



**Makale / Research Paper**

**Siltli Kumlarda Gerilme Kontrollü ve Deformasyon Kontrollü Sıvılaşma Testlerinin Karşılaştırılması**

Yetiş Bülent SÖNMEZER\*

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale/TÜRKİYE  
bsonmezer@kku.edu.tr

**Received/Geliş:** 18.09.2019

**Accepted/Kabul:** 25.11.2019

**Öz:** Deprem esnasında farklı tane çaplarında ve ince tane içeriğindeki siltli kumların sıvılaşma davranışı aynı olmayıp bu tür zeminlerin sıvılaşma mekanizmasını anlamak geoteknik deprem mühendisliğinin önemli konularından biri olmaya devam etmektedir. Bu amaçla, bu çalışmada iki farklı gradasyondaki 20/30 ve 30/50 kumlarına, %5 ve %30 oranında silt karıştırılarak hazırlanan siltli-kum numuneleri üzerinde, dinamik basit kesme test cihazı kullanılarak deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü testlerin sonuçları arasında anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir. Ancak silt içeriğinin artışı ile hem 20/30 kumu ve hem de 30/50 kumuna ait siltli-kum numunelerinin sıvılaşmaya karşı dirençleri azalmıştır. Ayrıca rölatif sıkılığın artışı ile tüm numunelerin sıvılaşmaya karşı direnci artmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Sıvılaşma, Kum, Silt, Dinamik Basit Kesme Testi

**Comparison of Stress Control and Deformation Controlled Liquefaction Tests in Silty Sands**

**Abstract:** The liquefaction behavior of silty sands with different grain diameters and fine grain content during the earthquake is not the same and understanding the liquefaction mechanism of such soils continues to be one of the important subjects of geotechnical earthquake engineering. For this purpose, deformation controlled and stress-controlled tests were performed on silty-sand samples prepared by mixing 5% and 30% silt to 20/30 and 30/50 sands of two different grades using cyclic simple shear tester. The results showed that there was no significant difference between the results of deformation controlled and stress-controlled tests. However, with the increase of silt content, the resistance to liquefaction of silty-sand samples of both 20/30 sand and 30/50 sand decreased. In addition, the resistance to liquefaction of all samples increased with increasing relative density.

**Keywords:** Liquefaction, Sand, Silt, Cyclic Simple Shear Test

**1. Giriş**

Zemin sıvılaşması, tüm dünyada deprem esnasında zeminden kaynaklı hasarların meydana gelmesinden büyük ölçüde sorumlu olan yıkıcı bir olgudur. Özellikle suya doygun gevşek kum ve plastik olmayan siltli kumlardan oluşan zeminler söz konusu olduğunda sıvılaşma potansiyeli daha da artmaktadır. Suyu doygun zemin kütleli sismik veya dinamik yüklemelere maruz kaldığında drenajsız koşullarda zemin bünyesinde bulunan suda hızlı bir şekilde basınç artışı meydana gelmektedir. Aşırı boşluksuyu basıncı olarak tanımlanan bu su basıncı artışı eğer kısa süre içerisinde sönmülmeyen ise taneler arasındaki efektif gerilmenin azalmasına bağlı olarak zemin mukavemetini kaybetmektedir. Böyle bir durumda zemin bir sıvı gibi davranarak ciddi

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Sönmezer, Y. B., "Siltli Kumlarda Gerilme Kontrollü ve Deformasyon Kontrollü Sıvılaşma Testlerinin Karşılaştırılması" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7 (1); 322-337.

*How to cite this article*

Sönmezer, Y. B., "Comparison of Stress Control and Deformation Controlled Liquefaction Tests in Silty Sands" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (1); 322-337.

deformasyonlara maruz kalmakta ve üzerinde bulunan yapıları (bina, istinat yapısı, köprü, baraj vs) destekleme kabiliyeti azalmaktadır. Bunun sonucu olarak yapılar ciddi hasarlar almakta ve kullanılamaz hale gelmektedir.

Sıvılaşma hasarları nehirler göller ve denizlerin yakınında bulunan yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu bölgelerde yaygın olarak görülmektedir. Genel olarak ince kumlar ve düşük plastisiteli siltli kumlar geçirimsizliklerinin düşük olması nedeniyle drenajsız koşulların oluşmasını sağlamakta ve sıvılaşmaya karşı daha hassas olmaktadır. Bu nedenle günümüzde araştırma çalışmaları çoğunlukla bu tür zeminlerin sıvılaşma duyarlılığına ve test parametrelerinin değiştirilmesine odaklanmıştır.

İnce tane (silt) içeriğinin zeminlerin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisini araştırmak için birçok laboratuvar araştırması yapılmıştır. Bu çalışmalardan kayma birim deformasyonunun aşırı boşluksuyu basıncı üretiminde ve zeminin sıvılaşmasında önemli rol oynadığı bilinmektedir. Dolayısıyla deformasyon kontrollü test (DKT) ve gerilme kontrollü testlerden (GKT) elde edilen sonuçların karşılaştırılmasının zeminlerin sıvılaşma direnci üzerinde ince tane içeriği etkisi hakkında daha fazla bilgi edinmemize yardımcı olabileceği düşünülebilir. Bu yüzden bu çalışma, ince tane içeriğinin kumun sıvılaşma direnci üzerindeki etkisini araştırması ve aynı zamanda siltli kum numuneleri üzerinde deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü testler arasındaki karşılaştırma sonuçlarını ortaya koymasından önemlidir.

Siltli kumların ince tane içeriği, aşırı konsolidasyon oranı ve döngüsel ön yükleme vs. gibi sıvılaşma duyarlılığını etkileyen faktörler üzerinde son zamanlarda önemli miktarda çalışma yapılmıştır [1-3]. Yapılan çalışmalar kumun sıvılaşma direncinin sabit boşluk oranında veya rölatif sıklıkta artabileceğini veya azalabileceğini göstermiştir. Amini ve Qi [4], hem homojen hem de tabakalı zemin koşulları için sabit bir rölatif sıklıkta ve/veya sabit konsolidasyon sonrası boşluk oranında silt içeriğindeki artış ile kumun sıvılaşma direncinin arttığını belirtmişlerdir. Chien vd. [5] ise sabit boşluk oranında yapılan karşılaştırmaya dayanarak tam tersi bulguları bildirmişlerdir.

Xenaki ve Athanasopoulos [6], kumun sıvılaşma direncinin, ince tane içeriğindeki artışla azaldığını bildirmişlerdir. Bununla birlikte, Papadopoulou ve Tika [7], sabit boşluk oranında kumların sıvılaşma direncinin ince tane oranının belirli bir eşik değere kadar artırılmasıyla azaldığını sonrasında ince tane içeriğinin daha da artırılmasıyla tersine bir eğilimin olduğunu belirtmişlerdir. Dash ve Sitharam [8], sabit rölatif sıklıkta yaklaşık %5 silt içeriğine kadar sıvılaşma direncinin arttığını ve ardından sınır silt içeriğine kadar sert bir düşüş olduğunu ve bundan sonra sabit bir direnç olduğunu ifade etmişlerdir. Sitharam vd. [9] sabit boşluk oranında sıvılaşma direncini ve zeminlerin sıvılaşma sonrası kayma mukavemetini araştırmışlardır. Zeminlerin sıvılaşma direnci ve sıvılaşma sonrası kayma mukavemetinin belirli bir ince tane içeriğine kadar azaldığı ve daha sonra da arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, zeminin sıvılaşma direncinde ve sıvılaşma sonrası direncindeki bu değişikliklerin rölatif sıklıktaki değişimlerle yakından ilişkili olduğunu gözlemlemişlerdir.

Mominul vd. [10] Piyain nehri kumu ve silt karışımları üzerinde yaptıkları çalışmalarında kumun sıvılaşma direncinin silt içeriğinde %30'a varan artışla azaldığı sonucuna varmışlardır. Emdadul ve Jahangir [11] tarafından yapılan bir dizi gerilme kontrollü dinamik üç eksenli test sonucunda ise başlangıçta eşik silt içeriğine ulaşana kadar silt içeriğindeki artışla aşırı boşluksuyu basıncının arttığını ortaya koymuşlar ve sonrasında eğilimin tersine döndüğünü açıklamışlardır. Herna'ndez vd. [12], dinamik içi boş silindirik burulma kesme aleti ile drenajsız testler yapmışlar ve ince tane içeriğinin eşik bir değere yükseldiğinde sıvılaşma direncinin azaldığını ancak sonrasında ise

arttığını ortaya koymuşlardır. Yassine vd. [13], %15'e kadar düşük plastisiteli siltlerin siltli kum karışımları üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuçlar üç tip kum malzemesine eklenmiş ince tane içeriğinin Zemmouri kumu için sıvılaşma direncini arttırdığını, ancak Rass ve Chief kumları için sıvılaşma direncini azalttığını veya değiştirmedeğini göstermiştir.

Zeminlerin sıvılaştırma potansiyelini değerlendirmek için üç genel yaklaşım vardır; Gerilmeye dayalı yaklaşım [14], Birim deformasyona dayalı yaklaşım [15] ve Enerjiye dayalı yaklaşımdır [16]. Gerilmeye dayalı yaklaşımda uygulanan tekrarlı yükün maksimum kesme gerilmesinin farklı değerleri [14, 17] ve birim deformasyona dayalı yaklaşımda eşdeğer döngü sayısı kavramı [18] gibi ortaya çıkan bazı belirsizlikler ve eksiklikler nedeniyle bu çalışmada test edilen numunelerin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için enerjiye dayalı yaklaşım kullanılmıştır.

Enerjiye dayalı yaklaşım, zeminin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için ilk defa 1970'lerde gerilmeye dayalı yaklaşıma alternatif olarak önerilmiş [16] ve daha sonra sürekli olarak geliştirilmiştir [19-22]. Bu yaklaşımda sıvılaşma olsun veya olmasın yükleme sürecinde birim hacimde biriken enerji ilave boşluksuyu basıncının gelişmesiyle doğrudan ilişkilidir. Parçacıklarının kalıcı olarak yeniden düzenlenmesiyle ilişkilendirilen birim hacimde biriken enerji ( $J/m^3$ ), bir döngü sırasında geliştirilen histerez döngü içinde kalan alan olarak tanımlanmaktadır [22]. Sıvılaşmayı değerlendirme de birim enerjinin kullanılması akılcı bir çözümdür çünkü sıvılaşma enerjisi tamamen uygulanan kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonuna bağlıdır [23]. Birim hacim başına sıvılaşma enerjisini değerlendirmek üzere geçmişte yapılmış bazı deneysel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Simcock vd. [24], uniform kumlarda aşırı boşluksuyu basıncı ve zeminde sıvılaşma başlangıcına kadar harcanan enerji arasındaki ilişkiyi açıklamak için bir dizi dinamik üç eksenli test gerçekleştirmişlerdir. Aşırı boşluksuyu basıncı ve harcanan enerji arasında foksiyonel bir ilişki olduğunu ve bu ilişkinin döngüsel deviatör gerilmeye bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Polito vd. [25] tarafından yapılan çalışmada ise izotropik olarak konsolide edilmiş kum numuneleri üzerinde ilave boşluksuyu basıncı ve sıvılaşma başlangıcına kadar harcanan enerji arasında farklı yükleme şekillerinin etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, bir dizi gerilme kontrollü dinamik üç eksenli test gerçekleştirmişlerdir. Sinusoidal yüklemeye ek olarak üçgen, kare, düzenli simetrik ve düzensiz asimetrik farklı yükleme şekilleri için sıvılaşmaya neden olan yükleme döngüsü sayısında büyük farklılık olmasına rağmen, sıvılaşma başlangıcında normalize edilmiş birim hacim başına harcanan enerjinin yükleme şekline bağımsız ancak yükleme süresine ise az da olsa bağımlı olduğunu belirtmişlerdir.

Kumun ince tane içeriğinin doğal yapısı, derecelenmesi, partikül boyutu, rölatif sıklığı, boşluk oranı vs. gibi faktörler analiz sonuçlarını etkileyebilmektedir. Plastik olmayan silt içeriğine sahip kumların sıvılaşma hassasiyetini etkileyen bu çeşitli faktörler nedeniyle sıvılaşma davranışlarının nasıl olduğu henüz kesin değildir ve birçok çelişkili sonuç bildirilmektedir. Bu nedenle bu çalışma da %5'ten %30'a kadar plastik olmayan silt içeriğine sahip iki farklı kumun (20/30, 30/50) sıvılaşma davranışı üzerine odaklanılmıştır. Bu amaçla dinamik basit kesme testi kullanılarak plastik olmayan siltli kumlar üzerinde sabit hacim koşullarında hem gerilme kontrollü hem de deformasyon kontrollü 16 test gerçekleştirilmiş ve sonuçları verilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada iki farklı gradasyonda 20/30 ve 30/50 kumları kullanılmıştır. Kumlar uniform derecelenmiş köşeli tanelerden oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan plastik olmayan silt kumla %5

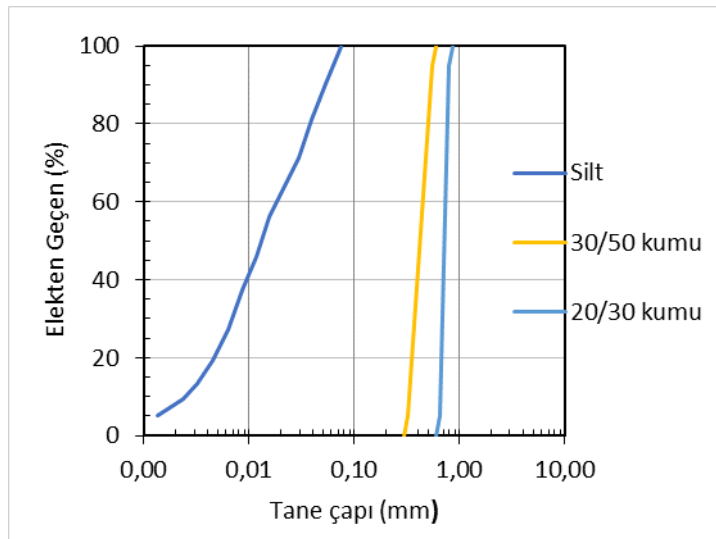
ve %30 oranlarında karıştırılarak siltli kum karışımı oluşturulmuştur. Kumların ve siltin tane büyüklüğü dağılımı ve özgül ağırlıkları sırasıyla ASTM D6913 [26] ve ASTM D854 [27] standartları kullanılarak belirlenmiş olup ve Tablo 1 ve Şekil 1’de verilmiştir.

ASTM D4253 ve D4254 standartları en fazla %15 ince tane içeriğine sahip kumların max. ( $e_{max}$ ) ve min. ( $e_{min}$ ) boşluk oranlarının belirlenmesi için önerilmesi sebebiyle bu çalışmada siltli kum numunelerinin max. ve min. boşluk oranlarının belirlenmesinde Lade vd. [28] tarafından önerilen metot kullanılmıştır. Çalışma kapsamında tüm numunelerin hazırlanmasında ıslak tokmaktama metodu kullanılmıştır. Ladd [29] tarafından bu metodun iyi, kabul edilebilir ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Bu metotta istenilen rölatif sıklık için gerekli siltli kum yaklaşık %8 su ile karıştırılmakta ve mold içerisine tabaka tabaka serilerek hafifçe tokmaklanmaktadır. Bu metoda göre hazırlanan numuneler daha sonra test cihazına yerleştirilerek 100 kpa efektif gerilme altında konsolide edilmiştir. Test edilen tüm numunelerin konsolidasyon sonrası rölatif sıklıkları dikkate alınmıştır.

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan kumların ve siltin tane ve fiziksel özellikleri

Özellik	Değer		
	20/30 kumu	30/50 kumu	Silt
USCS sınıflandırma sembolü	SP	SP	ML
Ortalama tane çapı, $D_{50}$ (mm)	0.72	0.42	0.012
Özgül yoğunluk, $G_s$	2.69	2.69	2.7
Max. boşluk oranı ( $e_{max}$ )	0.9	0.95	--
Min. boşluk oranı ( $e_{min}$ )	0.72	0.74	--

Dinamik basit kesme testinde deneyler “drenajsız” ve “drenajlı sabit hacim” şartlarında deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü olarak yapılabilmektedir. Drenajlı sabit hacim testinde, numunenin yüksekliği deney sırasında değişmediği için sabit hacim, numune üzerindeki efektif gerilmenin büyüklüğü ayarlanarak korunmaktadır. Deney esnasında drenaj sağlandığı için aşırı boşluksuyu basıncı oluşmamakta fakat drenajsız teste eşdeğer boşluksuyu basıncı düşey efektif gerilmedeki değişimden tahmin edilmektedir [30].

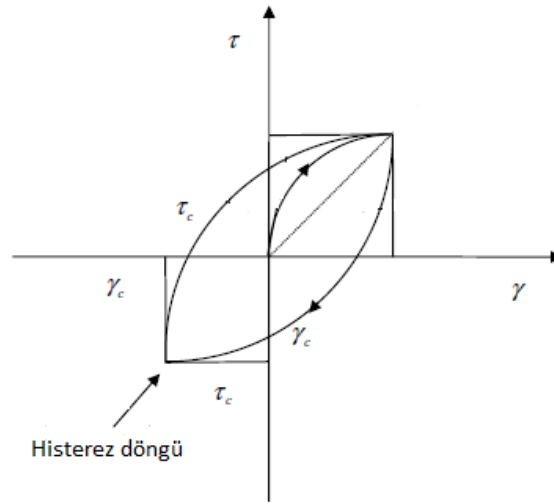


**Şekil 1.** Çalışma kapsamında kullanılan kumların ve siltin tane dağılım eğrileri

Birçok araştırmacı sabit-hacim kesme testinde efektif gerilmedeki artış ve azalışın, eşdeğer bir

drenajsız kesme testinde, aşırı boşluksuyu basıncındaki artış ve azalışı benzetebileceğini göstermiştir [31-33]. Siltler düşük geçirimsizlikleri nedeniyle suya doyurulmaları zordur ve ayrıca boşluksuyu basıncının uniform dağılmasında problemler yaşanabilmektedir [34]. Dolayısıyla sabit-hacim metodu özellikle siltli zeminler için avantajlıdır çünkü numunenin suya doyurulması aşaması elimine edilmekte ve testler kuru koşullarda gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada yapılan testler Şekil 3’de verilen dinamik basit kesme test aleti kullanılarak drenajsız sabit-hacim koşullarında deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında enerjiye dayalı yaklaşım kullanılmıştır. Tekrarlı yükleme koşulları esnasında zemin parçacıklarının yeniden düzenlenmesi ve yerleşmesi ile ilgili olan enerji, sıvılaşmaya yol açan belli koşullar altında sabit bir miktar olarak varsayılmaktadır [20]. Tipik bir tekrarlı yük testi, kayma gerilmesi, kayma birim deformasyonu ve boşluk suyu basıncı verilerini sağlamaktadır. Test sonuçlarından kayma gerilmesi-kayma birim deformasyonu histerez döngüsü zamanın bir fonksiyonu olarak Şekil 2’de gösterildiği gibi elde edilebilmektedir. Her bir yükleme döngüsündeki birim deformasyon enerjisi Şekil 2’deki histerez döngü içinde kalan alana eşdeğer olmaktadır [35, 36, 22] .



Şekil 2. Doğrudan basit kesme altında tipik histerezis döngüsü [38]

Her döngüdeki enerji ve bu enerjilerin sıvılaşma başlangıcına kadarki toplamı, zeminin sıvılaşma enerjisi olarak tanımlanmaktadır [37]. Literatürde tipik histerezis döngü içindeki alan hesaplanırken Eşitlik 1’de verilen bağıntı sıklıkla kullanılmaktadır.

$$\delta W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\tau_n + \tau_{n+1})(\gamma_{n+1} - \gamma_n) \quad (1)$$

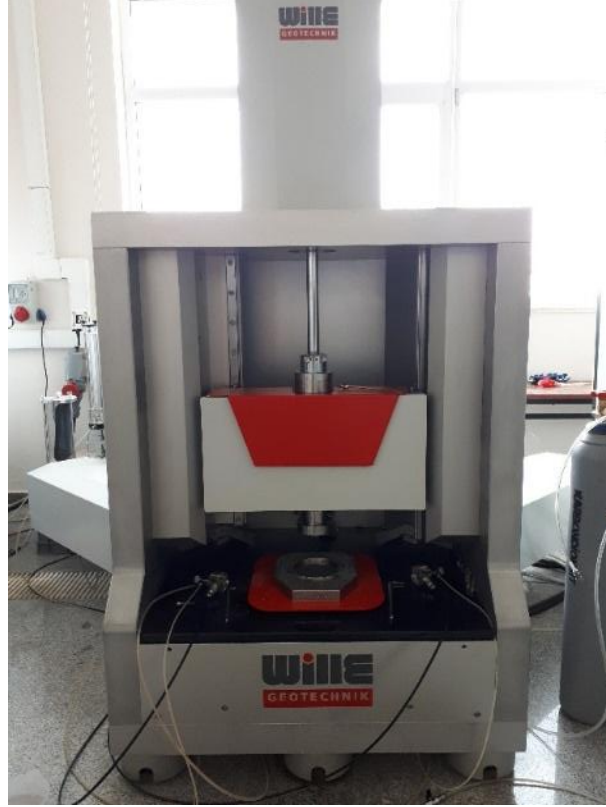
Burada;  $\tau$  = kayma gerilmesi,  $\gamma$  = kayma birim deformasyonu ve  $n$  = sıvılaşmaya kadar kaydedilen döngü sayısıdır. 1. döngüden sıvılaşmanın meydana geldiği  $n$ . döngüye kadar her döngü için harcanan enerji Eşitlik 1’de formül kullanılarak hesaplanmakta ve bu enerjiler toplanarak numunenin toplam sıvılaşma enerjisi ( $J/m^3$ ) belirlenmektedir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında %30 ve %50 rölatif sıklıkta, %5 ve %30 oranında ince tane (silt) içeriğinde hazırlanan siltli-kum numuneleri üzerinde sabit hacim koşullarında bir dizi deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü dinamik basit kesme testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 2’de

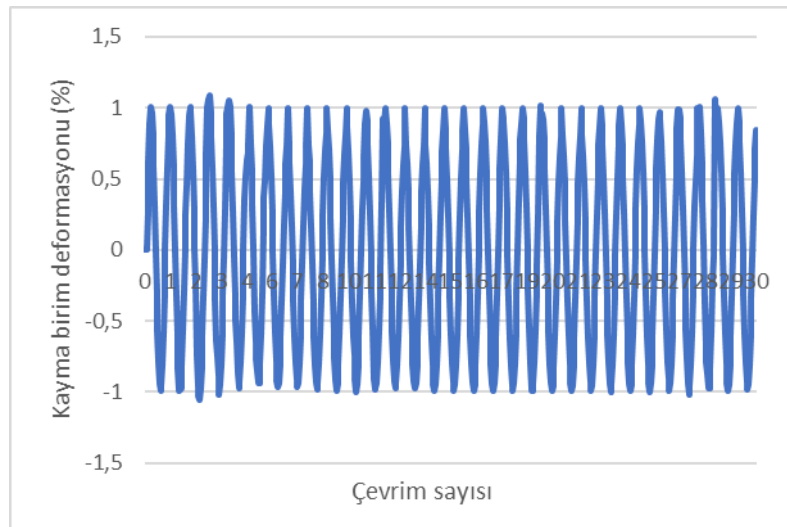
verilmiştir. 20/30 kumunda %1 birim deformasyon ve 0.1 Hz frekans altında deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen %30 silt içeriğine sahip tipik bir testin sonuçları Şekil 4’de verilmiştir.

Deformasyon kontrollü testlerde kayma birim deformasyonu deneyin başından sonuna kadar sabit olarak uygulanmakta ve test esnasında düşey efektif gerilme sıfıra ulaşana kadar teste devam edilmektedir.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan dinamik basit kesme test aleti

20/30 kumunda 0.1 Hz frekansta gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilen %30 silt içeriğine sahip tipik bir testin sonuçları ise Şekil 5’de verilmiştir. Teste ya efektif gerilme sıfıra ulaşana kadar ya da çift yönlü amplitüt değeri %6 olana kadar devam edilmektedir [39].



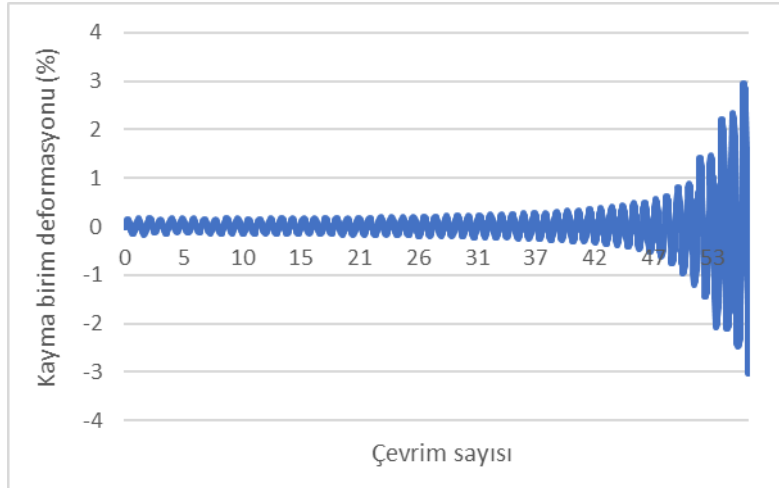
Şekil 4. %50 rölatif sıklıkta deformasyon kontrollü testin kayma birim deformasyonu çevrim sayısı ilişkisi

Test sonunda kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonu verileri cihazın yazılımı tarafından kaydedilmektedir. Bu veriler kullanılarak elde edilen tipik bir deneyin kayma gerilmesi kayma birim deformasyon grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Her çevrimdeki enerji ve bu enerjilerin sıvılaşma başlangıcına kadarki toplamı numunelerin sıvılaşma enerjisi olarak tanımlanmaktadır [37]. Çalışma kapsamında yapılan tüm testlerde ilgili testin kayma gerilmesi kayma birim deformasyonu verileri kullanılarak numunelerin sıvılaşma enerjileri Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

**Tablo 2.** Çalışma kapsamında yapılan testlerin sonuçları

Kum türü	Test tipi	Rölatif sıklık	İnce tane oranı	Enerji (kPa)
20/30	GKT	30%	5%	5237
20/30	GKT	30%	30%	1298
20/30	DKT	30%	5%	4681
20/30	DKT	30%	30%	1450
20/30	GKT	50%	5%	8935
20/30	GKT	50%	30%	5044
20/30	DKT	50%	5%	8712
20/30	DKT	50%	30%	4262
30/50	GKT	30%	5%	2999
30/50	GKT	30%	30%	1208
30/50	DKT	30%	5%	3398
30/50	DKT	30%	30%	1307
30/50	GKT	50%	5%	8230
30/50	GKT	50%	30%	3105
30/50	DKT	50%	5%	8507
30/50	DKT	50%	30%	3260

GKT: Gerilme kontrollü test, DKT: Deformasyon kontrollü test

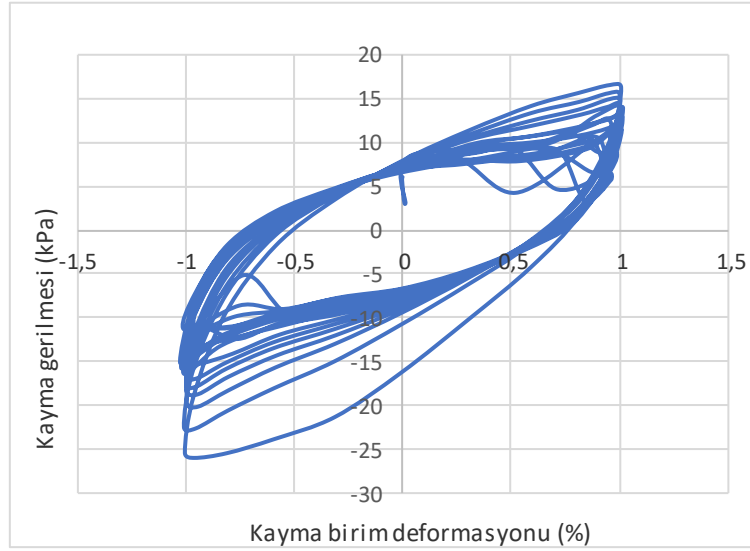


**Şekil 5.** %50 rölatif sıklıkta gerilme kontrollü testin kayma birim deformasyonu çevrim sayısı ilişkisi

Şekil 7a'da gerilme kontrollü olarak yapılan 20/30 kumuna ait %5 ve %30 silt içeriğinde %30 ve %50 rölatif sıklıktaki numunelerin çevrim sayısı sıvılaşma enerjisi ilişkisi verilmiştir. Görüldüğü gibi tüm numunelerde başlangıçta artan çevrim sayısı ile birlikte sıvılaşma enerjisi lineer olarak artmaktadır. Ancak numune sıvılaşmaya yaklaştıkça deformasyonların daha da artması sebebiyle sıvılaşma enerjisi hızla artmaktadır. Artan deformasyonlar sebebiyle histerez döngünün alanı

büyümekte ve buna bağlı olarak sıvılaşma enerjiside artmaktadır. Bu durum gerilme kontrollü testlerde tipik olarak gözlemlenmektedir. Şekil 7b’de 30/50 kumuna ait %5 ve %30 silt içeriğinde %30 ve %50 rölatif sıklıktaki numunelerin çevrim sayısı sıvılaşma enerjisi ilişkisi verilmiştir. 20/30 kumuna benzer şekilde 30/50 kumunda da silt içeriğinin artışı sıvılaşma enerjisini azaltırken rölatif sıklığın artışı sıvılaşma enerjisini artırmaktadır.

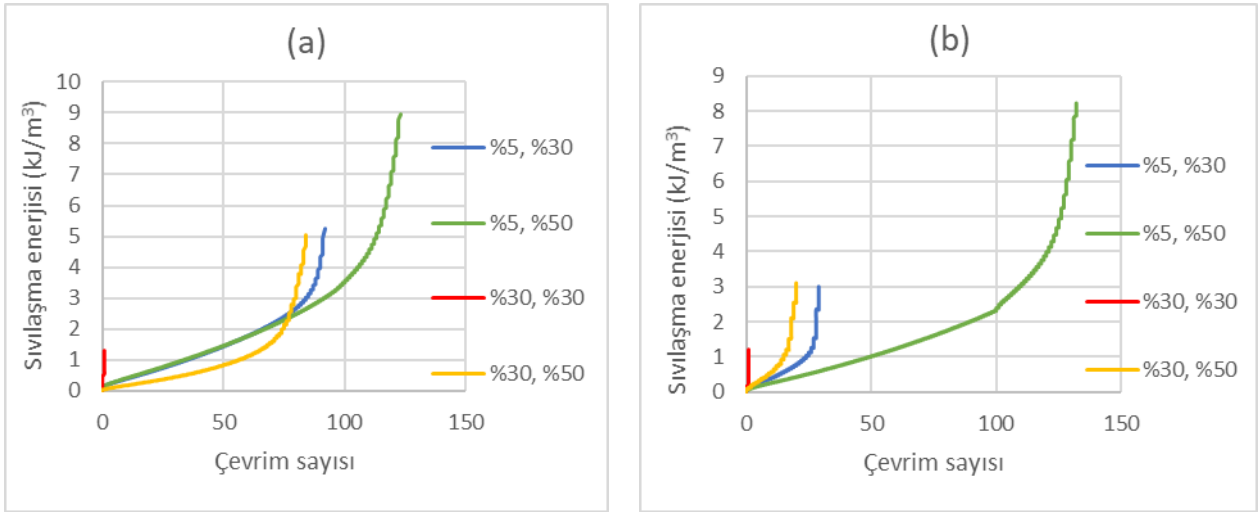
Şekil 8a’da 20/30 kumuna ait Şekil 8b’de ise 30/50 kumuna ait, deformasyon kontrollü olarak yapılan %30 ve %50 rölatif sıklıkta ve %5 ve %30 silt içeriğine sahip numunelerin sıvılaşma enerjisi çevrim sayısı ilişkisi verilmiştir.



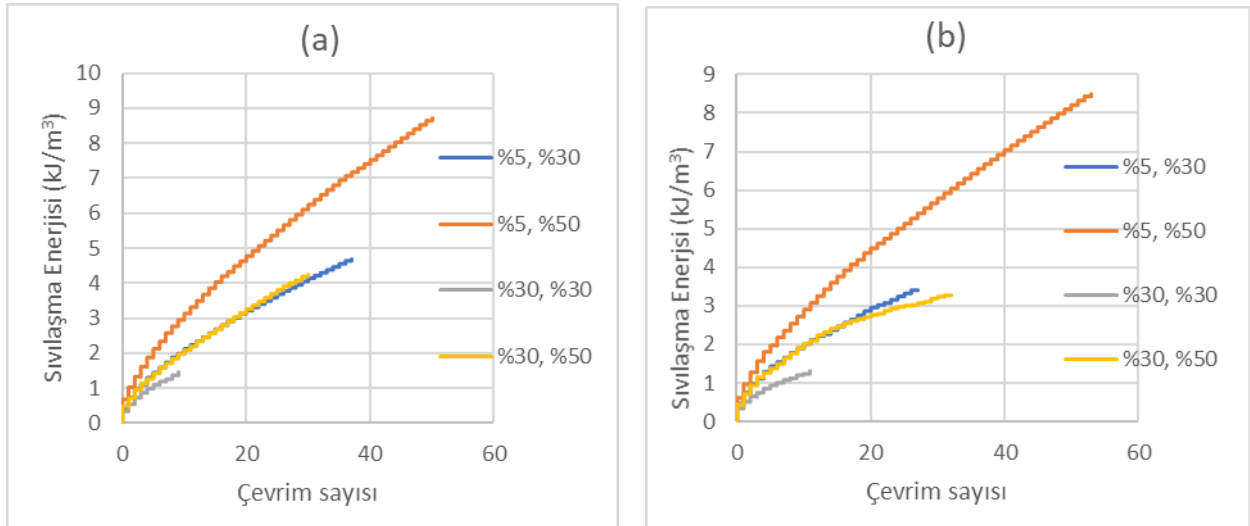
**Şekil 6.** Deformasyon kontrollü olarak yapılan tipik bir testin kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonu histerez döngüsü

Deformasyon kontrollü testlerde gerilme kontrollü testlerden farklı olarak kayma birim deformasyonu testin başından sonuna kadar sabit olarak uygulanmaktadır. Bu testlerde Şekil 8a ve 8b de görüldüğü üzere sıvılaşma enerjisindeki değişim başlangıçta daha hızlı iken daha sonra lineere yakın bir artış gözlenmektedir. Bu durum kayma gerilmesinin artan çevrim sayısı ile azalmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla histerez döngüsünün alanı azalmakta ve sıvılaşma enerjisindeki artış artık eskisi kadar hızlı olmamaktadır. Şekil 9a’da %50 rölatif sıklıkta 20/30 kumuna ait ve Şekil 9b’de 30/50 kumuna ait %5 ve %30 silt içeriğindeki numunelerin gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü testlerin sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü testlerde çevrim sayısı ilişkisi farklı olsa bile nihahi kümülatif sıvılaşma enerjileri birbirine çok yakın değerler vermektedir. Bu durum test yönteminin sıvılaşma enerjisi üzerinde sınırlı etkisi olduğunu göstermektedir. Aralarında anlamlı bir fark bulunmamaktadır.





**Şekil 7.** %5 ve %30 silt içeriğinde, %30 ve %50 rölatif sıklıkta gerilme kontrollü olarak yapılan testlerin sıvılaşma enerjisi çevrim sayısı ilişkisi **a)** 20/30 kumu **b)** 30/50 kumu

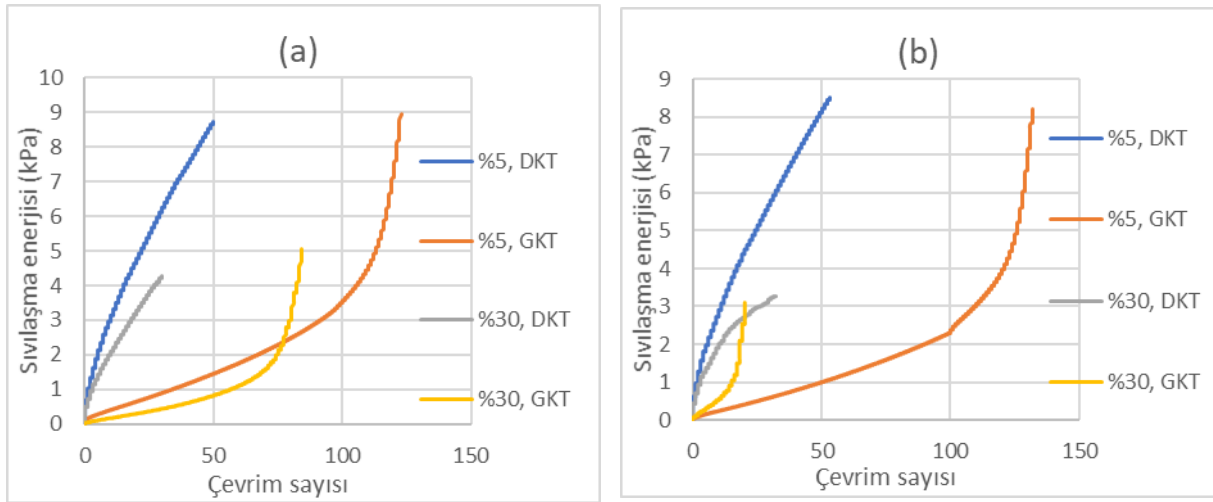


**Şekil 8.** %5 ve %30 silt içeriğinde, %30 ve %50 rölatif sıklıkta deformasyon kontrollü olarak yapılan testlerin sıvılaşma enerjisi çevrim sayısı ilişkisi **a)** 20/30 kumu **b)** 30/50 kumu

GKT ve DKT testlerinin grafiksel değerlendirmesinde sıvılaşma enerjileri arasında anlamlı bir fark olmamasına rağmen bu durumu istatistiksel olarak doğrulamak için çalışma kapsamında GKT ve DKT testlerinin sıvılaşma enerjisi üzerindeki etkisi varyans analiz yapılarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla varyans analizinde  $h_0$  ve  $h_1$  hipotezleri kurulmuştur.

- $h_0$  : Ortalamalar arasında fark yok
- $h_1$  : En az bir ortalama diğerlerinden farklı

İki farklı test yönteminde (GKT, DKT) sıvılaşma enerjisi değerlerinde anlamlı bir farkın olup olmadığına bakılırken tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılmış olup %95 güven aralığına göre sonuçlar değerlendirilmiştir. Varyans analizinin uygulanabilmesi için farklı testlere ait sıvılaşma enerji değerlerinin normal dağılıma uyması gerekmektedir. Farklı normallik testleri bulunmakta olup, örnek sayısının 30'dan az olmasından dolayı burada Shapiro-Wilk testi kullanılmıştır. İki farklı teste ait Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları Tablo 3'de verilmiştir.



**Şekil 9.** %50 rölatif sıklıkta, %5 ve %30 silt içeriğinde gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü testlerin karşılaştırılması **a)** 20/30 kumu **b)** 30/50 kumu

Shapiro-Wilk testi sonuçlarında anlamlılık değeri olan sigmalara bakıldığında eşik anlamlılık değeri olan 0.05'den büyük olduğu için testlere ait sıvılaşma enerjisi değerleri normal dağılıma uygundur. Varyans homojenlik testi olan Levene testi ile ANOVO testi sonuçları Tablo 4'de verilmiştir. Homojenlik testine göre hesaplanan anlamlılık değeri 0.789 eşik anlamlılık değeri olan 0.05'den büyük olduğu için iki test arasında anlamlı bir farklılık yoktur, öyleyse varyanslar homojenliği sağlanmıştır.

**Tablo 3.** Normallik testi sonuçları

	Test tipi	Shapiro-Wilk		
		İstatistik	Örnek Sayısı	Sigma
Sıvılaşma Enerjisi	GKT	0.184	8	0.351
	DKT	0.217	8	0.172

ANOVO testinde anlamlılık değeri 0.789 eşik anlamlılık değeri olan 0.05'den büyük olduğu için  $h_0$  hipotezi kabul edilir. Diğer bir deyişle GKT ve DKT testleri arasında sıvılaşma enerjisi değeri bakımından anlamlı bir fark yoktur.

**Tablo 4.** Levene ve ANOVO testi sonuçları

	Örnek Sayısı	Ortalama	Std. Sapma	Levene Homojenlik Testi	ANOVO	
					F	P
GKT	8	4507.00	2920.61	0.789	0.002	0.967
DKT	8	4447.13	2831.30			
Toplam	16	4477.06	2778.95			

### 3.1. İnce tane içeriğinin etkisi

Sabit rölatif sıklıkta hazırlanan kum-silt karışımlarının davranışı çok karmaşıktır ve kesin mekanizması bilinmemektedir [40]. Erten ve Maher [41] ve Kokusho [40], ince tane içeriğindeki artışla birlikte sıvılaşma direncindeki azalmanın, karışımdaki plastik olmayan ince tanelerin yağlayıcı etkisinden kaynaklanabileceğini ve böylece tanelerin yeniden düzenlemesine katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Carraro vd. [42], % 5, 10 ve % 15 plastik olmayan silt içeren Ottawa kumu üzerinde yaptıkları gerilme kontrollü dinamik üç eksenli testlerde, sabit rölatif sıklıkta kum-

silt karışımlarının sıfırdan %5'e artan ince tane içeriğinde sıvılaşma direncinin ilk önce arttığını daha sonra %5 den %15'e artan ince tane içeriğinde ise azaldığını ifade etmişlerdir. Hazirbaba ve Rathje [43], sabit rölatif sıklıkta bir dizi deformasyon kontrollü dinamik basit kesme testi gerçekleştirmiştir. Onlar genel olarak ince tanenin etkilerini aşırı boşluksuyu basıncında bir düşüş ve eşik birim deformasyonda bir artış şeklinde gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, temiz kumun maksimum boşluk oranından daha büyük bir kum iskelet boşluk oranı ( $e_c$ ) oluşturacak yeterli ince tane oranı ( $f_c$ ) olduğunda boşluk suyu basıncının arttığını belirtmişlerdir. Bu davranışı ise kum iskelet boşluk oranı kavramı ile tanımlamışlardır. Bu görüşe göre kum iskelet boşluk oranı, kumun maksimum boşluk oranından daha az olduğu sürece sıvılaşma direnci ince tane içeriğindeki artışla birlikte artmaktadır. Ancak kum iskelet boşluk oranı, kumun maksimum boşluk oranına yakın veya daha fazla olan numunelerde ise sıvılaşma direnci, ince tane içeriğindeki artışla azalmaktadır.

Thevanayagam, [44, 45] tanelerarası temas sıklığının, kum-silt karışımlarının mekanik davranışını kontrol eden önemli bir parametre olduğunu göstermiştir. Bu bulguya dayanarak, Thevanayagam [44], eşik ince tane içeriğinden ( $F_c$ )<sub>th</sub> daha az ve daha fazla ince tane içeren karışımlar için iki eşdeğer rölatif sıklık önermiştir; sırasıyla iritane ( $D_{rc}$ ) ve incetane ( $D_{rf}$ ) rölatif sıklıklarını Eşitlik 2 ve 3'te tanımlamıştır.

$$D_{rc} = \frac{\epsilon_{max,HC} - \epsilon_c}{\epsilon_{max,HC} - \epsilon_{min,HC}} \quad (2)$$

$$D_{rf} = \frac{\epsilon_{max,HF} - \epsilon_f}{\epsilon_{max,HF} - \epsilon_{min,HF}} \quad (3)$$

Burada;  $D_{rc}$  ve  $D_{rf}$ , sırasıyla iritane ve incetane rölatif sıklıkları,  $\epsilon_{max,HC}$  ve  $\epsilon_{min,HC}$  sırasıyla kumun maksimum ve minimum boşluk oranı,  $\epsilon_{max,HF}$  ve  $\epsilon_{min,HF}$  sırasıyla ince tanenin (silt) maksimum ve minimum boşluk oranlarıdır. Kum iskelet boşluk oranı ( $e_c$ ) ve ince tane boşluk oranı ( $e_f$ ) ise Eşitlik 4 ve 5'te tanımlanmıştır.

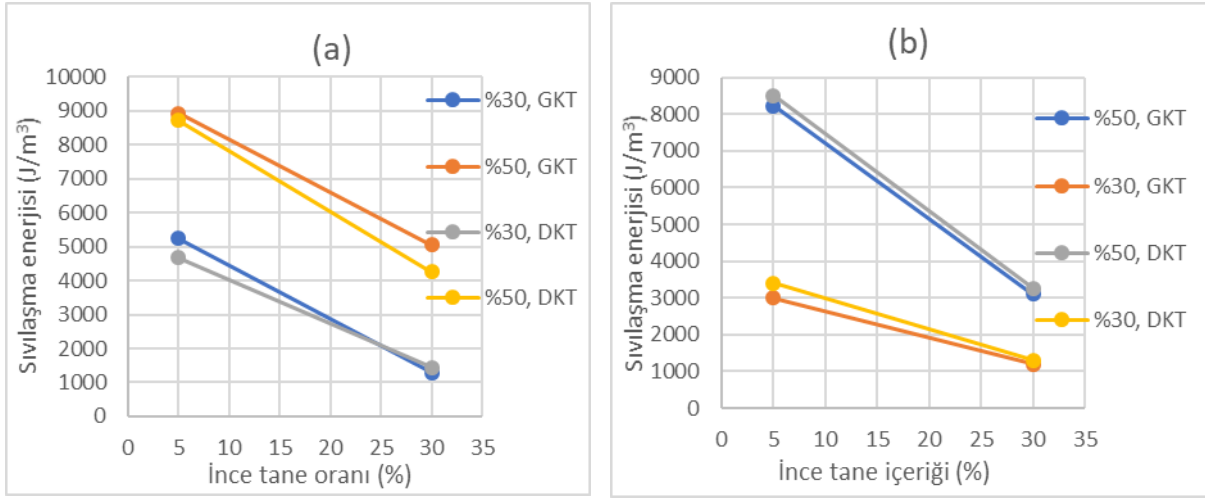
$$e_c = (e + f_c)/(1 - f_c) \quad (4)$$

$$e_f = e/f_c \quad (5)$$

Burada;  $e$ : kum-silt karışımının boşluk oranı,  $f_c$ : ondalık olarak ince tane içeriğidir

Aslında, ince tane içeriği eşik ince tane içeriğinden azsa, kum-silt karışımının sıvılaşma direnci, aynı kum iskelet boşluk oranında ( $e_c$ ) veya iritane rölatif sıklığında ( $D_{rc}$ ) temiz kuma benzerdir. Bununla birlikte, ince tane içeriği eşik ince tane içeriğinden fazlaysa, kum-silt karışımının sıvılaşma direnci, aynı ince tane boşluk oranında ( $e_f$ ) veya ince tane rölatif sıklığında ( $D_{rf}$ ) karışımdaki silte benzerdir [45].

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar yukarıda tanımlanan kavramsal değerlendirmelerle de uyumludur. Eşitlik 4'e göre, ince tane oranı arttığında kum iskelet boşluk oranı artmaktadır bunun sonucu olarak tanelerarası rölatif sıklık ( $D_{rc}$ ) azalmaktadır. Bu nedenle, %5 ila %30 oranında ince tane içeren kumun sıvılaşma direnci, rölatif sıklığın azalan temiz kuma benzerdir ve beklendiği gibi rölatif sıklık azaldığında kumun sıvılaşma direnci azalmaktadır.



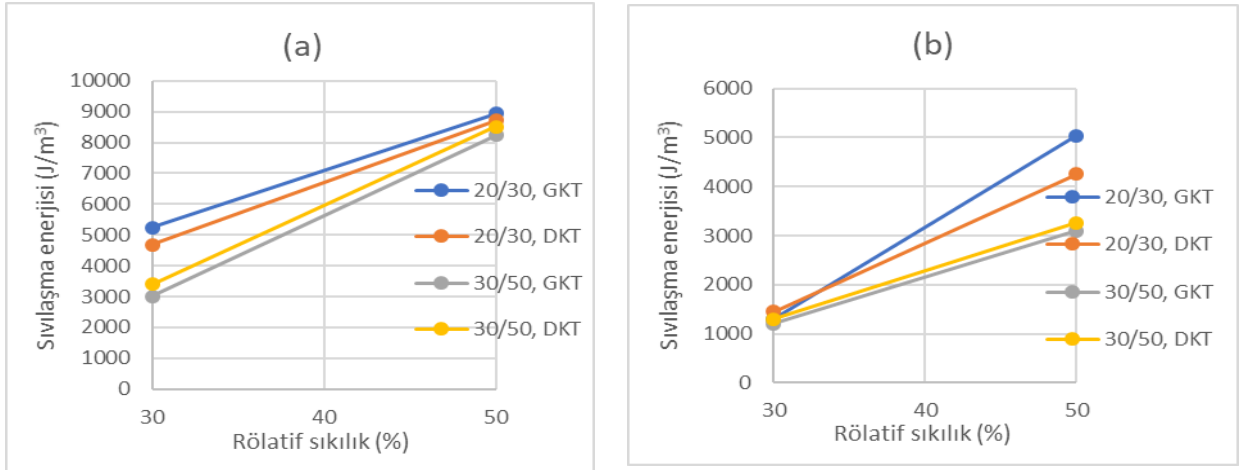
**Şekil 10.** %30 ve %50 rölatif sıklıkta gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü testlerin sıvılaşma enerjisi ve ince tane oranı ilişkisi **a)** 20/30 kumu **b)** 30/50 kumu

Şekil 10a ve Şekil 10b'de açıkça görüldüğü üzere  $f_c$ 'yi temiz kum için %5'den % 30'a çıkarmak, karışımın davranışının açıkça değiştiğini göstermektedir. Bu durum çalışma kapsamında yapılan hem gerilme kontrollü hem de deformasyon kontrollü testlerde gözlenmektedir. Testlerde ince tane içeriği %5'den %30'a arttıkça hem 20/30 hem de 30/50 numunesinde sıvılaşma enerjisi azalmaktadır. Bunun yanısıra beklendiği gibi rölatif sıklık %30 dan %50'ye arttıkça taneler arası temasın ve sıklığın artmasına bağlı olarak sıvılaşma direnci artmakta ve dolayısıyla sıvılaşma enerjisi artmaktadır. Ayrıca gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü testler arasında numunelerin sıvılaşma enerjileri arasında anlamlı bir fark gözükmemektedir. Ancak 20/30 kumuna göre daha ince tane yapısına sahip 30/50 kumunda %50 rölatif sıklıkta, %5 ince tane içeriğinden %30 ince tane içeriğine sıvılaşma enerjisindeki azalma hem deformasyon kontrollü hemde gerilme kontrollü testlerde daha belirgindir.

### 3.2. Rölatif sıklığın etkisi

Zemin sıvılaşma analizlerinde rölatif sıklığın karşılaştırma için uygun bir parametre olduğu diğer başka çalışmalarda da belirtilmiştir [43, 46]. Beklenildiği gibi taneler arasındaki temas yani rölatif sıklık arttıkça zeminin sıvılaşması için gerekli enerji de artmaktadır. Bu durum daha yüksek rölatif sıklıkta kum taneleri arasındaki temasın artması ve bu sebeple dinamik yükleme esnasında tanelerin yeniden düzenlenmeye karşı direncinin artmasından kaynaklanmaktadır. Normal olarak bu olay kayma direncinde bir artışa ve dolayısıyla da zeminin sıvılaşması için gerekli enerjide de bir artışa yol açmaktadır. Başka bir deyişle, kompozit malzeme yoğunlaştıkça sıvılaşmaya karşı daha yüksek direnç göstermektedir.

Şekil 11a'da %5 ince tane içeriğinde 20/30 ve 30/50 kumlarına ait gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen testlerin rölatif sıklık ve sıvılaşma enerjisi ilişkisi verilmiştir. Tüm testlerde rölatif sıklık arttıkça sıvılaşma enerjisi de artmaktadır. Ancak gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü testler arasında bir fark gözükmezken 20/30 kumu ile 30/50 kumlarının sıvılaşma enerjisi karşılaştırıldığında max. ve min. boşluk oranı aralığı daha dar olan ve ortalama tane çapı daha büyük olan 20/30 kumu rölatif sıklığın artışından 30/50 kumuna göre daha az etkilenmektedir. Bu durumun 30/50 kumunda rölatif sıklık artışı sebebiyle genel boşluk oranındaki (e) değişimin daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 11.** 20/30 ve 30/50 kumlarına ait gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü testlerin sıvılaşma enerjisi rölatif sıklık ilişkisi **a)** %5 ince tane **b)** %30 ince tane

Şekil 11b'de ise %30 ince tane içeriğinde 20/30 ve 30/50 kumlarına ait gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen testlerin rölatif sıklık ve sıvılaşma enerjisi ilişkisi verilmiştir. Burada Şekil 11a'daki durumun tersi bir durum söz konusu olmaktadır. Çünkü ince tane içeriğinin artması kum iskeleti boşluk oranını ( $e_c$ ) artırmakta ve ince tane boşluk oranını ( $e_f$ ) azaltmaktadır (Eşitlik 4 ve 5). Dolayısıyla aynı kum iskeleti boşluk oranı için daha yüksek max ve min boşluk oranına sahip olan 30/50 kumu daha fazla rölatif sıklığa veya daha düşük genel boşluk oranına ( $e$ ) sahip olmaktadır ve rölatif sıklık değişiminden fazla etkilenmemektedir. Oysa daha düşük max ve min boşluk oranına sahip 20/30 kumu daha düşük rölatif sıklığa veya daha yüksek genel boşluk oranına ( $e$ ) sahip olmaktadır ve rölatif sıklık değişiminden daha fazla etkilenmektedir. Bu durum Şekil 11b'de net bir şekilde görülmektedir. 20/30 kumunda rölatif sıklığın artışı ile birlikte sıvılaşma enerjisindeki artış oranı 30/50 kumuna göre daha fazla olmaktadır.

#### 4. Sonuçlar

1. Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü testlerde sıvılaşma enerjisindeki değişim farklı olsa bile nihahi kümülatif sıvılaşma enerjisi değeri birbirine çok yakın değerler vermektedir. Bu durum test yönteminin sıvılaşma enerjisi üzerinde çok sınırlı etkisi olduğunu göstermektedir.
2. İnce tane içeriği arttığında kum iskelet boşluk oranı artmaktadır dolayısıyla tanelerarası rölatif sıklık ( $D_{rc}$ ) azalmaktadır. Dolayısıyla ince tane içeriğinin, %5'den %30'a yükselmesi hem 20/30 hem de 30/50 kumunun sıvılaşma enerjisini azalmaktadır. Bu durum çalışma kapsamında yapılan hem gerilme kontrollü hem de deformasyon kontrollü testlerde gözlenmektedir.
3. Tüm testlerde rölatif sıklığın %30 dan %50'ye arttıkça taneler arası temasın ve sıklığın artmasına bağlı olarak sıvılaşma enerjisi de artmaktadır. Ancak % 5 ince tane oranı için 20/30 kumu ile 30/50 kumlarının sıvılaşma enerjisi karşılaştırıldığında max. ve min. boşluk oranı aralığı daha dar olan ve ortalama tane çapı daha büyük olan 20/30 kumu rölatif sıklığın artışından 30/50 kumuna göre daha az etkilenmektedir.
4. Testlerden elde edilen verilere göre %30 ince tane içeriğinde aynı kum iskeleti boşluk oranı için daha yüksek max. ve min. boşluk oranına sahip olan 30/50 kumu daha fazla rölatif sıklığa veya daha düşük genel boşluk oranına ( $e$ ) sahip olmaktadır ve rölatif sıklık değişiminden fazla etkilenmemektedir. Oysa aynı kum iskeleti boşluk oranı için daha düşük max ve min boşluk oranına sahip olan 20/30 kumu daha düşük rölatif sıklığa veya daha

yüksek genel boşluk oranına (e) sahip olmaktadır ve rölatif sıklık değişiminden daha fazla etkilenmektedir.

## Teşekkür

Deneylerin yapılması sırasında laboratuvarı kullanıma açan ve desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Kamil KAYABALI'na teşekkür ederim.

## Kaynaklar

- [1]. Bray, J. D., Sancio, R. B., Reimer, M. F., Durgunoglu T., Liquefaction susceptibility of fine-grained soils, 11th Int. Conf. On Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd Int. Conf. On Earthquake Geotechnical Engineering, 2004, 1: 655-662. Berkeley, California, USA.
- [2]. Arab, A., Belkhatir, M., Fines content and cyclic preloading effect on liquefaction potential of silty sand: a laboratory study, *Acta Polytech Hung J*, 2012, 9(4), 47–64.
- [3]. Yassine, B., Bouafia, A., Canou, J., Dupla, J. C., Liquefaction susceptibility study of sandy soils: effect of low-plastic fines, *Arab J Geosci*, 2014, 8, 605–618.
- [4]. Amini, F., Qi, G. Z., Liquefaction testing of stratified silty sands, *J Geotech Geoenviron Eng*, 2000, 126(3), 208–217.
- [5]. Chien, L. K., Oh, Y. N., Chang, C. H., Effect of fines content on liquefaction strength and dynamic settlement of reclaimed soil, *Can Geotech J*, 2002, 39, 254–265.
- [6]. Xenaki V. C., Athanasopoulos G. A., Liquefaction resistance of sand–silt mixtures: an experimental investigation of the effects of fines, *Soil Dyn Earthq Eng*, 2003, 23:183–194.
- [7]. Papadopoulou, A., Tika, T., The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of nonplastic silty sands, *Soils Found*, 2008, 48, 713–725.
- [8]. Dash, H. K., Sitharam, T. G., Undrained cyclic pore pressure response of sand–silt mixtures: effect of non-plastic fines and other parameters, *J Geotech Geol Eng*, 2009, 27, 501–517.
- [9]. Sitharam, T. G., Dash, H. K., Jakka, R. S., Post liquefaction undrained shear behavior of sand silt mixtures at constant void ratio, *ASCE Int J Geomech*, 2013, 13(4), 421–429.
- [10]. Mominul, H. M., Alam, M. J., Ansary, M. A., Karim, M. E., Dynamic properties and liquefaction potential of a sandy soil containing silt. In: *Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, 2013, Paris, 1539–1542.
- [11]. Emdadul, K. M., Jahangir, A. M., Effect of nonplastic silt content on the liquefaction behaviour of sand–silt mixture, *Soil Dyn Earthq Eng*, 2014, 65, 142–150.
- [12]. Herna'ndez Y. A., Towhata I., Gunji K., Yamada S., Laboratory tests on cyclic undrained behaviour of loose sand with cohesionless silt and its application to assessment of seismic performance of subsoil, *Soil Dyn Earthq Eng*, 2015, 79, 365–378.
- [13]. [13] Yassine, B., Bouafia, A., Canou, J., Dupla, J. C., Liquefaction susceptibility study of sandy soils: effect of low-plastic fines, *Arab J Geosci*, 2014, 8, 605–618.
- [14]. Seed H. B., Idriss, I. M., Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential., *J. Soil Mech. and Found. Div.*, 1971, 97(SM9), 1249-1273.
- [15]. Dobry, R., Ladd, R. S., Yokel, F. Y., Chung, R. M., Powell, D., Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method, *NBS Building Science Series 138*, National Bureau of Standards, 1982, Gaithersburg, MD, 152.
- [16]. Nemat-Nasser, S., Shokooh A., A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing, *Canadian Geotech. J.*, 1979, 16 (4), 659-678.

- [17]. Ishihara, K., Yasuda, S. Sand liquefaction due to irregular excitation, *Soils and Foundations*, 1972, 12(4), 65-77.
- [18]. Green, R. A., Terri, G. A., Number of equivalent cycles concept for liquefaction evaluations—Revisited, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 2005, 131(4), 477-488.
- [19]. Berrill, J. B., Davis, R. O., Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: revised model, *Soils and Foundations*, 1985, 25(2), 106–118.
- [20]. Figueroa, J., Saada, A., Liang, L., Dahisaria, N., Evaluation of soil liquefaction by energy principles, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(9), 1554–1569.
- [21]. Kokusho, T., Liquefaction potential evaluation: energy-based method compared to stress-based method, In *Proceedings of the Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 2013, Chicago.
- [22]. Green, R. A., *Energy-based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils*, (PhD dissertation), Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001, Blacksburg, VA.
- [23]. Aminia, P. F., Noorzad, R., Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic simple shear test, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 104, 45-53
- [24]. Simcock, J, Davis, R. O., Berrill, J. B., Mallenger, G., Cyclic triaxial tests with continuous measurement of dissipated energy, *Geotech Test J*, 1983, 6(1), 35–39.
- [25]. Polito, C., Green, R. A., Dillon, E., Sohn, C., Effect of load shape on relationship between dissipated energy, *Can. Geotech. J.*, 2013, 50, 1118-1128.
- [26]. ASTM D6913, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis”, Annual book of ASTM standards, Vol.04-09, Philadelphia, USA.
- [27]. ASTM D854-14 “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer”, Annual book of ASTM standards, Vol.04-08, Philadelphia, USA.
- [28]. Lade, P. V., Liggió, C. D., Yamamuro, J. A., “Effects of nonplastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, *Geotechnical Testing Journal*, 1998, 21(4), 336-347.
- [29]. Ladd, R. S., Preparing test specimens using under compaction, *Geotech Test J.*, 1978, 1(1), 16–23.
- [30]. Bjerrum, L., Landva, A., Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay, *Geotechnique*, 1966, 16(1), 1–20.
- [31]. Sadrekarimi, A., Olson, S. M. A new ring shear device to measure the large displacement shearing behavior of sands, *Geotech. Test J ASTM*, 2009, 32, 197–208.
- [32]. Finn, W. D. L., Ledbetter, R. H., Wu, G., “Liquefaction in silty soils: design and analysis”, In: Prakash S, Dakoulas P, editors. *Ground failures under seismic conditions*, geotechnical special publication ASCE, 1994, 44, 51–76.
- [33]. Dyvick, R., Berre, T., Lacasse, S., Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests, *Geotechnique*, 1987, 37, 3–10.
- [34]. Zhou, J., Lee, W., Zhou, K., Dynamic properties sand liquefaction potential of silts, In: K. Ishihara (Ed.), *International conference on earthquake geotechnical engineering*, Tokyo, 1995, 833–838.
- [35]. Ostadan, F., Deng, N., Arango, I., Energy-based method for liquefaction potential evaluation - Phase I, feasibility study, U.S. Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1996, Building and Fire Research Laboratory.
- [36]. Zhang, W, Goh, A. T. C., Zhang, Y., Chen, Y., Xiao, Y., Assessment of soil liquefaction based on capacity energy concept and multivariate adaptive regression splines, *Engineering Geology*, 2015, 188, 29-37.
- [37]. Alavi, A. H., Gandomi, A. H., Energy-based numerical models for assessment of soil liquefaction, *Geoscience Frontiers*, 2012, 3(4), 541-555.

- [38]. Xin Kang, S. M., Louis Ge, M., Kuang-Tsung, C., Annie On-Lei K., Strain-Controlled Cyclic Simple Shear Tests on Sand with Radial Strain Measurements, *J. Mater. Civ. Eng.*, 2016, 28(4), 25-40.
- [39]. Kammerer, A., Pestana, J. M., Undrained Response of Monterey 0/30 Sand Under Multidirectional Cyclic Simple Shear Loading Conditions, Technical report, 2002, University of California, Berkeley.
- [40]. Kokusho, T., Liquefaction strengths of poorly-graded and well-graded granular soils investigated by lab tests, 4th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering—Invited Lectures, D.P. Kyriazis, ed., Springer, Yhe Netherlands, 2007, 159-184.
- [41]. Erten, D., Maher, M. H., Cyclic undrained behavior of silty sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1995, 14(2), 115-123.
- [42]. Carraro, J. A. H., Bandini, P., Salgado, R., Liquefaction resistance of clean and nonplastic silty sands based on cone penetration resistance, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engrg*, 2003, 129(11), 965-976.
- [43]. Hazirbaba, K., Rathje, E. M., Pore pressure generation of silty sands due to induced cyclic shear strains, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.* 2009, 135(12), 1892-1905.
- [44]. Thevanayagam, S., Intergrain contact density indices for granular mixes—I: Framework, *Earthquake Engrg. and Engrg. Vibration*, 2007a, 6(2), 123-134.
- [45]. Thevanayagam, S., Intergrain contact density indices for granular mixes—II: Liquefaction resistance, *Earthquake Engrg. and Engrg. Vibration*, 2007b, 6(2): 135-146.
- [46]. Carraro, J. A. H., Prezzi, M., Salgado, R., Shear strength and stiffness of sands containing plastic or nonplastic fines, *J Geotech Geoenviron Eng ASCE*, 2009, 135(9), 1167–1178.