0.187	4.5	4.384	10.414	0.15	0.803	15.621
23	60	28.337	0.142	28.5	4.297	8.865	0.151	1.066	13.298
24	60	22.707	0.114	95.5	4.426	7.744	0.151	1.330	11.616
25	60	34.258	0.171	7.5	4.471	11.561	0.151	0.882	17.341
26	60	39.357	0.197	3.5	4.199	12.438	0.151	0.767	18.657
27	80	26.161	0.131	17.5	5.048	9.901	0.15	1.147	14.852
28	80	22.349	0.112	163	5.142	9.835	0.15	1.342	14.753
29	80	39.336	0.197	2.5	5.159	12.097	0.15	0.763	18.146
30	80	24.948	0.125	73.5	4.930	9.820	0.15	1.203	14.730
31	100	31.112	0.156	13.5	4.978	12.018	0.144	0.926	18.026
32	100	20.976	0.105	163.5	5.138	10.111	0.144	1.373	15.167
33	100	26.556	0.133	35.5	4.976	10.234	0.144	1.085	16.886
34	100	39.525	0.198	4.5	4.988	10.504	0.144	0.729	19.432
35	0	41.544	0.208	19	2.890	5.800	0.208	1.001	8.700
36	0	50.941	0.255	6	2.767	6.304	0.208	0.817	9.456
37	0	32.497	0.162	151	2.812	5.719	0.208	1.280	8.578
38	0	65.376	0.327	2.5	2.769	10.075	0.208	0.636	10.125
39	20	54.675	0.273	2.7	3.358	9.356	0.174	0.636	14.034
40	20	41.738	0.209	7	3.631	8.327	0.174	0.834	12.491
41	20	32.605	0.163	32	3.473	7.242	0.174	1.067	10.863
42	20	27.174	0.136	126.5	3.541	7.758	0.174	1.281	10.473
43	40	54.732	0.274	1.5	3.445	12.236	0.179	0.654	15.295
44	40	44.136	0.221	5	3.623	9.424	0.179	0.811	14.137
45	40	32.541	0.163	35	3.640	8.014	0.179	1.100	12.021
46	40	27.491	0.137	95	3.596	8.234	0.179	1.302	12.352
47	60	55.888	0.279	0.5	3.908	12.411	0.176	0.630	18.616
48	60	44.968	0.225	3.5	3.993	11.931	0.176	0.783	17.897
49	60	32.840	0.164	29.5	4.073	9.050	0.176	1.072	13.575
50	60	24.709	0.124	423	4.053	8.779	0.176	1.425	13.168
51	80	52.969	0.265	0.5	4.210	14.609	0.163	0.615	21.913
52	80	41.981	0.210	4	4.230	11.288	0.163	0.777	19.754
53	80	32.779	0.164	26	4.199	9.126	0.163	0.995	17.795
54	80	27.947	0.140	61	4.261	12.799	0.163	1.166	17.278
55	100	27.656	0.138	132	4.649	9.433	0.177	1.280	14.149
56	100	42.043	0.210	5.5	4.552	10.679	0.177	0.842	16.019
57	100	33.712	0.169	30	4.498	9.554	0.177	1.050	14.332
58	100	53.068	0.265	0.5	4.629	14.249	0.177	0.667	19.236



Şekil 12. $D_r = \%25$ için hacimsel deformasyon maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 13. $D_r = \%50$ için hacimsel deformasyon maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi

İki farklı rölatif sıklık için ($D_r = \%25$ ve $D_r = \%50$), yapılan deneylerde hacimsel deformasyona karşılık, maksimum genlikteki kayma deformasyonunun ince dane oranına göre

değişimi gösterilmiştir. Burada sabit maksimum kayma deformasyonu için, ince dane oranı arttıkça hacimsel deformasyonların da arttığı görülmüştür. Literatürde Tatsuoka vd. [28], Sasaki vd. [29], ve Kokusho vd. [30]'de temiz kumlar için dinamik üç eksenli ve burulmalı kesme deneyleri ile hacimsel deformasyon değerinin rölaf sıklık azaldıkça arttığını göstermişlerdir.

Yapılan çalışmada hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu arasında;

$$\varepsilon_v = \log(a + b * \gamma_{\max}) \quad (3)$$

şeklinde bir ilişkisi olduğu saptanmıştır. Burada a ve b parametrelerinin silt içeriğine (FC) bağlı olarak değiştiği görülmüştür. İki farklı rölaf sıklık ve yedi farklı silt içeriğine göre a ve b parametrelerinin değişimi, determinasyon katsayıları ile birlikte Tablo 3 ve Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 3. $D_r = \%25$ için hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu katsayıları

Silt İçeriği (FC)	a	b	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Kalıntıların Kareleri Toplamı
0	1.0031	3.0456	0.9751	0.2798
5	1.0026	2.5905	0.9697	0.3481
10	1.0061	2.3529	0.9525	0.5481
20	1.0005	3.1696	0.9991	0.0087
40	1.0008	4.2507	0.9812	0.2582
60	1.0022	4.6580	0.9659	0.50631
80	1.0005	7.6152	0.9811	0.3551
100	1.0007	9.8097	0.9698	0.6239

Tablo 4. $D_r = \%50$ için hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu katsayıları

Silt İçeriği (FC)	a	b	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Kalıntıların Kareleri Toplamı
0	1.0148	1.6566	0.9367	0.4268
20	1.0014	2.6338	0.9894	0.1038
40	1.0041	2.4749	0.9783	0.2222
60	1.0024	3.4514	0.9858	0.1824
80	1.0009	3.4507	0.9976	0.0299
100	1.0005	5.3346	0.9881	0.1915

Yapılan regrasyon analizleri sonucunda a ve b parametreleri için elde edilen determinasyon katsayısının (R^2) 0.95'den daha büyük olduğu görülmüştür. Elde edilen sabitlerden a parametresinin silt içeriğine bağlı olmaksızın yaklaşık olarak 1 civarında olduğu bulunmuştur. Regrasyon analizi sonucunda b parametresinin ise silt içeriğine bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür. Silt içeriği (FC=%0) iken b parametresinin 3 civarında olduğu ve silt içeriği arttıkça (FC=%100), b değerinin yaklaşık 10 değerini aldığı bulunmuştur.

3.3. Silt Kum Karışımları İçin Maksimum Genlikteki Kayma Deformasyonu ve Güvenlik Sayısı Arasındaki İlişki

Zeminlerin sıvılaşmadan sonra doğan oturmaların tahmin edilmesi için maksimum genlikteki kayma deformasyonlarının bilinmesi gerekir. Bilindiği gibi tekrarlı dayanımı tanımlamak gerekirse bu, belirli sayıda kayma gerilmeleri altında başlangıç çevre gerilmesinin, gelişen boşluk suyu basıncına eşit olduğu durumdaki gereken tekrarlı gerilme oranı olarak ifade edilebilir. Bu durum sıvılaşma'nın başlangıcı veya %100 fazla boşluk suyu basıncı gelişimi olarak tanımlanır. Laboratuvarında bu işlem çift genlikteki eksenel şekil değiştirmenin %5 olduğu duruma ya da 20 çevrime karşılık gelmektedir. Sonuç olarak, sıvılaşma için tanımlanan güvenlik sayısı;

$$G_s = \frac{\tau_{dev,L}}{\tau_{dev}} = \frac{\left(\frac{\sigma_{dl}}{2\sigma'_0}\right)_{20}}{\left(\frac{\sigma_d}{2\sigma'_0}\right)_{20}} = \frac{CSR_L}{CSR} \quad (4)$$

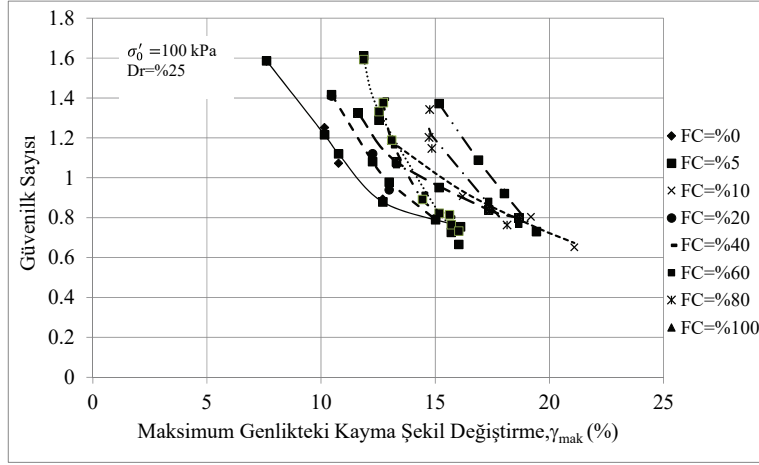
Burada CSR_L : sıvılaşma için gereken $N=20$ çevrime karşılık gelen CSR değeridir. Denklem 4'de σ_{dl} , sıvılaşma başlangıcına sebep olan gerekli eksenel gerilmeyi veya 20 çevrim için %5 çift genlikteki eksenel şekil değiştirmeyi gösterir ve σ_d , eksenel gerilmenin genliğine karşılık deprem kaynaklı kayma gerilmesini göstermektedir. Yukarıdaki denklemde tanımlanan güvenlik sayısının bir'i belirtmesi tekrarlı yumuşamanın %5 çift genlikteki eksenel şekil değiştirme üretme durumu ve güvenlik faktörünün birden az olması %5'den daha az çift genlikteki eksenel şekil değiştirme üretilerek zeminde yumuşama durumunu gösterir. Böylece güvenlik sayısı çift genlikteki eksenel deformasyonun fonksiyonu olarak değerlendirilir ve bir bölgedeki güvenlik sayısı bilinir ise zeminlerdeki sıvılaşma süresince çift genlikteki kayma şekil değiştirmesinin gelişimi bilinebilir. Bu kayma şekil değiştirmesinin yarısı, tek genlikteki eksenel şekil değiştirmenin sıvılaşma esnasında zeminin maksimum kayma şekil değiştirmeye maruz kaldığı kabul edilir.

Dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak, iki farklı rölatif sıkılıktaki ($Dr=%25$ ve $Dr=%50$), ve farklı silt içeriklerindeki silt kum karışımı örnekleri üzerinde yapılan deneylerde güvenlik sayısına karşılık elde edilen maksimum genlikteki kayma şekil değiştirme sonuçları Şekil 14 ve 15'de gösterilmiştir. Şekillerde $Dr=%25$ ve $Dr=%50$ için yapılan deneylerde silt içeriği arttıkça, maksimum genlikteki kayma şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür. Böylece silt içeriği artışının çok daha büyük kayma şekil değiştirme oluşturduğu gözlemlenmiştir.

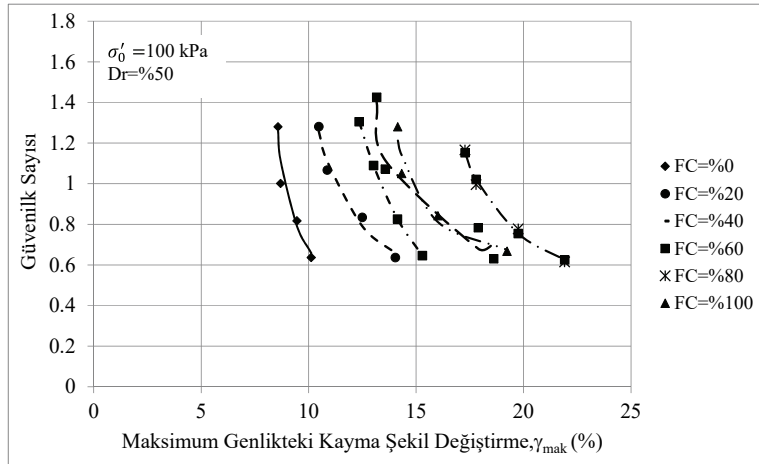
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda güvenlik sayısı ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu arasında;

$$G_s = \frac{\gamma_{\max}}{(a + b * \gamma_{\max} + c * \sqrt{\gamma_{\max}})} \quad (5)$$

şeklinde bağıntı elde edilmiştir. Burada, a, b ve c parametrelerinin silt içeriğine (FC) bağlı olarak değiştiği görülmüştür. İki farklı rölatif sıklık ve yedi farklı silt içeriğine göre a, b ve c parametrelerinin değişimi, determinasyon katsayıları ile birlikte Tablo 5’de gösterilmiştir. Yapılan regrasyon analizleri sonucunda a, b ve c parametreleri için elde edilen determinasyon katsayısının (R^2) 0.92’den daha büyük olduğu görülmüştür.



Şekil 14. $Dr=25$ için güvenlik sayısı maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 15. $Dr=50$ için güvenlik sayısı maksimum kayma şekil değiştirme ilişkisi

Tablo 5. $D_r=50$ için güvenlik sayısı ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu katsayıları

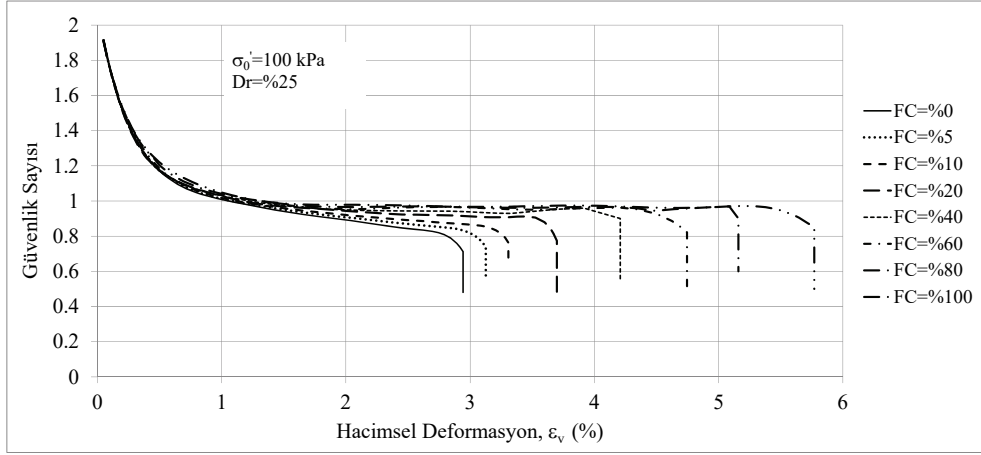
Silt İçeriği (FC)	a	b	c	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Kalıntıların Kareleri Toplamı
0	-583.247	-53.1311	357.1486	0.9237	0.0172
20	-42.4158	2.632625	7.159983	0.9800	0.0046
40	312.1531	31.19776	-195.77	0.9983	0.0004
60	-716.301	-40.6086	347.3401	0.9490	0.0187
80	-189.093	-2.30841	58.69417	0.9916	0.0014
100	-373,164	-17.1754	166.9142	0.9349	0.0136

3.4. Silt Kum Karışımları İçin Güvenlik Sayısı ile Hacimsel Deformasyon Arasındaki İlişki

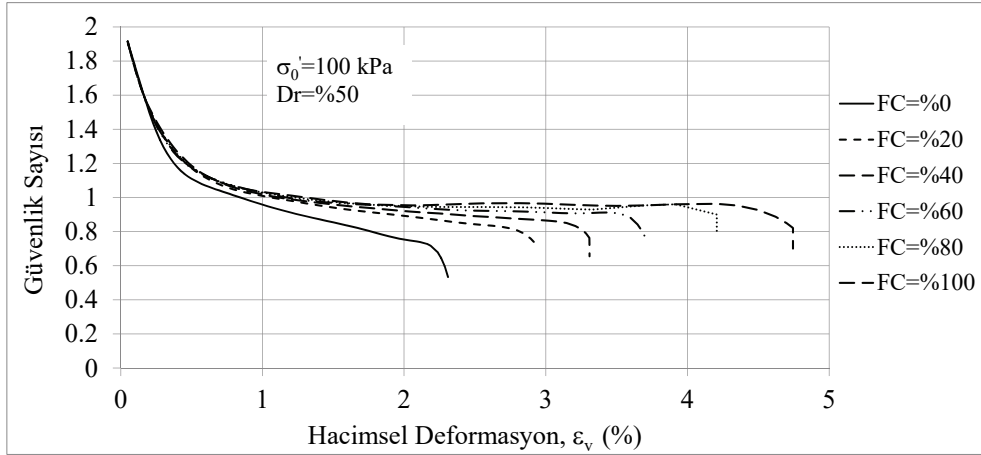
Sıvılaşma analizlerinde geleneksel yöntemlerle güvenlik sayısı biliniyor ise maksimum genlikteki kayma şekil değiştirmenin saptanmasına gerek kalmaz ve sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon direk olarak tahmin edilebilir. Çalışma kapsamında farklı silt içeriği ve rölatif sıkılık değerlerinde güvenlik sayısına karşılık hacimsel deformasyon grafiği Şekil 16 ve 17'de elde edilmiştir. Burada iki farklı rölatif sıkılık için de aynı silt içeriğinde hacimsel deformasyon değerlerinin değişmediğini göstermiştir. Aynı silt içeriğinde ve aynı efektif çevre gerilmesi altında, farklı tekrarlı gerilme genliğinde (CSR) dinamik üç eksenli deney cihazı ile yapılan deneylerde güvenlik sayısı 0.6 ile 1.6 arasında değiştiği görülmüştür. Bu değerlere karşılık deneylerde zemin göçme durumuna gelene kadar tekrarlı yüklere maruz kaldığı için büyük deformasyon değerleri elde edilmiş ve bu değerler için elde edilen hacimsel deformasyonların birbirine çok yakın değerler aldığı görülmüştür. Örnek vermek gerekirse Tablo 2'de gösterilen 1 ve 2 nolu deneyler kıyaslandığında tekrarlı gerilme genliği (CSR) değerleri sırasıyla 0.156 ve 0.222'dir. Bu CSR değerlerine karşılık elde edilen güvenlik sayısı değerleri ise yine sırasıyla 1.073 ve 0.753 olarak hesaplanmıştır. Ancak deney sonunda elde edilen hacimsel deformasyon değerleri sırasıyla 3.198 ve 3.188'dir. Hacimsel deformasyon değerleri arasındaki fark sadece %0.01 kadardır. Böylece aynı silt içeriğinde farklı CSR değerlerine sahip deneylerde birbirine benzer hacimsel deformasyon değerleri elde edilmiştir. Şekil 16 ve 17'de elde edilen grafiklerde aynı silt içeriğinde belirli güvenlik sayısı aralığında hacimsel deformasyonların aynı değerlerde olduğu sonucunu göstermiştir.

Ayrıca silt içeriğinde meydana gelen artışın hacimsel deformasyon değerlerini de aynı ölçüde arttırdığını göstermiştir. Tablo 2'den farklı silt içeriğine sahip deneyler için karşılaştırma yapabilmek amacıyla 1 ve 31 nolu deney setleri karşılaştırılmıştır. 1 nolu deneyde silt içeriği (FC=%0), tekrarlı gerilme genliği (CSR=0.156)'dir. 31 nolu deney içinse deneyde silt içeriği (FC=%100), tekrarlı gerilme genliği (CSR=0.156) yine 1 nolu deneyle aynı değere sahiptir. Deneyler incelendiğinde hacimsel deformasyon değerleri 1 ve 31 nolu deneyler için sırasıyla %3.198 ve %4.978'dir. Hacimsel deformasyon değerleri

arasında %1.780 gibi çok büyük bir fark meydana gelmiştir. Bu durum zeminde silt içeriği arttıkça, ince danelerin su tutma kapasitelerinin arttığını, yükleme sonunda drenaj vanaları açılarak çok daha büyük miktarda su çıkışının meydana geldiğini ve hacim değişimlerinin arttığını göstermiştir. Şekil 16 ve 17’de elde edilen grafikler temiz kumlardan, ince dane içeren saf silte doğru gidildikçe iki farklı rölatif sıklıkta da hacimsel deformasyon seviyelerinin arttığı net olarak görülmüştür.



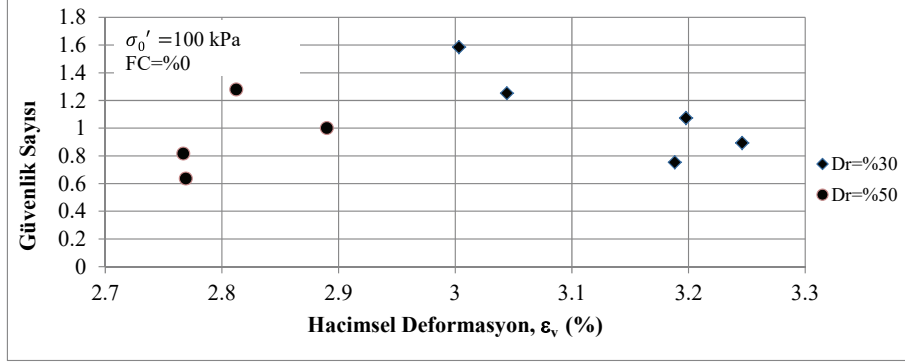
Şekil 16. $Dr=25$ için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi



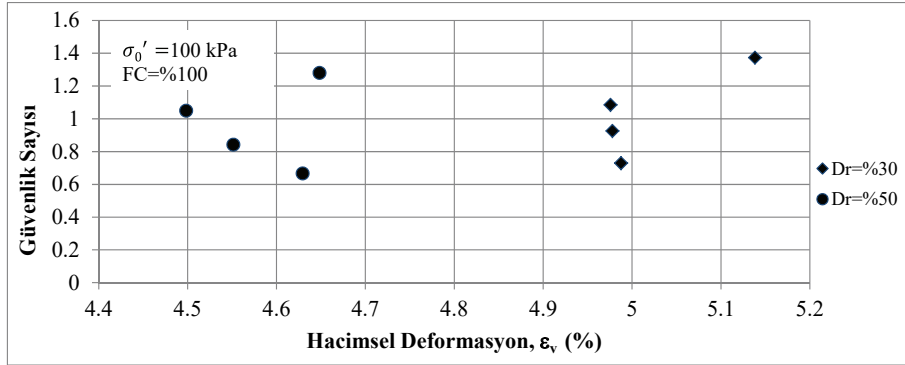
Şekil 17. $Dr=50$ için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi

Aynı silt içeriğine sahip zeminlerde farklı rölatif sıklıklar ($Dr=25$ ve $Dr=50$) için elde edilen güvenlik sayısı ile hacimsel deformasyon grafikleri Şekil 18 ve Şekil 19’da

gösterilmiştir. Şekil 18'de silt içeriği (FC=%0) ve Şekil 19'da ise (FC=%100) değerlerine ait grafikler elde edilmiştir. Her farklı silt içeriği değeri için rölatif sıklık arttıkça güvenlik sayısı ile hacimsel deformasyon ilişkisinde elde edilen hacimsel deformasyon değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum literatürde elde edilen sonuçlar ile uyum göstermektedir.



Şekil 18. FC=%0 için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi



Şekil 19. FC=%100 için güvenlik sayısı hacimsel deformasyon ilişkisi

4. SONUÇLAR

DeneySEL sonuçlar, global, intergranüler ve interfine boşluk oranlarının ayrı ayrı kullanılması açısından, Theveyanagam [10] tarafından önerilmiş kavramsal bir çerçeve ile yorumlanmıştır. Böylece çalışma kapsamında belirtilen parametreler için tatmin edici bir yorum sunar ve gözlenen davranışı makul ve öngörülebilir kılmıştır.

Sabit efektif gerilme altında, N=20 çevrime karşılık gelen tekrarlı gerilme genliği oranı (CSR₂₀) ile hem intergranüler boşluk oranı hem de interfine boşluk oranı değişimi elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre eşik silt içeriği değeri %40 olarak bulunmuştur. Test edilen her karışım için, CSR₂₀ değerinin, artan intergranüler ya da interfine boşluk oranları

için azaldığı görülmüştür. Ancak verilen intergranüler boşluk oranı için, silt içeriği eşik silt içeriğine kadar artarsa CSR_{20} değeri de artar. Yüksek silt içeriği değerlerinde, silt içeriği arttıkça CSR_{20} değerindeki azalma interfine boşluk oranı üzerinden gösterilir. Sabit bir değerdeki intergranüler boşluk oranında, silt içeriği arttıkça, karışımın boşluk oranı azalır ve böylece daha güçlü hale gelir. Bunun aksine, sabit interfine boşluk oranında, silt içeriği eşik değer üzerinde arttıkça, karışımın boşluk oranı artar ve daha zayıf hale gelir. Ayrıca bu çalışmanın deneysel sonuçları, kumların sıvılaşma davranışı üzerinde silt içeriği etkisi ile ilgili diğer çalışmaların bulguları ile genel bir fikir birliği olduğunu göstermektedir.

Yapılan deneylerde, her iki rölatif sıklıkta sabit maksimum genlikteki kayma şekil değiştirme değeri için silt içeriği arttıkça hacimsel deformasyon değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan çalışma sonucunda hacimsel deformasyon ile maksimum genlikteki kayma deformasyonu arasında logaritmik bir ilişki elde edilmiştir. Bu denklemde b değerinin, silt içeriği arttıkça artış gösterdiği bulunmuştur.

Kaynaklar

- [1] Seed, H. B., and Lee K. L., "Liquefaction of Saturated Sands during cyclic Loading" J. Soil Mech. And found. Div., ASCE 92 (6), p105-134, 1966.
- [2] Seed HB, Tokimatsu K, Harder LF, Chung RM. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. J Geotech Eng, ASCE;111(12) p1425-45, 1985.
- [3] Koester JP. In: Prakash S, Dakoulas P, editors. The influence of fines type and content on cyclic strength. Ground failures under seismic conditions, 44. ASCE Publication; p. 17-33, 1994.
- [4] Troncoso, J.H. "Failure Risks of Abandoned Tailings Dams" Proc. Int. Sym. On Safety and Rehabilitation of Tailings Dams, International Commission on Large Dams, Paris, p82-89, 1990.
- [5] Ishihara. Soil behaviour in earthquake geotechnics. Oxford Engng Sci Ser 1993;46.
- [6] Guo, T. and Prakash, S., Liquefaction of Silts and Silt-Clay Mixtures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 8, p706-710. 1999.
- [7] Finn LWD, Ledbetter RH, Guoxi WU. Liquefaction in silty soils: design and analysis. In: Prakash S, Dakoulas P, editors. Ground failures under seismic conditions. ASCE Geotechnical Special Publication, vol. 44, p. 51-76, 1994.
- [8] Polito, C. P., and Martin II, J. R. Effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127, p408-415, 2001.
- [9] Thevanayagam, S. Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124, p479-491. 1998.
- [10] Thevanayagam, S. and Mohan, S. Intergranular state variables and stress strain behavior of silt sand, Geotechnique 50(1),p1-23, 2000.

- [11] Vaid YP. Liquefaction of silty soils. In: Prakash S, Dakoulas P, editors. Ground failures under seismic conditions, 44. ASCE Publication;. p. 1–16, 1994.
- [12] Amini, F., and Qi, G. Z. Liquefaction testing of stratified silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126, p208–217, 2000.
- [13] Belkhatir, M., Arab, A., Della, N., Missoum, H., & Schanz, T. Liquefaction resistance of Chlef river silty sand: Effect of low plastic fines and other parameters. *Acta Polytechnica Hungarica*, 7, p119–137, 2010.
- [14] Stamatopoulos, C. An experimental study of the liquefaction strength of silty sands in terms of the state parameter. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, p662–678 2010.
- [15] Papadopoulou, A., and Tika, T. The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands. *Soils and Foundations*, 48, p713–725, 2008.
- [16] Xenaki, V. C., and Athanasopoulos, G. A. Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: An experimental investigation of the effect of fines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, p183–194, 2003.
- [17] Polito CP. The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils. PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1999.
- [18] Altun, S., Göktepe, A.B. and Akgüner, C., “Cyclic Shear Strength of Silts and Sands Under Cyclic Loading”, ASCE Geotechnical Special Publication No:133: Earthquake Engineering and Soil Dynamics: Recent Findings in Soil Liquefaction, 1365-1375, Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Conference held in Austin, Texas, 2005, (CD Press)
- [19] Yang, S. L., Lacasse, S., and Sandven, R. (Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines. *Geotechnical Testing Journal*, 29, p102–10, 2006.
- [20] Kuerbis, R. H., Negussey, D., and Vaid, Y. PEffect of gradation and fines content on the undrained response of sand. In D. J. A. Van Zyl (Ed.), Fort Collins, CO: Geotechnical Special Publications Hydraulic fill structures. p. 330–345, 1988.
- [21] Dash, H. K., and Sitharam, T. G. Undrained monotonic response of sand-silt mixtures:Effect of nonplastic fines. *Geomechanics and Geoengineering*, 6, p47–58. 2011.
- [22] Dasari, G. R., Ni, Q., Tan, T. S., and Hight, D. W. Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils. *Géotechnique*, 54, p561–569, 2004.
- [23] Lee, K., and Albaisa, A., Earthquake Induced Settlement in Saturated Sands. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Divisions* (100), p.387-406, 1974.
- [24] Tatsuoka, F., Muramatsu M. and Sasaki T., Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, *Soils and Foundations*, 22, p.55-70, 1982.

- [25] Ishihara, K., Tatsuoka, F., and Yasuda, S., Effects of Overconsolidated Sand and Liquefaction Characteristic of Sands Containings Fines. *Dynamic Geotechnical Testing* (654), p.246-264, 1978.
- [26] Tokimatsu, K. and H.B. Seed, Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking, *J. Geot. Engrg.*, 113 (8), p861-878, 1987.
- [27] Ishihara, K. and Yoshimine, M.. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*. Vol. 32(1): p173-188, 1992.
- [28] Tatsuoka, F., Muramatsu M. and Sasaki T.,. Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, *Soils and Foundations*, 22, p.55-70, 1982.
- [29] Kondoh, M., Sasaki, Y. and Matsumoto, H. Effects of fines contents on soil liquefaction strength, *Proceedings Annual Meeting of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tsukuba,Japan 1987.
- [30] Kokusho, T., Yoshida, Y., Nishi, K. and Esashi, Y. Evaluation of Seismic Stability of Sand Layer (Part I) Report 383025, Electric Power Central Research Institute. 1983.
- [31] JGS 0542-2000 (Method for Cyclic Triaxial Test to Determine Deformation Properties of Geomaterials)
- [32] JGS 0541-2000 (Method for Cyclic Undrained Triaxial Test on Soils)
- [33] JGS 0520-2000 (Preparation of Soil Specimens for Triaxial Tests)

