

SİLT YÜZDESİNİN KUMLARIN SİSMİK SIVILAŞMA DİRENCİNE ETKİSİ

THE EFFECT OF SILT CONTENT ON SEISMIC LIQUEFACTION RESISTANCE OF SANDS

Yunus Emre TÜTÜNCÜ¹, M. Murat MONKUL²

ÖZET

Zemin sıvılaşması geoteknik deprem mühendisliğinde önemli bir problemdir. Sıvılaşmanın en çok görüldüğü zemin türü kumlardır. Ancak kumlar arazide genellikle siltli kum olarak bulunmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, temiz kumlar (FC = %0) ile 3 farklı ince dane içeriğine sahip plastik olmayan siltlerin (FC = %5, %15 ve %35) sıvılaşma dirençleri karşılaştırılmış ve önemli bir parametre olan ince dane içeriğinin, kumlar üzerindeki sıvılaşmaya etkisi incelenmiştir. Çalışmanın ilk kısmında kullanılan zeminlerin özelliklerini belirlemek için, özgül ağırlık, likit limit (düşen koni deneyi), elek analizi, hidrometre ve minimum-maksimum boşluk oranı deneyleri yapılmıştır. İkinci kısmında ise, 100kPa düşey gerilme altında konsolide edilen zeminler, Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında, farklı göreceli sıkılıklarda ve 3 farklı çevrimsel gerilme oranında (CSR = 0.1, 0.12 ve 0.14) Dinamik Basit Kesme cihazı ile test edilmiştir. Neticede, %5 ince dane içeriğine sahip siltli kumların, temiz kumlara göre sıvılaşma direncini artırdığı, %35 ince dane içeriğine sahip siltli kumların ise temiz kumlara göre sıvılaşma direncini azalttığı gözlemlenmiştir. %15 ince dane içeriğine sahip siltli kumların göreceli sıkılığın %45'ten düşük olduğu zeminlerde, temiz kumlara göre sıvılaşma direncini düşürdüğü, %45'ten yüksek olduğu zeminlerde ise temiz kumlara göre sıvılaşma direncini yükselttiği gözlemlenmiştir. Göreceli sıkılığın, sıvılaşma direncinde silt yüzdesinin oluşturduğu etkiyi nasıl etkilediği de kısaca tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dinamik Basit Kesme Deneyi, Göreceli Sıklık, İnce Dane Oranı, Kum, Sıvılaşma, Silt

¹Araştırma Görevlisi, Yeditepe Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, emre.tutuncu@yeditepe.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Prof. Dr., Yeditepe Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, murat.monkul@yeditepe.edu.tr

ABSTRACT

Soil liquefaction is a significant problem in geotechnical earthquake engineering. Liquefaction occurs mostly in sandy soils. However, sands generally appear as silty sands in situ. Therefore, in this study, the liquefaction resistance of clean sands (FC = 0%) and silty sands with 3 different fines contents (FC = 5%, 15% and 35%) were compared and the effect of fines content, which is an important parameter, on liquefaction of the sands was investigated. In the first part of the study, specific gravity, liquid limit (fall cone test), sieve analysis, hydrometer and minimum-maximum void ratio tests were performed in order to determine the properties of the soils used. In the second part, the soils consolidated under 100kPa vertical stress were tested with Cyclic Direct Simple Shear apparatus at various relative densities and cyclic stress ratios (CSR = 0.1, 0.12 and 0.14) at the Soil Mechanics Laboratory of Yeditepe University. As a result, it has been observed that silty sands with 5% fines content increase the liquefaction resistance compared to clean sands, and silty sands with 35% fines content decrease the liquefaction resistance compared to clean sands. It has also been observed that silty sands with 15% fines content has smaller liquefaction resistance than the clean sands if relative density is less than 45%. The opposite trend (15% silty sand had greater liquefaction resistance than the clean sand) is valid if relative density is higher than 45%. The importance of relative density on fines content effect is briefly discussed.

Keywords: *Cyclic Direct Simple Shear Test, Fines Content, Liquefaction, Relative Density, Sand, Silt*

1. GİRİŞ

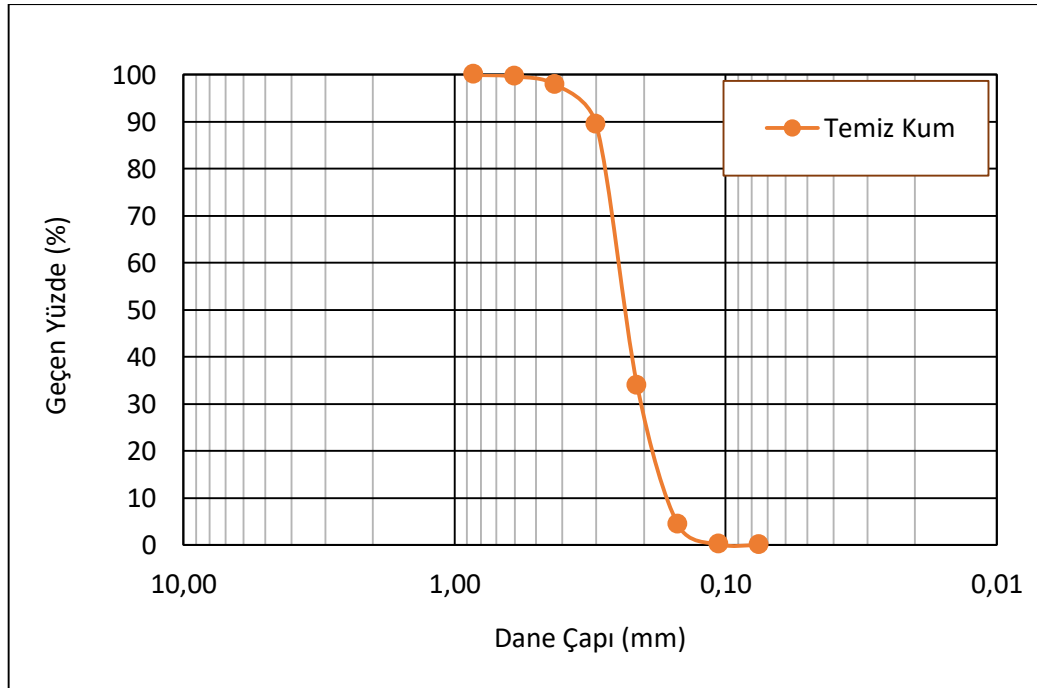
Sıvılaşma, özellikle geoteknik deprem mühendisleri tarafından on yıllardır araştırılmakta olan çok önemli ve bir o kadar da karmaşık bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Her ne kadar temiz kumların sıvılaştığı vakalar olsa da, siltli kumların sıvılaştığı vakalar ve neticede vermiş olduğu hasarlar da literatürde sıkça raporlanmıştır. (Lade ve Yamamuro, 2011; Monkul ve diğ. 2015; Monkul ve Kendir 2019; Monkul ve diğ. 2021; Tütüncü ve diğ. 2022). Bu nedenle ince dane oranının veya silt yüzdesinin, kumlu zeminlerin sismik sıvılaşma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu artık çoğu mühendis ve araştırmacı tarafından kabul görmektedir. Bu bağlamda, birçok araştırmacı on yıllardır siltli kumların ve temiz kumların sıvılaşma dirençlerini ince dane oranı (FC) parametresine odaklanarak kıyaslayan çalışmalar gerçekleştirmiştir. Sonuçta ortaya çeşitli bulgular çıkmıştır. Siltli kumlar üzerinde çalışmalar yapan bazı araştırmacılar (Cubrinovski ve diğ. 2010; Monkul ve Yamamuro 2011; Belkhatir ve diğ. 2011; Bayat ve Bayat 2013; Monkul ve diğ. 2017; Oka ve diğ. 2018; Porcino ve diğ. 2018; Doygun ve diğ. 2019; Wei ve diğ. 2020), artan silt yüzdesiyle birlikte, sıvılaşma direncinin temiz kumlara kıyasla düştüğünü belirtmişlerdir. Bazıları ise, artan silt yüzdesinin kumların sıvılaşma direncini yükselttiğini ifade etmişlerdir (Salgado ve diğ. 2000; Amini ve Qui 2000; Hazırbaba ve Rathje 2009; Takch ve diğ. 2016; Jradi ve diğ. 2020). Bunların yanında yapılan bazı çalışmalar, artan silt içeriğiyle birlikte siltli kumlu zeminlerin sıvılaşma direncinin temiz kumlarla karşılaştırıldığında eşik silt içeriğine kadar azaldığını ve bu değerden sonra tekrar arttığını ortaya koymaktadır (Polito ve Martin 2001; Thevanayagam ve diğ. 2002; Xenaki ve

Athanasopoulos 2003; Papadopoulou ve Tika 2007; Sitharam ve Dash 2008; Wang ve Wang 2010; Porcino ve Diano 2017). Literatürde yapılan çalışmalarda da görüldüğü üzere silt yüzdesi, kumların sıvılaşma direncini olumlu ya da olumsuz etkilemesi bakımından önemli bir yer tutmaktadır. Bunun dışında silt yüzdesinin kumların sıvılaşma direncine etkisine dair birbiriyle uyuşmayan çeşitli görüşler olduğu anlaşılmaktadır (Tütüncü 2022).

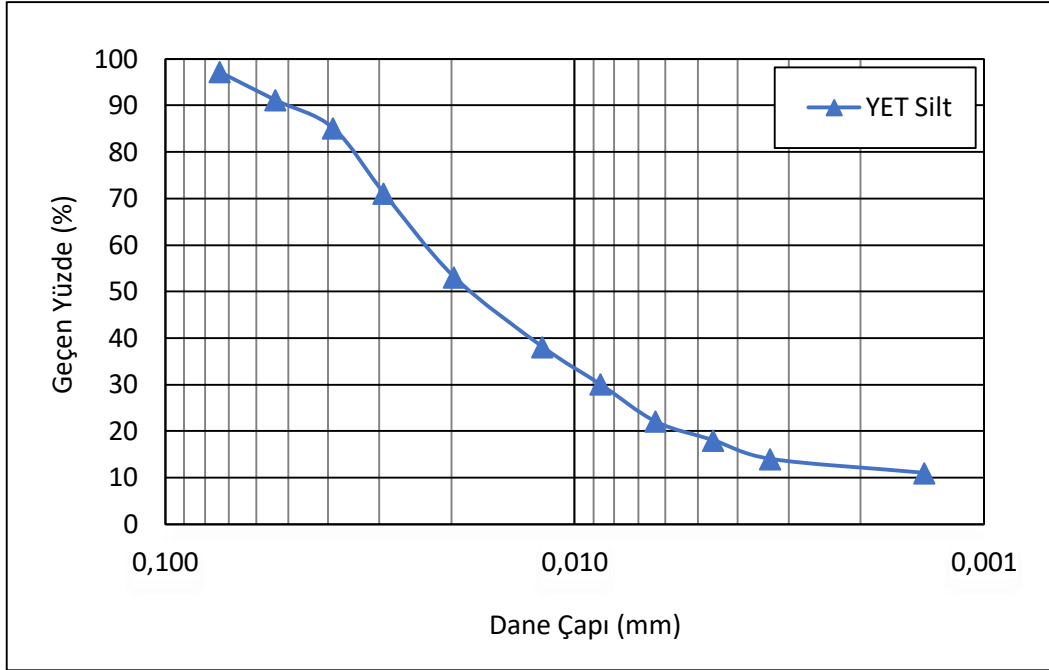
Bu çalışmanın yapılma amacı da, silt yüzdesinin kumların sismik sıvılaşma direncine etkilerinin araştırılmasıdır. Bunun için, plastik olmayan (non-plastik) YET siltin temiz bir kumla 3 farklı silt yüzdesinde (FC=%5, %15 ve %35) karıştırılmasıyla elde edilen siltli kumlar üzerinde, dinamik basit kesme deneyleri yapılmış ve silt yüzdesinin kumların sismik sıvılaşma direncine etkileri incelenmiştir.

2. KULLANILAN ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ

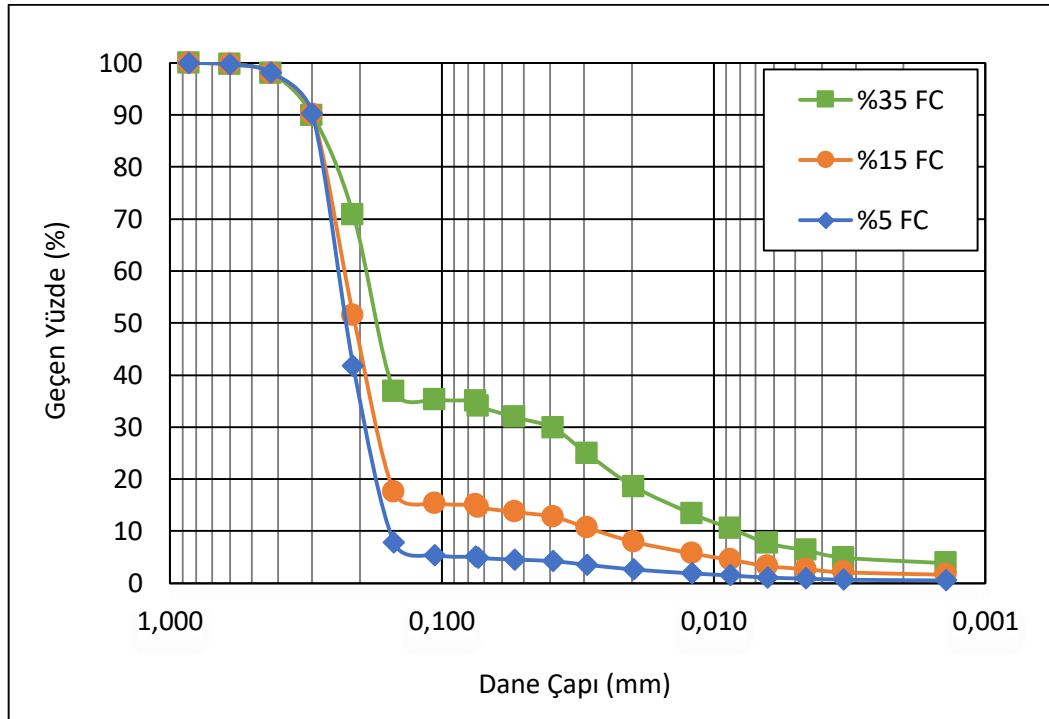
Çalışmada kullanılan temiz kum ve YET silt İzmir bölgesinden elde edilmiştir. Temiz kum ve YET siltin özgül ağırlıkları (G_s) sırasıyla 2.641 ve 2.644 olarak hesaplanmıştır. Plastik olmadığı (non-plastik) belirlenen YET siltin likit limiti düşen koni deneyinden %30 olarak hesaplanmış ve deneysel çalışmada 200 numaralı eleğin altında kalacak şekilde kullanılmıştır. Yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri sonucunda temiz kum ve YET silt için elde edilmiş olan dane boyu dağılımları Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilmiştir. Ayrıca YET siltin 3 farklı ince dane oranında (FC=%5, %15 ve %35) karıştırılarak elde edilen siltli kumların da dane boyu dağılımları Şekil 3’te gösterilmiştir. Bunun yanında, kullanılan zeminlerin üniformluk katsayısı (CU), eğrilik katsayısı (CC), dane boyları (D_{10} , D_{30} ve D_{60}) ve USCS grup sembolleri Çizelge 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Temiz kumun dane boyu dağılımı



Şekil 2. YET siltin dane boyu dağılımı

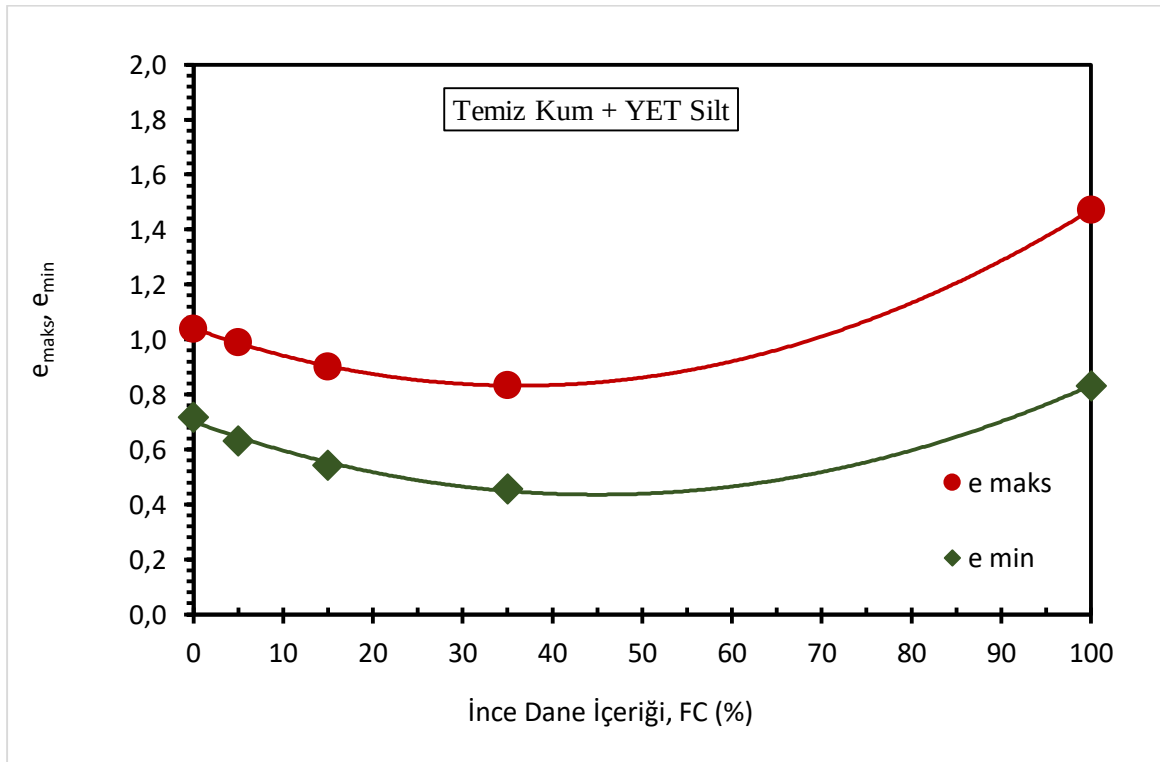


Şekil 3. Siltli kumların dane boyu dağılımları (FC=%5, %15 ve %35)

Tablo 1. Deneysel programda kullanılan zeminlerin özellikleri

	Temiz Kum	%5 FC	%15 FC	%35 FC	YET Silt
G_s	2.641	2.641	2.641	2.642	2.644
e_{min}	0.717	0.632	0.543	0.457	0.832
e_{max}	1.039	0.990	0.902	0.833	1.471
D_{10}	0.165	0.155	0.026	0.008	0.001
D_{30}	0.205	0.190	0.175	0.040	0.009
D_{60}	0.247	0.240	0.227	0.190	0.024
CU	1.50	1.55	8.73	23.75	16.79
CC	1.03	0.97	5.20	1.05	2.30
USCS	SP	SM	SM	SM	ML

Lade ve diğ. (1998)'nin deneysel yöntemi kullanılarak tespit edilen minimum ve maksimum boşluk oranları Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, artan silt yüzdesiyle birlikte e_{maks} ve e_{min} değerlerinin belirli bir ince dane oranına kadar önce azaldığı, sonrasında ise arttığı rahatlıkla gözlenebilir. Bu tarz eğilimlerin özellikle Şekil 3'de de açıkça görülen kesik gradasyonlu (gap graded) ve ortalama dane çapı oranı ($D_{50-kum} / d_{50-silt}$) yüksek siltli kumlarda beklenir olduğu ve zemin numunelerinin "sözde doğal boşluk oranları (quasi-natural void ratio)" üzerindeki etkileri Monkul ve diğ. (2016) tarafından detaylıca açıklanmıştır. Şekil 4'ten, boşluk oranlarının dip yaptığı seviyenin yaklaşık %35 mertebelerinde olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Temiz kum, YET silt ve 3 farklı ince dane içeriğinde hazırlanan zeminlerin minimum (e_{min}) ve maksimum (e_{maks}) boşluk oranlarının FC ile değişimi

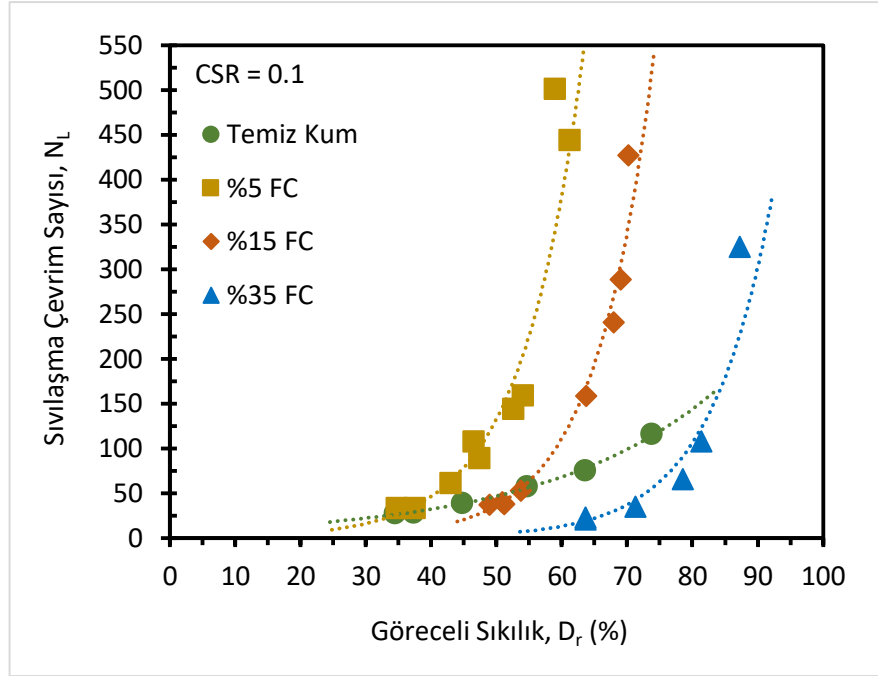
3. DENEYSEL PROGRAM

Bu çalışmanın deneysel programı, Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiş ve numunelerin sıvılaşma direncinin belirlenmesinde dinamik basit kesme (CDSS) deney cihazı kullanılmıştır. Numuneler kuru huni yöntemiyle hazırlanmıştır (Monkul ve diğ. 2018; Yenigün ve diğ. 2018). Hazırlanmış olan numuneler, yaklaşık 64 mm çapında ve 20 mm yüksekliğindedir. Dinamik basit kesme deneyi, bir çok mukavemet deneyinde olduğu gibi konsolidasyon ve kesme aşaması olarak iki adımdan meydana gelmektedir. İlk aşamada, numuneler 100 kPa düşey gerilme (σ_{vc}) altında konsolide edildikten sonra ikinci aşama olan tekrarlı direkt basit kesme aşamasına otomatik olarak geçilmiştir. Bu aşamada drenajsız duruma eşdeğer olan sabit hacim kontrolü, bilgisayar tarafından sağlanmış ve gerektiği takdirde numuneler üzerindeki düşey gerilme numune hacmini sabit tutacak şekilde bilgisayar tarafından artırılmış veya azaltılmıştır. Sabit hacim kontrollü direkt basit kesme deneyinin önemli avantajlarından biri de plastik olmayan zeminler için drenajsız kayma mukavemetinin veya sıvılaşma direncinin tamamen kuru numunelerden elde edilebilmesidir (Monkul ve diğ. 2015, 2017, 2020). Kesme aşamasında ise, numuneler 0.1 Hz frekansında 3 farklı çevrimsel gerilme oranına (CSR=0.1, 0.12 ve 0.14) denk gelecek şekilde tekrarlı kayma gerilmelerine maruz bırakılmıştır. Sıvılaşmanın gerçekleştiği kabulünde 2 ölçüt dikkate alınmıştır. Deneyler bunlardan birinin gerçekleşmesi durumunda numunelerin sıvılaştığı varsayılarak sonlandırılmıştır. Bunlardan ilki aşırı boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1'e ulaşmış olmasıdır. Diğer ölçüt ise tepeden tepeye olan kayma birim şekil değişiminin (γ) %10 düzeyine ulaşmasıdır. Sıvılaşma kabulü için literatüre göre daha yüksek bir kayma birim şekil değişimi kriterinin ($\gamma=10\%$) seçilmesi, numunelerin birçoğunda $r_u=1$ durumunun yaklaşık %10 kayma birim deformasyonuna denk gelmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Neticede bu çalışma için 123 adet dinamik basit kesme deneyi, 3 farklı çevrimsel gerilme oranında ve farklı göreceli sıklıklarda (D_r) tamamen kuru numuneler kullanılarak yapılmıştır.

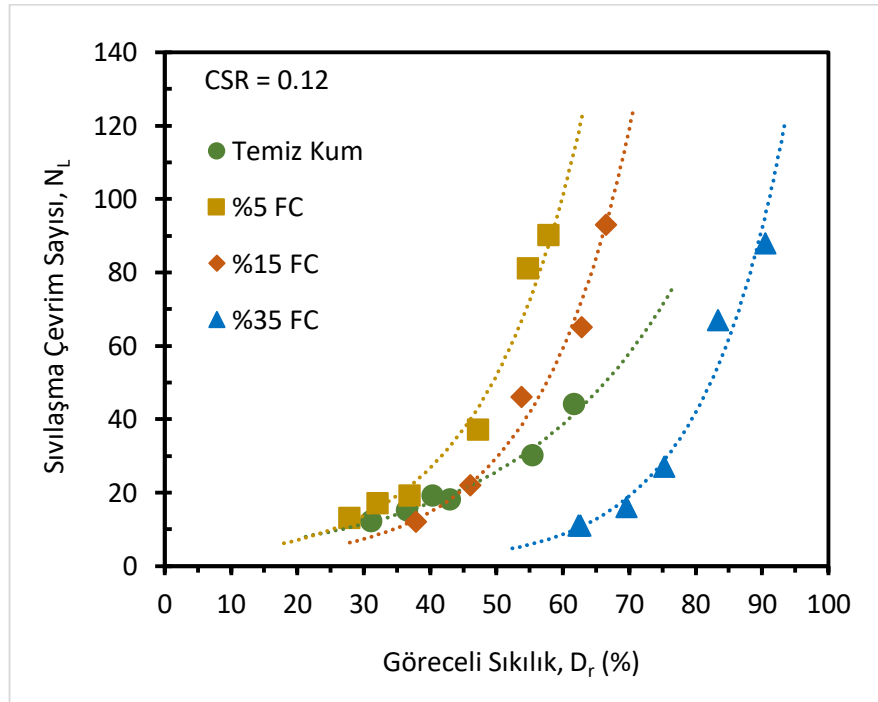
4. DENEY SONUÇLARI

4.1. GÖRECELİ SIKILIK İLE SIVILAŞMA İÇİN GEREKEN ÇEVİRİM SAYISI ARASINDAKİ İLİŞKİ

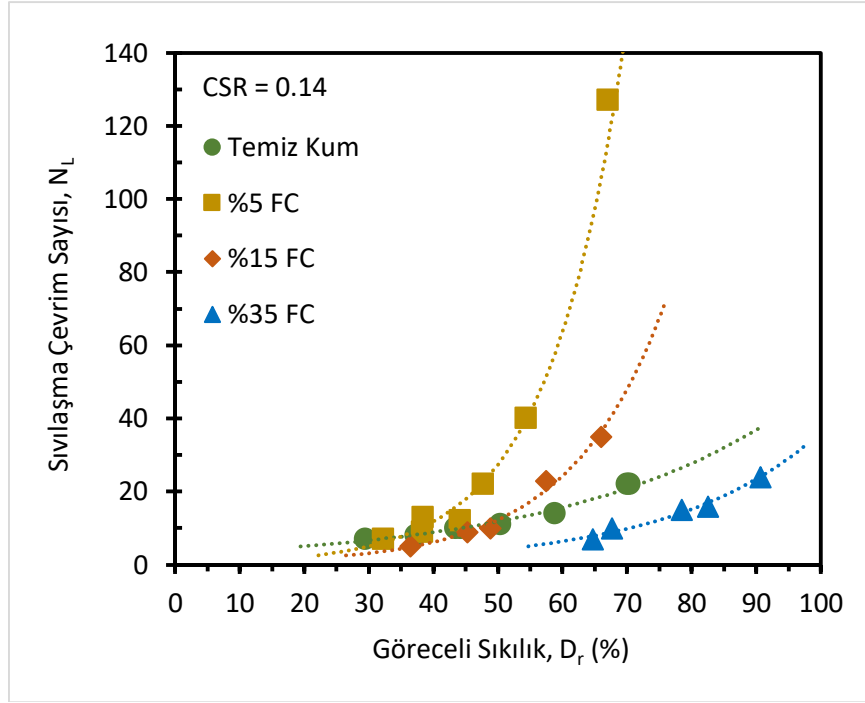
Farklı göreceli sıklık değerlerinde ve 3 farklı çevrimsel gerilme oranında temiz kum ve siltli kumlarla yapılan deneylerin, sıvılaşma için gereken çevrim sayısı ile olan ilişkisi Şekil 5 (CSR=0.1), Şekil 6 (CSR=0.12) ve Şekil 7 (CSR=0.14)'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, bütün çevrimsel gerilme oranlarında artan göreceli sıklık ile birlikte sıvılaşma için gereken çevrim sayısının beklendiği üzere arttığı görülecektir. Artan göreceli sıklık değerlerinde, her 3 CSR için de %5 içerikli siltli kumun sıvılaşması için gereken çevrim sayısı, temiz kuma göre daha fazla iken %35 içerikli siltli kumun sıvılaşması için gereken çevrim sayısı, temiz kuma göre daha azdır. %15 içerikli siltli kumlar incelendiğinde ise aradaki eğilimin biraz daha karmaşık olduğu gözlemlenmiştir. Söz konusu ilişki ileride daha detaylı tartışılacaktır.



Şekil 5. Göreceli sıkılık ile sıvılaşma çevrim sayısı arasındaki ilişki (CSR=0.1 için)



Şekil 6. Göreceli sıkılık ile sıvılaşma çevrim sayısı arasındaki ilişki (CSR=0.12 için)



Şekil 7. Göreceli sıklık ile sıvılaşma çevrim sayısı arasındaki ilişki (CSR=0.14 için)

Şekil 5, 6, 7 incelendiğinde diğer bir bulgu olarak, göreceli sıklık ile sıvılaşma için gereken çevrim sayısı arasındaki ilişkinin, üstel bir fonksiyon kullanılarak ifade edilebileceği görülecektir. Denklem 1’de bu bulgu gösterilmiştir.

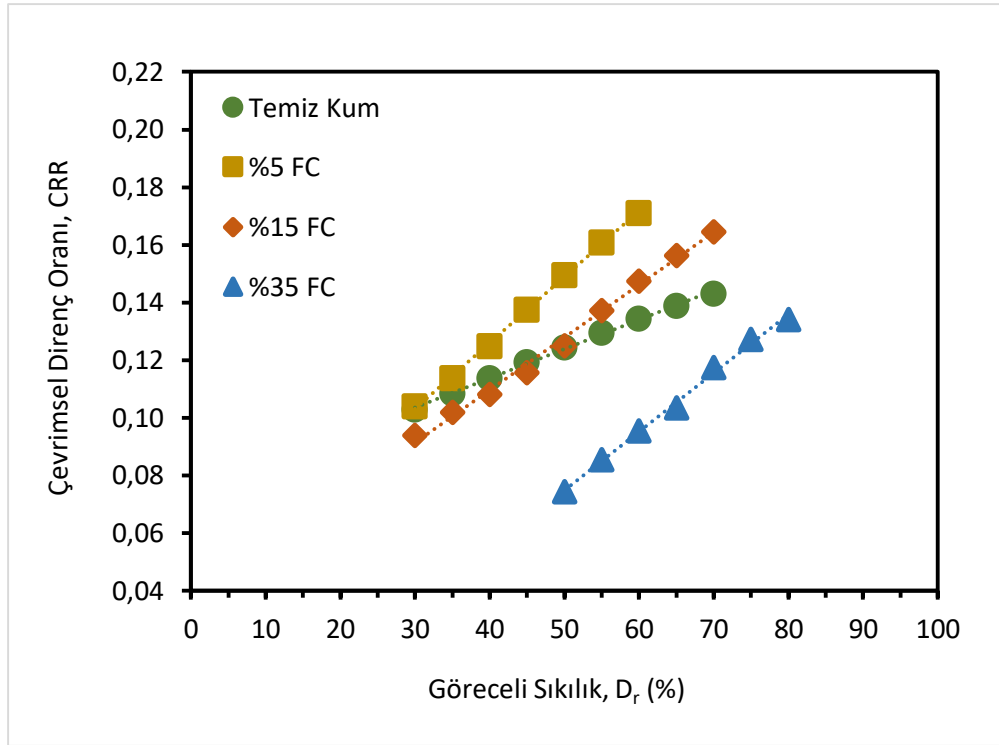
$$N_L = a \cdot e^{[b \cdot D_r(\%)]} \quad (1)$$

Denklem 1’deki “a” ve “b”, denklemin katsayıları olup zeminin cinsine, ince dane oranına (FC) ve çevrimsel gerilme oranına (CSR) bağlı olarak değişebilmektedir, e ise Euler sayısıdır. Daha önce Monkul ve Kendir (2019) tamamen farklı bir kum ve farklı bir silt kullanarak yapmış oldukları çalışmada, “a” ve “b” katsayılarının anlamlarını ve eğilimlerini irdelemişlerdir. Bu çalışma sonuçları da, Monkul ve Kendir (2019)’in önceki bulgularını doğrulamaktadır. Örneğin, belirli bir zemin türü için (temiz kum veya siltli kum) “a” katsayısı artan CSR ile azalmaktadır. Ayrıca Idriss ve Boulanger (2008), Takch ve diğ. (2016) gibi araştırmacılar da yapmış oldukları çalışmalarda, sabit bir CSR altında göreceli sıklık ile sıvılaşma için gereken çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi Denklem 1’deki gibi üstel bir fonksiyon ile ifade etmişlerdir.

4.2. SİLT YÜZDESİNİN ÇEVİRİSEL DİRENÇ ORANINA ETKİSİ

Göreceli Sıklık İle Çevrimsel Direnç Oranı Arasındaki İlişki

Göreceli sıklık ile çevrimsel direnç oranı arasındaki ilişkinin farklı silt yüzdeleriyle olan değişimi Şekil 8’de gösterilmiştir. Bu çalışmada, çevrimsel gerilme oranının 20. çevrim sayısına denk geldiği andaki değer, çevrimsel direnç oranı (CRR) olarak kabul edilmiştir ($CSR_{[N_L=20]}$).



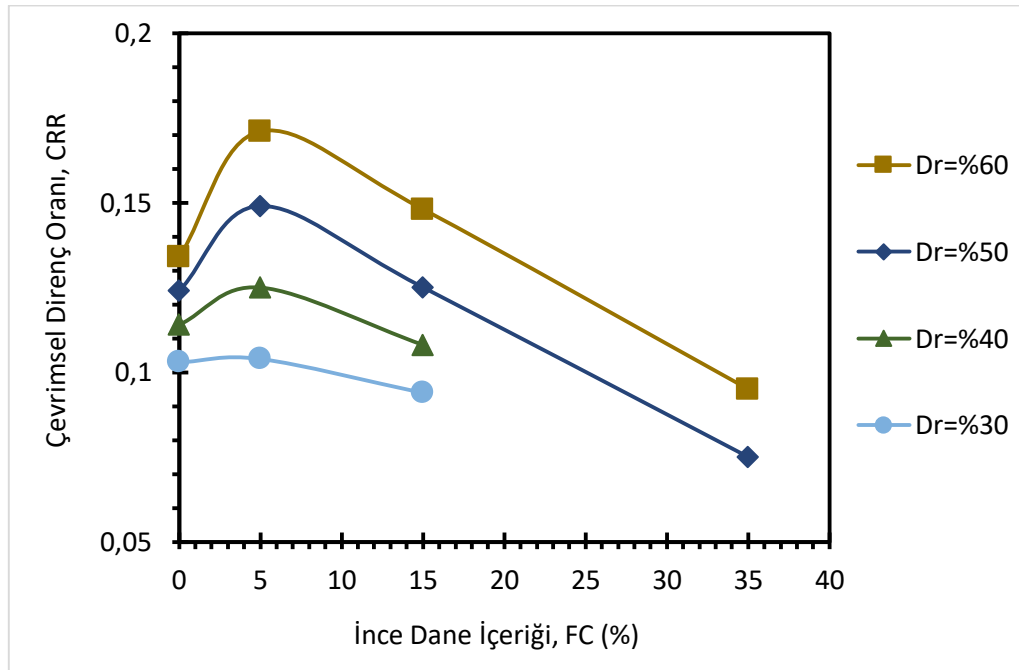
Şekil 8. Göreceli sıklık ile çevrimsel direnç oranı arasındaki ilişki

Şekil 8'de görüldüğü üzere, %5 ince dane içerikli siltli kum temiz kuma göre sıvılaşma direncini açık bir şekilde arttırmıştır. Bir başka deyişle, %5 siltli kum için CRR- D_r eğrisi, temiz kuma göre yukarı doğru ötelenmiştir (Şekil 8). %35 ince dane içerikli siltli kumda ise temiz kuma kıyasla sıvılaşma direnci bariz bir şekilde azalmıştır (CRR- D_r eğrisi, temiz kuma göre aşağıya doğru ötelenmiştir). %15 ince dane içerikli siltli kumda ise diğer ince dane oranlarına kıyasla daha farklı bir durum söz konusu olmuştur. Göreceli sıklığın yaklaşık %45'den düşük olduğu durumlarda temiz kum, %15 ince dane içerikli siltli kumdan daha dirençli iken, göreceli sıklığın %45'den fazla olduğu durumlarda ise %15 ince dane içerikli siltli kum, temiz kuma kıyasla daha dirençli hale gelmiştir. Bu durum, ince dane oranının kumların sıvılaşma direncine etkisinin aynı zamanda göreceli sıklığın değerinden de etkilenebileceğinin ve göreceli sıklığın ne denli önemli bir parametre olduğunun çok açık bir göstergesidir. Burada göreceli sıklığın bir diğer etkisini göstermek bakımından %5 siltli kum ile temiz kumun eğrileri dikkatli bir şekilde incelendiği takdirde, artan göreceli sıklık değerleriyle birlikte, eğrilerin aralarının daha da açıldığını görmek mümkün olacaktır. Daha açık bir ifade ile sabit bir ince dane oranında da (FC) sıvılaşma direncinin silt etkisiyle değişiminin (Δ CRR), kıyaslamaların yapıldığı göreceli sıklık değerinden etkilendiği görülecektir. Benzer bir mukayese ve yukarıdaki ifadenin doğruluğu, Şekil 8'de temiz kum eğrisiyle %35 siltli kum eğrisinin artan D_r ile birbirlerine yaklaştığı gözleminde de yapılabilir.

İnce Dane ile Çevrimsel Direnç Oranı Arasındaki İlişki

İnce dane içeriği ile çevrimsel direnç oranı arasındaki ilişki, göreceli sıklığa bağlı olarak Şekil 9'da, gevşek, orta sıkı ve sıkı durumları temsil edecek şekilde dört farklı D_r 'de gösterilmiştir.

Şekilde görüldüğü üzere, çevrimsel direnç oranı dört farklı göreceli sıkılık değeri için de %5 seviyesinde zirveye ulaşmış, daha sonra artan silt yüzdesiyle birlikte sıvılaşma direnci azalış eğilimine girmiştir. Bir diğer husus ise, zeminin daha sıkı olduğu durumlarda ($D_r = \%50$ ve 60), temiz kum ile %5 ince daneli siltli kumların sıvılaşma dirençleri arasındaki fark fazla iken, daha gevşek zeminlerde ise ($D_r = \%30$ ve 40) bu fark daha az olmuştur. Ancak genel eğilime bakıldığında, göreceli sıkılığın karşılaştırma parametresi olarak seçildiği durumda (sabit bir D_r 'de), artan ince dane oranı ile beraber düşük bir yüzdeye kadar (bu çalışmada %5 civarları) kumların sismik sıvılaşma direncinde önce bir artış olduğu, daha sonra artan silt yüzdesi ile beraber sıvılaşma direncinin düştüğü gözlemlenmiştir. Burada bahsedilen düşme eğiliminin hangi silt yüzdesine kadar devam ettiği veya yüksek silt yüzdelğinde nasıl bir eğilim oluşacağı bu çalışmanın konusu dışındadır. Bu çalışmada $FC \leq \%35$ durumundaki kumların sıvılaşma davranışları incelenmiştir.



Şekil 9. İnce dane içeriği ile çevrimsel direnç oranı arasındaki ilişki

5. SONUÇLAR

Zeminlerin sıvılaşma davranışlarını incelerken çeşitli parametrelerin zeminler üzerindeki etkileri araştırmacılar tarafından bilinen bir olgudur. Bu çalışmada da önemli bir parametre olan silt yüzdesinin kumların sismik sıvılaşma direncine etkileri üzerinde durulmuştur. Bunun için, 3 farklı silt yüzdesi için ($FC = \%5$, 15 ve 35) dinamik basit kesme deney aleti ile yapılan çevrimsel deneyler, 3 farklı çevrimsel gerilme oranında ($CSR = 0,1$, $0,12$ ve $0,14$) ve farklı göreceli sıkılıklarda gerçekleştirilmiştir.

Aşırı boşluk suyu basıncı oranının (r_u) $1,0$ 'e ulaşmış olduğu ya da tepeden tepeye olan kayma birim şekil değişiminin (γ) %10 düzeyine ulaşmış olduğu durumda, zeminlerin sıvılaştığı kabul edilmiştir. Çevrimsel gerilme oranının 20. çevrim sayısına denk geldiği andaki değer ise,

çevrimsel direnç oranı (CRR) olarak belirlenmiştir. Tüm bu yapılan deneyler neticesinde aşağıda belirtilen sonuçlar şöyledir.

- 1) Artan göreceli sıklık değeriyle birlikte beklenildiği üzere sıvılaşma için gereken çevrim sayısı artmıştır. D_r ile CSR arasındaki bu ilişki üstel bir fonksiyon ile ifade edilmiştir. (Denklemler 1)
- 2) Temiz kum ve 3 farklı silt yüzdesinde yapılan deneyler neticesinde, %5 ince dane içerikli siltli kumların temiz kumlara göre sıvılaşma direncini arttırdığı, %35 ince dane içerikli siltli kumların ise temiz kumlara göre sıvılaşma direncini azalttığı gözlemlenmiştir.
- 3) %15 ince dane içerikli siltli kumlarda, %5 ve %35 ince daneli zeminlere göre göreceli sıklığa bağlı olarak sıvılaşma direncinde daha farklı bulgular meydana gelmiştir. Göreceli sıklığın yaklaşık olarak %45'den düşük olduğu durumlarda, %15 ince dane içerikli siltli kumların temiz kumlara kıyasla sıvılaşma direnci daha az iken, göreceli sıklığın %45'den fazla olduğu durumlarda, %15 ince dane içerikli siltli kumların sıvılaşma direncinin temiz kumlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, ince dane oranının kumların sıvılaşma direncine etkisinin aynı zamanda göreceli sıklığın değerinden de etkilenebileceğinin ve göreceli sıklığın ne denli önemli bir parametre olduğunun da açık bir göstergesidir.
- 4) Çevrimsel direnç oranı (CRR) ince dane içeriğinin artışıyla birlikte yaklaşık olarak %5 seviyelerinde zirveye ulaşmış ve bu değerden sonra ince dane içeriği artmaya devam ettikçe çevrimsel direnç oranı azalmaya başlamıştır. Artan göreceli sıklık değerleriyle birlikte ise, %5 ince dane içerikli siltli kumun çevrimsel direnç oranının temiz kuma kıyasla farkı (ΔCRR) daha da artarak belirgin bir hal almıştır. (Şekil 9)

KAYNAKLAR

- Amini F, Qi GZ. Liquefaction testing of stratified silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2000 Mar;126(3):208-17.
- Bayat M, Bayat E. Liquefaction potential of clean and silty sand. *7th National Congress on Civil Engineering*; 7-8 May 2013: University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
- Cubrinovski M, Rees S, Bowman E. Effects of non-plastic fines on liquefaction resistance of sandy soils. *In Earthquake Engineering in Europe*. 2010 (pp. 125-144). Springer, Dordrecht.
- Doygun O, Brandes HG, Roy TT. Effect of Gradation and Non-plastic Fines on Monotonic and Cyclic Simple Shear Strength of Silica Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019 Aug 15;37(4):3221-40.
- Hazirbaba K, Rathje EM. Pore pressure generation of silty sands due to induced cyclic shear strains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009 Dec;135(12):1892-905.
- Idriss IM, Boulanger RW. Soil liquefaction during earthquakes. San Francisco: Earthquake Engineering Research Institute; 2008.
- Jradi L, Dupla JC, Seif El Dine B, Canou J. Effect of fine particles on cyclic liquefaction resistance of sands. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2020 Jan 9:1-6.

- Lade PV, Liggio CD, Yamamuro JA. Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *Geotechnical Testing Journal*. 1998 Dec 1;21:336-47.
- Lade PV, Yamamuro JA. Evaluation of static liquefaction potential of silty sand slopes. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011 Feb;48(2):247-64.
- Monkul MM, Aydın NG, Demirhan B, Şahin M (2020) Undrained Shear Strength and Monotonic Behavior of Different Nonplastic Silts: Sand-Like or Clay-Like? *Geotechnical Testing Journal* 43:20180147. doi: 10.1520/GTJ20180147
- Monkul MM, Etminan E, Şenol A. Coupled influence of content, gradation and shape characteristics of silts on static liquefaction of loose silty sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017 Oct 1;101:12-26.
- Monkul MM, Etminan E, Şenol A (2016) Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 89:185–197. doi: 10.1016/j.soildyn.2017.06.023
- Monkul MM, Gültekin C, Gülver M, et al (2015) Estimation of liquefaction potential from dry and saturated sandy soils under drained constant volume cyclic simple shear loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 75:27–36. doi: 10.1016/j.soildyn.2015.03.019
- Monkul MM, Kendir SB.(2019). “An investigation on the relationship between relative density and seismic liquefaction resistance of sands via cyclic simple shear tests”. Proceedings of the 8th International Geotechnical Symposium, Istanbul, Paper no: 1008, 10p. (USB).
- Monkul, M. M., Kendir, S. B., & Tütüncü, Y. E. (2021). Combined effect of fines content and uniformity coefficient on cyclic liquefaction resistance of silty sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 151, 106999.
- Monkul MM, Yamamuro JA. Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011 Jun;48(6):931-42.
- Monkul MM, Yenigün Ş, Eseller-Bayat E (2018) Importance of Automatization on Dry Funnel Deposited Specimens for Liquefaction Testing. In: Geotechnical Special Publication No 293; Slope Stability and Landslides, Laboratory Testing, and In Situ Testing, ASCE. pp 286–295
- Monkul MM, Yenigün Ş, Eseller-Bayat EE (2017) Kuru kum numunelerin sismik sıvılaşma potansiyelinin dinamik basit kesme deneyinden belirlenmesi. In: Uluslararası Katılımlı 7. Geoteknik Sempozyumu. pp 697–706
- Oka LG, Dewoolkar M, Olson SM. Comparing laboratory-based liquefaction resistance of a sand with non-plastic fines with shear wave velocity-based field case histories. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018 Oct 1;113:162-73.
- Papadopoulou A, Tika T. The effect of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands. *In4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki; 2007 Jun 25 (pp. 25-28).
- Polito CP, Martin II JR. Effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2001 May;127(5):408-15.
- Porcino DD, Diano V. The influence of non-plastic fines on pore water pressure generation and undrained shear strength of sand-silt mixtures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017 Oct 1;101:311-21.

- Porcino DD, Diano V, Tomasello G. Effect of non-plastic fines on cyclic shear strength of sand under an initial static shear stress. *In Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, 2018 (pp. 597-601). Springer, Cham.
- Salgado R, Bandini P, Karim A. Shear strength and stiffness of silty sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2000 May;126(5):451-62.
- Sitharam TG, Dash HK. Effect of non-plastic fines on cyclic behaviour of sandy soils. *In GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation 2008* (pp. 319-326).
- Takch AE, Sadrekarimi A, El Naggar H. Cyclic resistance and liquefaction behavior of silt and sandy silt soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2016 Apr 1;83:98-109.
- Thevanayagam S, Shenthann T, Mohan S, Liang J. Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2002 Oct;128(10):849-59.
- Tütüncü YE, Kendir SB, Monkul MM. Influence of silt content on cyclic liquefaction of sand: conflicting effects of relative density. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE*, 2022.
- Tütüncü Y.E. Influence of Non-Plastic Silt Content on Seismic Liquefaction of Sands. Master Thesis, Yeditepe University, 2022.
- Wang Y, Wang Y. Study of effects of fines content on liquefaction properties of sand. *In Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2010 (pp. 272-277).
- Wei X, Yang J, Zhou Y, and Chen Y. Influence of particle-size disparity on cyclic liquefaction resistance of silty sands. *Géotechnique Letters*. 2020 10:2, 1-7.
- Xenaki VC, Athanasopoulos GA. Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2003 Apr 1;23(3):1-2.
- Yenigün Ş, Monkul MM, Eseller-Bayat EE (2018) Kuru huni yöntemiyle geniş aralıkta göreceli sıklık değerlerinin elde edilmesi. In: Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı. pp 1249–1260

