Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

ÇAKILLI ZEMİNLERİN SINIR BOŞLUK ORANI DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

DETERMINING VOID RATIO LIMITS OF GRAVELLY SOILS

Mehtap KOÇAN[1], Makbule ILGAÇ[2], Havvanur KILIÇ[3]

ÖZET

Bu çalışmada, ince dane içermeyen kumlu çakıl numunesi üzerinde maksimum boşluk oranı (e_{maks}) ve minimum boşluk oranı (e_{min}) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numunesinin ağırlıkça çakıl/kum oranı 1.25 olup dane çapı aralığı 0.075 mm ile 9.5 mm arasındadır. Numuneyi oluşturan danelerin yuvarlaklık sınıfları yarı-yuvarlak ile yuvarlak arasında değişmektedir. Numuneler üzerinde e_{maks} ve e_{min} deneyleri, ASTM tarafından önerilen yöntemlere ek olarak alternatif yöntemlere göre de denenmiştir. e_{maks} deneyleri hacmi 981.65 cm^3 ve 2095.84 cm^3 olan iki farklı kapta, huni ile dökme ve kepçe ile yerleştirme olmak üzere iki farklı yerleştirme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. e_{min} deneyleri ise yine hacmi 981.65 cm^3 ve 2095.84 cm^3 olan iki kapta, titreşimli çekiç yardımıyla yapılmıştır. Deneyler en az 4 kez tekrarlanarak kullanılan yerleştirme yönteminin ve kap hacminin deney sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çakıllı zeminlerin e_{maks} ve e_{min} değerlerinin tercih edilen yöntemden oldukça etkilendiğini ortaya koymaktadır. Ek olarak, farklı yöntemlerle ve farklı sayıda tekrarla elde edilen veri setlerinin hiçbirinde ASTM standartında belirtilen izin verilebilir aralık sağlanamamıştır. Sonuç olarak, çakıllı zeminlerin fiziksel özelliklerinden kaynaklanan deneysel zorluklar tartışmaya açılmış ve bu zeminlerin e_{maks} ve e_{min} değerlerini laboratuvar ortamında istenen doğrulukta belirlemek için daha kapsayıcı çalışmaların gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulduğunun altı çizilmiştir.
Anahtar Kelimeler: *maksimum boşluk oranı, minimum boşluk oranı, çakıllı zeminler*

ABSTRACT

In this study, maximum void ratio (e_{max}) and minimum void ratio (e_{min}) tests were conducted on a gravelly sand containing no fines. The gravel-to-sand ratio of the test material was 1.25 by weight, and the particle sizes ranged from 0.075 to 9.5 mm. The particle roundness varied from sub-rounded to rounded. In addition to the methods recommended by ASTM, alternative procedures were also evaluated. The e_{max} tests were performed in two molds with volumes of 981.65 and 2095.84 cm^3 using two placement methods: funnel pouring and scoop placement. The e_{min} tests were conducted in the same molds using a vibrating hammer. Each test was repeated at least four times to evaluate the effects of the placement method and mold volume on the results. The findings showed that the measured e_{maks} ve e_{min} values were strongly influenced by the selected procedure. Moreover, none of the methods satisfied the acceptable range specified by ASTM.

[1] Araştırma Görevlisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, mehtap.kocan@yildiz.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, makbule.ilgac@yildiz.edu.tr
[3] Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, kilic@yildiz.edu.tr

Consequently, the experimental difficulties arising from the physical characteristics of gravelly soils were discussed, and the need for more comprehensive studies was emphasized.
Keywords: *maximum void ratio, minimum void ratio, gravelly soils*

1. GİRİŞ

İri daneli zeminlerin sırasıyla bulunabileceği en gevşek ve en sıkı hali temsil eden maksimum boşluk oranı (e_{maks}) ve minimum boşluk oranı (e_{min}), bu tür zeminlerin mekanik davranışını, sıkışabilirlik özelliklerini ve taşıma gücünü etkileyen en önemli parametrelerdendir. Bu parametrelerin doğru tayin edilmesi, zeminin rölatif sıkılığının ve buna bağlı olarak diğer özelliklerinin güvenilir şekilde belirlenmesinde etki sahibidir. Dolayısıyla e_{maks} ve e_{min} değerlerinin laboratuvar ortamında istenen doğrulukla belirlenmesi önem arz etmektedir.

Laboratuvarda iri daneli zeminlerin maksimum ve minimum boşluk oranı değerlerini belirlemek, beraberinde bazı deneysel zorlukları getirmektedir. Bunlardan ilki, özellikle çakıl gibi büyük danelere sahip zeminlerde düz bir yüzey elde etmenin zorluğudur (Şekil 1.1). e_{maks} ve e_{min} deneylerinde zeminler, hacmi belli olan bir kaba sırasıyla zemin gevşek ve en sıkı halde olacak şekilde yerleştirilir. Devamında, kütlesi ölçülen zeminin minimum kuru yoğunluk ($\gamma_{k,min}$) ve maksimum kuru yoğunluk ($\gamma_{k,maks}$) değerleri hesaplanır. Bu değerler, zeminin özgül ağırlık (G_s) değerleriyle ilişkilendirilerek sırasıyla zeminin e_{maks} ve e_{min} değerleri hesaplanmış olur. Ancak hacim hesabı yapılırken zeminin hacminin, deneyde kullanılan kabın hacmine eşit olduğu varsayılır. Bu kabulün sağlanabilmesi için yerleştirme veya sıkıştırma işleminin ardından zemin yüzeyinin kap üst kotuyla aynı seviyeye gelecek şekilde düzeltilmesi gerekmektedir. Çakıl boyutunda iri dane içeren zeminlerde ise bunu gerçekleştirmek zordur. Bu nedenle bazı standartlar (örn. BS 1377-4), düz bir yüzeyin elde edilemediği durumlarda zemin yüzeyindeki çıkıntılar yüzeydeki çukurlara eşit olmasını yeterli kabul etmektedir. Ancak çıkıntılarla çukurların birbirine eşit olması şartı, çoğunlukla görsel değerlendirmeye dayandığından önemli ölçüde öznel olup operatörün anlık muhakemesine bağlıdır.



Şekil 1.1: Kum içeren çakıllı zemin numunesi üzerinde e_{maks} deneyinin gerçekleştirilmesi

İkinci zorluk, aynı zemin üzerinde farklı standart veya yönteme göre gerçekleştirilen deneylerin farklı sonuçlar vermesidir (örn. Lade vd., 1998; Yılmaz, 2006; Yılmaz vd., 2008). Lunne vd. (2019), yaptıkları çalışmada minimum ve maksimum kuru yoğunluk değerlerini belirlemek için geliştirilen standartlar ve yöntemlerde bir fikir birliğine ulaşılmadığının altını çizmiş ve kullanılan yöntemin sonuçlara etkisini anlamak için bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Deneyler BS, ASTM, DIN, DGF, NGI standartları ile Geolabs ve Fugro şirketlerinin yöntemleri kullanılarak mineralojisi ve ince dane içeriği farklı olan 6 farklı kum üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar, $\gamma_{k,min}$ ve $\gamma_{k,maks}$ sonuçlarının kullanılan yönteme göre değişiklik gösterdiğini ve değer aralığının ise kullanılan kuma göre değiştiğini ortaya koymuştur. Çakıllı zeminler için böyle bir çalışmaya denk gelinmemiştir.

Bu çalışmada, ince dane içermeyen kumlu çakıl numunesi üzerinde maksimum boşluk oranı (e_{maks}) ve minimum boşluk oranı (e_{min}) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numunesi, dane çapı 12.7 mm ile 19 mm arasında değişen kırma taşın Los Angeles aşındırma cihazında aşındırılmasıyla elde edilmiştir. Aşındırılma sonucu elde edilen deney numunesi ağırlıkça %55.6 çakıl, %44.4 kum içermektedir ve dane çapı aralığı 0.075 mm ile 9.5 mm arasında değişmektedir. Dolayısıyla çakıl ile kum danelerinin mineralojik kökeni aynıdır. Numuneyi oluşturan danelerin yuvarlaklık sınıfları ise yarı-yuvarlak ile yuvarlak arasındadır. e_{maks} deneyleri hacmi 982 cm^3 ve 2096 cm^3 olan iki farklı kapta, huni ile dökme ve kepçe ile yerleştirme olmak üzere iki farklı yerleştirme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. e_{min} deneyleri ise yine hacmi 982 cm^3 ve 2096 cm^3 olan iki kapta, titreşimli çekiç yardımıyla yapılmıştır. Deneyler en az 4 kez tekrarlanarak kullanılan yerleştirme yönteminin ve kap hacminin deney sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL

Bu çalışmada kullanılan kumlu çakıl zemin numunesi, Şekil 2.1'deki gibi koyu gri renklidir. Orijinal dane boyutu 12.7 mm ile 19 mm arasında değişen malzeme, daha iyi derecelenmiş hale getirilmek üzere Los Angeles aşındırma cihazında yaklaşık 30 dk aşındırılarak malzemenin ortalama dane boyutu küçültülmüştür. Aşındırılma sonucu elde edilen numune öncelikle 200 numaralı elek üzerinde yıkanarak numune içinde ince dane bulunmamasına özen gösterilmiştir. Devamında numunenin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla numune üzerinde elek analizi ile özgül ağırlık tayini deneyleri sırasıyla ASTM D6913 ile ASTM D854 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Tablo 2.1'de özetlenmiştir.



Şekil 2.1 Deney numunesi

Tablo 2.1 Deney numunesine ait granülometrik özellikler

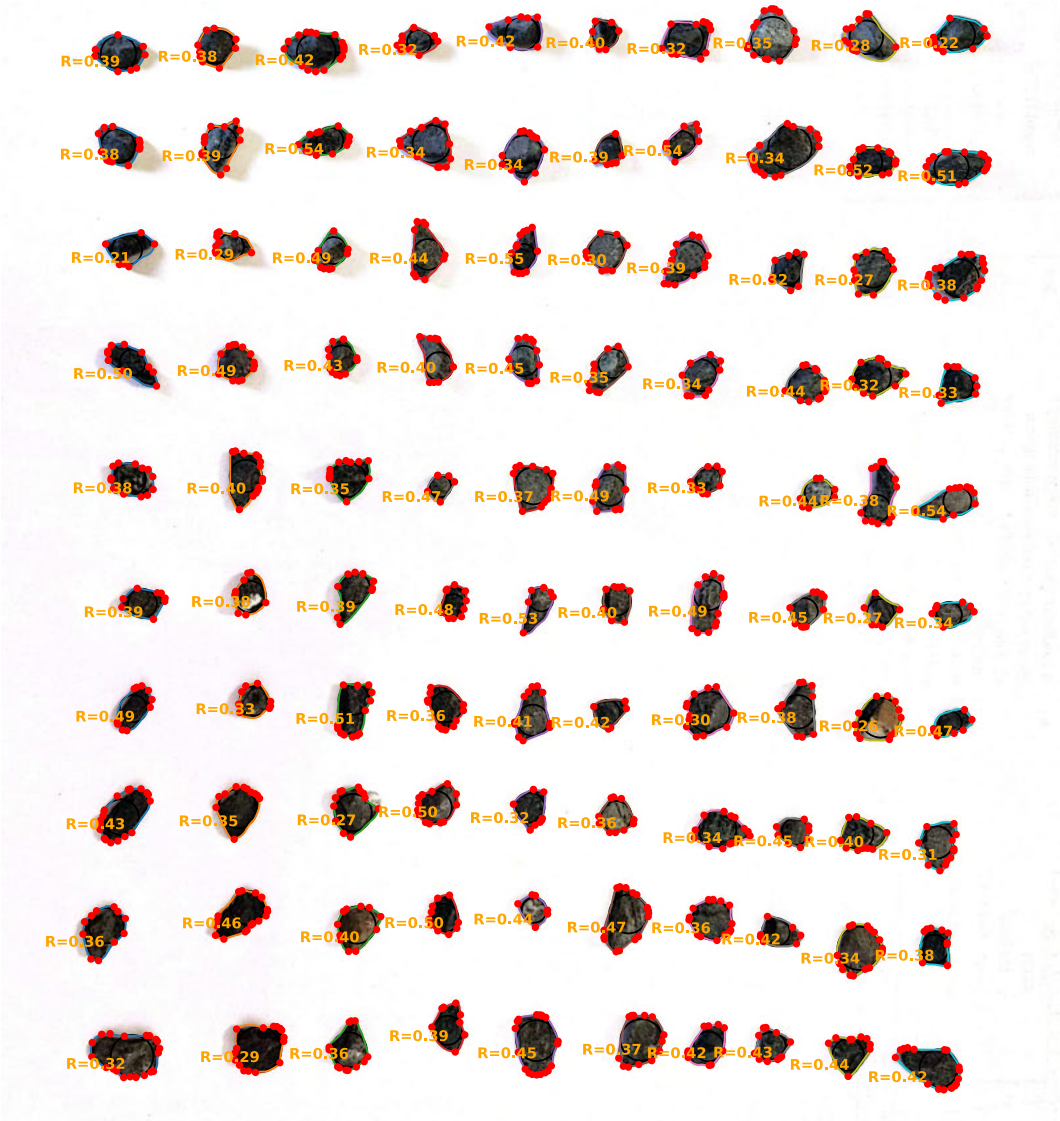
Numune	Çakıl İçeriği (%)	Kum İçeriği (%)	İnce Dane İçeriği (%)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	C_c	C_u	Gs	Zemin Sınıfı
NF	55.6	44.4	0.0	0.6	3.0	5.2	6.0	10.9	2.7	2.77	GP

Danelerin şekilsel özelliklerinin zeminlerin maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri üzerinde etkili olduğuna dair literatürde çalışmalar mevcuttur (örn. Miura vd., 1997; Okuyama vd., 1999; Youd, 1973; Shimobe ve Moroto, 1995). Bu nedenle, bu çalışmada deney numunesinin granülometrik özelliklerine ek olarak şekilsel özelliklerinin de belirlenmesi amaçlanmıştır. Danelerin yuvarlaklık (R) değerleri ve sınıfları, Wadell (1935) tarafından ortaya konan tanıma göre belirlenmiştir. Bunun için numune, dane çapları 0.85 – 2 mm, 2 mm – 4.75 mm ile 4.75 mm – 9.5 mm arasında değişen 3 gruba ayrılarak her gruptan rastgele 100 adet dane seçilmiştir. Danelerin mobil cihaz aracılığıyla görüntüleri çekilmiştir. Elde edilen görüntülerden, Python programlama dili aracılığıyla danelerin konturları ve köşeleri belirlenmiştir. Devamında köşelere ait ortalama eğrilik yarı çapları hesaplanmıştır. Son adımda ise her bir dane için, dane konturu içine sığabilecek en büyük çemberin yarı çapı hesaplanmış, köşelerin ortalama eğriliği bu değere bölünerek her bir dane için yuvarlaklık değeri hesaplanmıştır. Dane çapı 4.75 mm ile 9.5 mm arasında değişen daneler için örnek bir analiz çıktısı Şekil 2.2'de sunulmuştur.

Danelerin fotoğrafının mobil cihaz aracılığıyla çekilmesi nedeniyle 0.85 mm'den küçük daneler için yeterli çözünürlükte görüntü alınamamıştır. Bu nedenle belirlenen yuvarlaklık deneylerinin, üzerinde çalışılan numunenin şekilsel özellikleri hakkında bir fikir vermesi amacıyla yapıldığı not edilmelidir. Şekilsel özelliklerin bir parametre olarak değerlendirildiği çalışmalarda daha yüksek çözünürlükte görüntü vermeye yarayan daha gelişmiş tekniklerin kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Yukarıda detaylandırılan prosedüre göre üç adet dane çapı aralığı için belirlenen yuvarlaklık değerleri ve sınıfları Tablo 2.2'de özetlenmiştir. Tablo incelendiğinde, danelerin yuvarlaklık sınıfının yarı-yuvarlak ile yuvarlak arasında olduğu çıkarımı yapılabilir.

Tablo 2.2 Kırma taş danelerinin boyutuna göre yuvarlaklık sınıfları

Dane Boyutu Aralığı (mm)	Ortalama R Değeri	Yuvarlaklık Sınıfı
0.85 – 2	0.54	Yuvarlak
2 – 4.75	0.35	Yarı-yuvarlak
4.75 – 9.5	0.39	Yarı-yuvarlak



Şekil 2.2 Boyutu 4.75 mm – 9.5 mm arasında değişen daneler için R değerleri

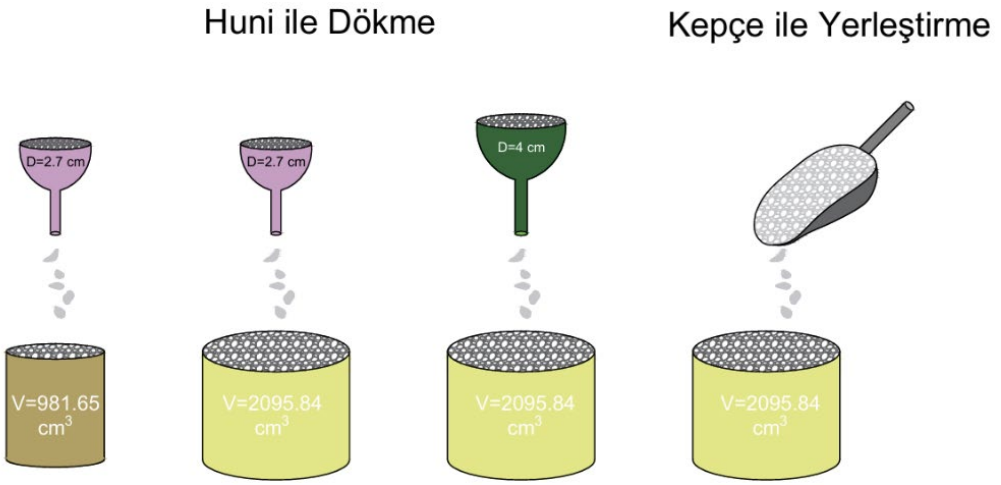
3. YÖNTEM

Bu kısımda deney numunesi üzerinde gerçekleştirilen maksimum boşluk oranı (e_{maks}) ve minimum boşluk oranı (e_{min}) deneyleri detaylandırılmıştır. e_{maks} ve e_{min} deneyleri için takip edilen farklı standartlar ve/veya yöntemler mevcut olmakla birlikte Türkiye'de, zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği alanında yaygın olarak ASTM ve TSE standartları takip edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, uluslararası literatürle karşılaştırma yapabilmek adına deneylerde ASTM standartları takip edilmiştir. e_{maks} ve e_{min} deneyleri, ASTM standartlarına ek olarak, farklı yerleştirme yöntemleri ve farklı hacimdeki kaplar kullanılarak en az dört kez tekrarlanmıştır. Deney sonuçlarından hareketle tercih edilen yerleştirme yönteminin ve kap hacminin e_{maks} ve e_{min} değerleri üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Deneyler sonucunda, farklı yöntemlere göre elde edilen veri setlerinin standart sapması ve aralığı belirlenerek ASTM tarafından belirlenen izin verilebilir aralıkla karşılaştırılmıştır.

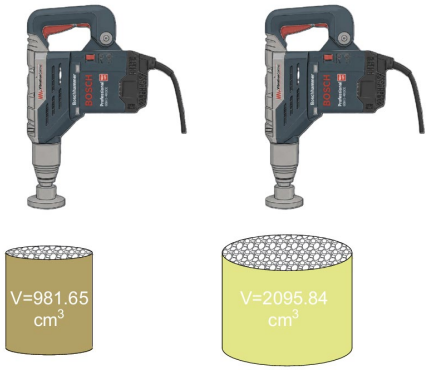
e_{maks} deneyleri için ASTM D4254 takip edilmiştir. ASTM D4254'e göre maksimum dane çapına uygun olarak önerilen yerleştirme yöntemleri Tablo 2.3'deki gibidir. Bu çalışmada kullanılan numunenin maksimum dane çapı 9.5 mm'dir. Bu sebeple minimum indeks deneyi için açıklığı 2.7 cm olan bir huni kullanılmıştır. Ancak deney esnasında zemin, sürekli olarak huni ağzında tıkanmıştır. Tıkanıklık zeminin, huniden kaba doğru olan kesintisiz akışını engellemiştir. Ek olarak tıkanıklığı el yardımıyla açmak, danelerin kaba doğru sert bir şekilde düşmesine ve zeminin sıkışmasına yol açmıştır. Bu nedenle deneyler, açıklığı 4 cm olan bir huniyle tekrarlanmış ancak benzer sorunlar gözlemlenmiştir. Çözüm olarak, ASTM standartının bir büyük maksimum dane çapı için önerdiği kepçe ile yerleştirme metodu tercih edilmiştir. Farklı hacimdeki kaplarda ve farklı yöntemlerle gerçekleştirilen maksimum boşluk oranı deneyleri, Şekil 3.1'de özetlenmiştir. e_{min} deneyleri ise ASTM 7382 tarafından önerilen şartları sağlayan Bosch Professional GBH 5-40 DCE marka titreşimli çekiç yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı hacimdeki kaplarda gerçekleştirilen minimum boşluk oranı deneyleri görsel olarak Şekil 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.3 ASTM D4254'ün farklı maksimum dane çaplarına göre önerdiği yerleştirme yöntemleri

Maksimum Dane Çapı (mm)	Kullanılacak Yerleştirme Yöntemi
75	Kürek veya büyük bir kepçe
38.1	Kepçe
19	Kepçe
9.5	Açıklığı 25 mm olan huni
4.75 veya daha küçük	Açıklığı 13 mm olan huni

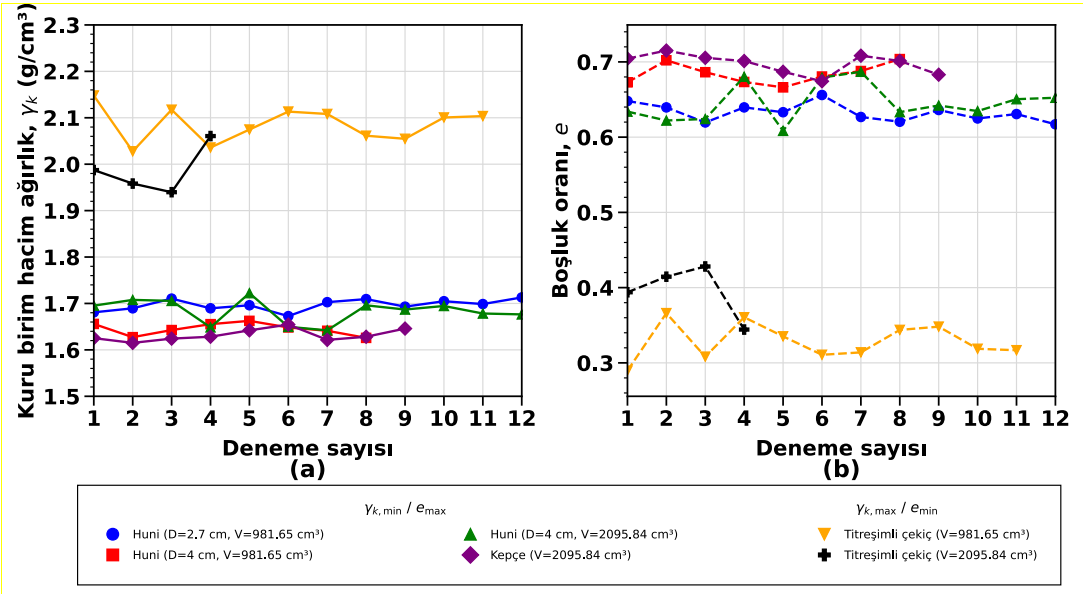


Şekil 3.1 e_{maks} deneylerinde kullanılan yöntemler



Şekil 3.2 e_{min} deneylerinde kullanılan yöntemler

Minimum ve maksimum kuru yoğunluklar ile bu değerlere karşılık gelen maksimum ve minimum boşluk oranı değerlerinin deneme sayısına ve yöntemlere göre değişimi Şekil 3.3'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde e_{maks} deneylerinde kabın hacminin ve kullanılan yerleştirme yönteminin deney sonuçları üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Deney sonuçları karşılaştırıldığında, kepçe ile yerleştirmenin en büyük e_{maks} değerini verdiği görülmektedir. Huni ile dökme yöntemlerinde ise kap hacmi aynı (V= 981.65 cm^3) ama huni açıklığı farklı (D_h=2.7 cm ve D_h= 4 cm) olan deneylerde, daha küçük huni açıklığı ile gerçekleştirilen deneylerin daha düşük e_{maks} değeri verdiği gözlemlenmektedir. Huni ağızlığı daraldıkça danelerin kaptan huniye doğru akışının daha fazla kesildiği göz önüne alınırsa bu farklılık anlam kazanır. Ek olarak huni açıklığı aynı (D_h= 4cm) ama kap hacmi farklı (V= 981.65 cm^3 ve V= 2095.84 cm^3) olan deneylerde, daha düşük kaptaki hacimde tekrarlanan deneylerin daha yüksek e_{maks} değerleri verdiği fark edilebilir. e_{min} deneylerinde ise tek bir sıkıştırma yöntemi kullanılmış ancak zeminin sıkıştırıldığı kabın hacmi değişiklik göstermiştir. Deney sonuçlarına göre zeminin sıkıştırıldığı kabın hacminin artmasıyla beraber kaydedilen e_{min} değerleri artmıştır.



Şekil 3.3 Deney numunesine ait (a) $\gamma_{k,min}$ ve $\gamma_{k,maks}$ (b) e_{maks} ve e_{min} değerlerinin deneme sayısına ve kullanılan yönteme göre değişimi

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 3.3 incelendiğinde, deney sonuçlarının, kullanılan yerleştirme yöntemine ve kap hacmine göre değişiklik gösterdiği görülmektedir. Çakıllı zeminlerin sahip olduğu iri dane boyutları nedeniyle, aynı zemin kütlesinden deney için alınan örneklerin dane boyu dağılımlarında farklılıklar oluşabilmektedir. Bu nedenle, deney sonuçlarında belirli düzeyde sapmalar görülmesi muhtemeldir. Bu noktada cevaplanması gereken iki kritik soru mevcuttur. İlki, kabul edilebilir sınırların nasıl belirlendiğidir. İkincisi ise deney sonuçlarının kabul edilebilir aralıkta kalıp kalmadığıdır.

İlk soruya cevap olarak ASTM D4254 standartında, zemin sınıfı SP olan numune üzerinde deneyler gerçekleştirilmiş ve ASTM E177'ye göre deney sonuçlarında olması gereken izin verilebilir aralık $1.96 \times \sqrt{2} \times s$ olarak belirlenmiştir. Burada "s" ile belirtilen ilgili veri setine ait standart sapma değeridir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deney sonuçları Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Tabloda ek olarak 6 farklı veri setine ait kuru yoğunluk değerlerinin standart sapma ve aralık hesaplanarak ASTM tarafından belirtilen izin verilebilir aralıkla karşılaştırılmıştır. ASTM tarafından sunulan izin verilebilir aralık, yoğunluk cinsinden verildiği için, farklı veri setleri için yapılan istatistiki değerlendirmeler de minimum ve maksimum kuru yoğunluklar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu noktada, minimum kuru yoğunluk ($\gamma_{k,min}$) değerinin maksimum boşluk oranına (e_{maks}), maksimum kuru yoğunluk değerinin ($\gamma_{k,maks}$) ise minimum boşluk oranına (e_{min}) denk geldiğinin hatırlatılmasında fayda görülmektedir.

Tablo incelendiğinde, minimum kuru yoğunluk deneylerinde izin verilen aralığa en yakın sonuçların kepçe ile yerleştirme yönteminin verdiği görülmektedir. Bu yöntem, aynı zamanda en düşük minimum kuru yoğunluk değerlerini üretmiştir. Maksimum kuru yoğunluk deneylerinde ise 2095.84 cm^3 hacme sahip kapta sıkıştırılan numunelere ait veri seti, 981.65 cm^3'lük kapta sıkıştırılan numunelere ait veri setine göre izin verilen aralığa daha yakın sonuçlar vermiştir. Burada dikkat edilmesi gereken kısım, daha küçük hacme sahip kap kullanılan deneylerin daha büyük maksimum kuru yoğunluk değerleri üretmesi

ancak bu deneylerdeki değişkenliğin daha fazla olmasıdır. Dolayısıyla, maksimum kuru yoğunluk deneylerinde en yüksek yoğunluk deneylerini veren yöntemler direkt olarak uygulanmamalıdır.

Tablo 4.1'deki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, bütün veri setleri için hesaplanan aralık değerlerinin, ASTM tarafından sunulan aralığı aştığı görülmektedir. Dolayısıyla, deney sonuçlarının kabul edilebilir sınırlarda kalıp kalmadığı sorusunun cevabı olumsuzdur. Ancak, bu değerlendirmeyi yaparken ilgili standartın kumlar üzerinde yapılan deneyleri dikkate aldığının altı çizilmelidir. Dolayısıyla çakıllı zeminlerin fiziksel özelliklerinin doğurduğu deneysel zorlukları göz önüne alan bir standartın geliştirilmesi gerektiğinin altı çizilmektedir.

Tablo 4.1 Farklı yöntemlerden elde edilen $\gamma_{k,min}$ ve $\gamma_{k,maks}$ değerlerinin istatistiki olarak değerlendirilmesi

Deney	Yöntem	Huni Çapı, D_h (cm)	Kap Hacmi, V_k (cm^3)	Deney Tekrar Sayısı	Standart Sapma, s (g/cm^3)	Aralık (g/cm^3)	İzin Verilen Aralık (g/cm^3)	Aralık/ İzin Verilen Aralık (%)
$\gamma_{k,min}$	Huni ile Dökme	2.7	981.65	12	0.004	0.040	0.011	363.6
		4	981.65	8	0.005	0.037	0.014	264.3
		4	2095.84	12	0.008	0.080	0.022	363.6
	Kepçe ile Yerleştirme	-	2095.84	9	0.007	0.026	0.019	130.0
$\gamma_{k,maks}$	Titreşimli Çekiç ile Sıkıştırma	-	981.65	11	0.016	0.120	0.044	266.7
		-	2095.84	4	0.031	0.121	0.086	139.1

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, kullanılan yerleştirme yönteminin ve kap hacminin, çakıllı zeminlerin maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, ağırlıkça çakıl/kum oranı 1.25 olan ve ince dane içermeyen kumlu çakıl malzemesi deney numunesi olarak seçilmiştir. Numunenin yuvarlaklık sınıfı yarı-yuvarlak ile yuvarlak arasında olup dane boyutları 0.075 mm ile 9.5 mm arasında değişmektedir.

Numune üzerinde e_{maks} ve e_{min} deneyleri, sırasıyla ASTM D4254 ve ASTM D7382 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Standartlara ek olarak, deneyler farklı yerleştirme yöntemleriyle ve farklı hacimdeki kaplarla tekrarlanmıştır. e_{maks} deneyleri toplam dört farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir:

- Zemini, hacmi 981.65 cm^3 olan bir kaba açıklığı 2.7 cm olan bir huni aracılığıyla yerleştirme
- Zemini, hacmi 981.65 cm^3 olan bir kaba açıklığı 4 cm olan bir huni aracılığıyla yerleştirme
- Zemini, hacmi 2095.84 cm^3 olan bir kaba açıklığı 4 cm olan bir huni aracılığıyla yerleştirme
- Zemini, hacmi 2095.84 cm^3 olan bir kaba bir kepçe aracılığıyla yerleştirme.

e_{min} deneyleri ise iki farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir:

- Zemini, hacmi 981.65 cm^3 bir kap içerisinde titreşimli çekiç ile sıkıştırma
- Zemini, hacmi 2095.84 cm^3 bir kap içerisinde titreşimli çekiç ile sıkıştırma

Deneyler en az dört kez tekrarlanarak farklı yöntemler için toplamda 6 farklı veri seti elde edilmiştir. Veri setleri için standart sapma ve aralık değerleri belirlenmiş, bu değerler ASTM tarafından sunulan izin verilebilir aralıkla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- e_{maks} ve e_{min} değerleri, kullanılan yerleştirme yöntemine ve kap hacmine göre değişiklik göstermektedir.
- e_{maks} deneyleri için en yüksek değeri, kepçe ile yerleştirme yöntemi vermiştir. Bu yöntem, aynı zamanda ASTM'nin belirlediği izin verilebilir aralığa en yakın değerleri üreten minimum kuru yoğunluk yöntemidir.
- e_{maks} deneylerinde en düşük değer ise zeminin 2.7 cm açıklığa sahip bir huni aracılığıyla 981.65 cm^3 hacmindeki bir kaba yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. Huni ağzı küçüldükçe, zeminin huniden kaba akışının sürekli olarak bölünmesinin böyle bir sonuca sebebiyet verdiği düşünülmektedir.
- e_{min} deneylerinde ise numunenin daha küçük hacimde sıkıştırıldığı deneyler daha düşük e_{min} değerleri üretmiştir. Ancak bu deneylere ait veri setindeki aralık, daha büyük hacimli kapta gerçekleştirilen deneylere kıyasla ASTM tarafından belirtilen kabul edilebilir aralıktan daha fazla sapmıştır. Dolayısıyla e_{min} deneylerinde en düşük değeri veren yöntem uygulamaya geçirilmeden önce bu trendin nedenleri ve sonuçların tekrarlanabilirliği iyice araştırılmalıdır.
- Altı veri setinin hepsinde ASTM tarafından belirlenen izin verilen aralık aşılmıştır. Bu değerlendirme yapılırken ASTM'nin kumlar üzerinde gerçekleştirdiği deneyler aracılığıyla böyle bir aralık sunduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, çakıllı zeminlerin laboratuvar ortamında incelenmesi, bu zeminlerin iri dane boyutlarına sahip olması nedeniyle çeşitli deneysel zorlukları beraberinde getirmektedir. Çakıllı zeminlerin e_{min} ve e_{maks} değerlerinin istenen doğruluk ve tekrarlanabilirlik düzeyinde belirlenmesi, bu zeminler üzerinde gerçekleştirilecek diğer deneysel çalışmaların güvenilirliğinin artırılmasında önemli bir rol oynayacaktır. Bu nedenle, çakıllı zeminlerin fiziksel özelliklerini ve deney sırasında karşılaşılan uygulama güçlüklerini dikkate alan daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

ASTM International (2002), "ASTM D854-02, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM International (2009), "ASTM D6913-04(2009)e1, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis", ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM International (2016), "ASTM D4254-16, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM International (2025), "ASTM D7382-25, Standard Test Methods for Determination of Maximum Dry Unit Weight of Granular Soils Using a Vibrating Hammer", ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM International (2026), "ASTM E177-26a, Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods", ASTM International, West Conshohocken, PA.

British Standards Institution (1990), "BS 1377: Part 4, British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes—Part 4: Compaction-Related Tests", British Standards Institution, London.

Lade, P.V., Liggio, C.D. ve Yamamuro, J.A. (1998), "Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand", *Geotechnical Testing Journal*, Vol 21, No 4, 336-347.

Lunne, T., Knudsen, S., Blaker, Ø., Vestgården, T., Powell, J.J.M., Wallace, C.F., Krogh, L., Thomsen, N.V., Yetginer, G. ve Ghanekar, R.K. (2019), "Methods Used to Determine Maximum and Minimum Dry Unit Weights of Sand: Is There a Need for a New Standard?", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 56, No 4, 536-553.

Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M. ve Toki, S. (1997), "Physical Characteristics of Sands with Different Primary Properties", *Soils and Foundations*, Vol 37, No 3, 53-64.

Okuyama, K., Fujiwara, M., Ochi, H. ve Inoue, M. (1999), "Expansion of Maximum Particle Size Limitation Value in Test for Maximum and Minimum Densities of Sands", *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol 638, No III-49, 11-27.

Shimobe, S. ve Moroto, N. (1995), "A New Classification Chart for Sand Liquefaction", *Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo, Vol 1, 315-320.

Wadell, H. (1935), "Volume, Shape, and Roundness of Quartz Particles", *The Journal of Geology*, Vol 43, No 3, 250-280.

Yılmaz, Y. (2006), "Relations Between Liquefaction Resistance Obtained from Cyclic Triaxial Test Conducted on Various Graded Sand and Direct Shear Box and Hydraulic Conductivity Test Results", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 268 s.

Yılmaz, Y., Mollamahmutoğlu, M., Özaydın, V. ve Kayabalı, K. (2008), "Experimental Investigation of the Effect of Grading Characteristics on the Liquefaction Resistance of Various Graded Sands", *Engineering Geology*, Vol 100, 91-100.

Youd, T.L. (1973), "Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands", *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils*, ASTM STP 523, American Society for Testing and Materials, 98-112.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
D_{10}	%10 geçen yüzdeye karşılık gelen çap	D_h	Huni açıklığı (mm)
D_{50}	%50 geçen yüzdeye karşılık gelen çap	e_{maks}	Maksimum boşluk oranı
D_{30}	%30 geçen yüzdeye karşılık gelen çap	$\gamma_{k,maks}$	Maksimum kuru yoğunluk
D_{60}	%60 geçen yüzdeye karşılık gelen çap	e_{min}	Minimum boşluk oranı
R	Dane yuvarlaklık değeri	$\gamma_{k,min}$	Minimum kuru yoğunluk
V_k	Deney kabının hacmi	C_u	Üniformluk katsayısı
C_c	Derecelenme katsayısı	s	Standart sapma