Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

REVİZE ZEMİN SINIFLANDIRMA SİSTEMİ (2017) VE FARKLI ZEMİN SINIFLANDIRMA SİSTEMLERİ İÇİN BİR YAZILIM

REVISED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM (2017) AND A SOFTWARE FOR DIFFERENT SOIL CLASSIFICATION SYSTEMS

Batuhan Barış DÖĞER[1], Erol BOZ[2], Furkan Kağan EKİCİ[3]
Nejan HUVAJ[4]

ÖZET

Bu çalışmanın amacı farklı zemin sınıflandırma sistemlerine göre (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi USCS, BS 5930, TS EN ISO 14688 ve Revize Zemin Sınıflandırma Sistemi (Park ve Santamarina 2017), AASHTO vb.) zeminlerin sınıflandırmasını karşılaştırmak; hangi zemin türleri için farklı zemin sınıflandırma sistemlerine göre farklı isimlendirme oluşacağını ve bunun önemini ortaya koymak; ve zemin sınıflandırması için geliştirilen bir yazılımı sunmaktır. 2017 yılında Park ve Santamarina tarafından önerilmiş olan "Revize Zemin Sınıflandırma Sistemi, RSCS", görece daha yeni bir sistem olduğu ve diğer sistemlere göre bir nebze daha karmaşık görülebileceği için bu sistemle ilgili açıklamalara ve bu sisteme neden ihtiyaç duyulduğu konusuna yer verilmiştir. Bildiri kapsamında, her zemin sınıflandırma sistemi için ulusal/uluslararası standartlara göre yapılması gereken indeks deneylerin listesi, deneylerin yapılış yöntemlerindeki farklılıklar ve dikkat edilmesi gereken önemli hususlar vurgulanmaktadır. Geliştirilen yazılım farklı zemin sınıflandırma sistemlerine göre zemin sınıflandırması yapmak üzere kullanıcının sağlayacağı verileri alarak, deney sonuçlarını tablo ve grafikler halinde sunmakta ve farklı sistemlere göre zemin sınıflandırmasını yapabilmektedir. Özellikle çok sayıda zeminin sınıflandırmasının yapılması gereken durumlarda hızlı sonuç ve kullanım kolaylığı sağlaması ile, ve ayrıca farklı zemin sınıflandırma sistemlerini göz önüne alması ile bu yazılım literatürdeki benzerlerinden öne çıkmaktadır. Bildiri kapsamında zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile elde edilen veriler üzerinden farklı zeminlerin sınıflandırmasındaki farklılıklar örnekler ile sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zemin sınıflandırma sistemleri, Revize Zemin Sınıflandırma Sistemi, USCS, BS 5930, TS EN ISO 14688, geoteknik yazılım.

ABSTRACT

The aim of this study is to compare soil classification and naming according to different soil classification systems (Unified Soil Classification System USCS, BS 5930, TS EN ISO 14688 and Revised Soil Classification System (Park and Santamarina 2017), AASHTO, etc.); to reveal which soil types will have different nomenclatures according to different soil classification systems and the importance of this; and to present a software developed for soil classification. The "Revised Soil Classification System, RSCS," proposed by Park and Santamarina in 2017, is relatively newer and may seem somewhat more complex than other systems; therefore, explanations regarding this system and why it is needed are included. Within the scope of this paper, a list of index tests that should be performed according to national/international standards for each soil classification system, the differences in the methods of conducting the tests, and important points to consider are highlighted. The developed software classifies soils according to different soil classification systems by receiving user-provided data and presenting experimental results in tables and graphs. It stands out

[1]Lisans öğrencisi, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, batuhan.doger@metu.edu.tr
[2]Lisans öğrencisi, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, erol.boz@metu.edu.tr
[3]Yüksek lisans öğrencisi, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, e279084@metu.edu.tr
[4]Doç. Dr., ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, nejan@metu.edu.tr (Sorumlu yazar)

from similar applications in the literature due to its ability to provide quick results and ease of use, especially in situations requiring the classification of numerous soils, and also because it takes into account different soil classification systems. This paper presents examples of differences in soil classification based on data obtained from soil mechanics laboratory experiments.

Keywords: Soil classification systems, Revised Soil Classification System, USCS, BS 5930, TS EN ISO 14688, geotechnical software.

1. GİRİŞ

Zemin sınıflandırması; hem evrensel/ortak bir mühendislik terminolojisi tesis etmek hem de bir zeminin mühendislik davranışı hakkında hızlı ve standartlaştırılmış bir öngörü sağlamak amacıyla geoteknik mühendisliğinde kullanılan en temel araçlardan biridir. Dünya genelinde farklı ülke ve kurumlarda Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS, ASTM D2487), İngiliz Standardı (BS 5930) ve AASHTO M 145 (ASTM D3282), TS 1500'ün yerini alan, Eurocode 7 ile uyumlu TS EN ISO 14688 (EN ISO 14688-1 ve -2) gibi farklı sistemler kullanılmaktadır. Farklı zemin sınıflandırma sistemleri iri dane/ince dane sınırlarını ve sınıflandırma eşiklerini farklı biçimde tanımladığından, aynı laboratuvar verisiyle temsil edilen bir zemin, kullanılan sisteme göre farklı isimlendirilebilmektedir. Diğer yandan, farklı oranlarda iri dane – ince dane yüzdeleri içeren zeminlerde, mühendislik uygulamalarında kimi zaman zemin davranışını (drenajlı/drenajsız davranış, taşıma gücü, oturma vb) ince danelerin kontrol ettiği bilinmektedir (örneğin, USCS zemin sınıflandırma sistemine göre, %40 ince dane yüzdesine sahip, killi kum (SC) olarak sınıflandırılan bir zemin). Park ve Santamarina (2017), USCS gibi zemin sınıflandırma sistemlerinin zemin davranışını temsil etmedeki yetersizliklerini gidermek amacıyla Revize Zemin Sınıflandırma Sistemi'ni (RSCS) geliştirmiştir. RSCS, sabit dane boyutu fraksiyon yüzdeleri yerine, iri daneli iskeletin paketlenme/sıkılık durumu sınırları (maksimum/minimum boşluk oranları) ile ince danelerin su tutma kapasitesi, mineraloji ve plastisite özelliklerini bir arada değerlendirerek zemine özgü eşik değerleri kullanmaktadır. Bu bildirinin amacı; (i) RSCS'yi ve gerekliliğini tanıtmak, (ii) RSCS'yi USCS, BS 5930, AASHTO ve TS EN ISO 14688 sistemleriyle karşılaştırmak, (iii) bu beş sistemi bir arada uygulayabilen, yazarlar tarafından geliştirilen SoilClass Pro adlı yazılımı tanıtmak ve (iv) literatürden alınan örnek zeminlerin bu yazılım ile sınıflandırılmasındaki farklılıkları göstermektir.

2. REVİZE ZEMİN SINIFLANDIRMA SİSTEMİ (RSCS) NEDİR VE NEDEN GEREKLİDİR

1942 yılında Casagrande'nin geliştirdiği Havaalanı Zemin Sınıflandırma Sistemi'nden türeyen USCS zemin sınıflandırma sistemi (ASTM D2487), iri daneli zemin/ince daneli zemin ayrımı için elek analizi sonucuna göre ağırlıkça %50 sınırını, ikili sembol (örn. SW-SM) bandı için %5-%12 gibi sabit yüzde eşiklerini kullanmaktadır. Bu sabit eşikler, iri danenin şekli ve sıkılık durumundan ya da ince danenin plastisitesinden bağımsız olarak tanımlanmıştır; oysa aynı yüzdeye sahip ince daneler, gevşek durumda ve yuvarlak şekle sahip iri daneler arasında farklı, sıkı durumda ve köşeli şekle sahip iri daneler arasında ise farklı bir mekanik rol üstlenebilmektedir. İri-ince daneler içeren karışım zeminlerde yükün iri daneler arasındaki doğrudan temasla mı (iskelet kontrolü) yoksa ince danelerin oluşturduğu matris tarafından mı (matris kontrolü) taşındığı klasik zemin sınıflandırma sistemlerinde öngörülemez. Örneğin, iri dane baskın (coarse-dominant) ise yük iskelet temasıyla iletilir; ince dane baskın (fine-dominant) ise iri daneler matris içinde yüzer vaziyettedir, bir diğer deyişle iri daneler birbiri ile temas ederek yük aktarmaz ve mekanik davranışı tamamen ince daneler yönetir. Geçiş zemin (transitional mixture) için ise ince daneler boşlukları doldurur, her iki fraksiyon da yük taşımaya katkı verir.

Park ve Santamarina (2017) tarafından önerilen Revize Zemin Sınıflandırma Sistemi (RSCS), bu sınırlamayı gidermek amacıyla "hangi daneler yükü taşıyor" ve "hangi daneler akışkan geçişini/su akışını kontrol ediyor" sorularına dayanan bir çerçeve sunmaktadır. RSCS'de sınırlar; iri danelerin maksimum ve minimum paketlenme boşluk oranlarına (e_{maks}, e_{min}), iri danelerin şekli, yuvarlaklığı (R) ve derecelenme/üniformluk katsayısı C_u'dan da tahmin edilebilir (Youd 1973) ve ince danenin likit limitine (LL) bağlı olarak hesaplanmaktadır. Park ve Santamarina (2017) tarafından tanımlanan 13 "belirgin karışım" hesaplanarak iri dane-kum-ince dane üçgen diyagramı üzerinde on farklı zemin grubuna ait sınır poligonları elde edilmektedir.

RSCS'de zemin sınıflandırma sembolleri "mekanik(akış)" biçiminde tarif edilir; örneğin G(G) iri danenin hem yükü taşıdığı hem de akışı kontrol ettiği bir zemini, SF(F) ise kum ve ince danenin birlikte yükü taşıdığı, akışın ise ince dane tarafından kontrol edildiği geçiş bölgesi bir zemini tanımlar. Saf su, 2-M NaCl tuzlu su ve gazyağı ile ayrı ayrı yapılan likit limit deneyleri kullanılarak (Jang ve Santamarina, 2016), ince daneler ayrıca elektriksel duyarlılıklarına göre 12 alt gruba ayrılabilmektedir.

İnce danenin akışkan geçişi üzerindeki kontrolünün likit limitle nasıl değiştiğini ifade etmek için RSCS'de bir "akış parametresi" (λ) tanımlanmıştır; bu parametre Eşitlik (1)'deki gibi hesaplanmaktadır (Park ve Santamarina, 2017).

$$\lambda = 2\ log(LL - 25),\ \ \lambda \geq 1 \qquad (1)$$

Likit limit arttıkça λ parametresi büyümekte; bu da ince danenin akış davranışı (ve dolayısıyla geçirimlilik, konsolidasyon gibi özellikler) üzerindeki etkisinin, plastisite arttıkça güçlendiğini ifade etmektedir.

RSCS'nin sınırları zemine özgü ve değişken olduğundan, aynı yüzdedeki ince dane farklı iri dane özellikleriyle karşılaştığında farklı bir mekanik rol üstleniyorsa bu durum sınıflandırma sembolüne yansımaktadır. Bu yönüyle RSCS'nin, drenajlı/drenajsız davranış, taşıma gücü, oturma, sıvılaşma potansiyeli ve geçirimlilik gibi mühendislik davranışlarının tahmininde, USCS'nin sabit yüzde eşiklerine kıyasla daha tutarlı bir teorik temel sunduğu ileri sürülmektedir (Castro vd., 2023). Bir örnek vermek gerekirse, USCS sisteminde, ağırlıkça %52 iri dane içeren bir zemin "iri daneli" (örneğin kum) olarak sınıflandırılır. Ancak geriye kalan %48'lik ince dane (kil/silt), iri danelerin birbirine değmesini engelleyerek zeminin tüm mekanik davranışını (kayma dayanımı vb.) kontrol edebilir. Ayrıca, RSCS, zeminin hidrolik ve mukavemet özellikleri açısından ne zaman "ince daneli zemin gibi" davranmaya başladığını anlamayı sağlayan bir sınıflandırma sistemi sunar.

3. RSCS'NİN USCS, BS 5930, AASHTO VE TS EN ISO 14688 İLE KARŞILAŞTIRILMASI

RSCS, USCS, BS 5930, AASHTO ve TS EN ISO 14688 zemin sınıflandırma sistemleri, iri dane/ince dane ayrımında farklı elek (dane) boyutları ve farklı eşik yüzdeleri kullanmaktadır (Tablo 1). USCS'de çakıl/kum sınırı 4,75 mm iken BS 5930, AASHTO ve TS EN ISO 14688'de bu sınır 2,0 mm'dir; benzer şekilde kum/ince dane sınırı USCS ve AASHTO'da 0,075 mm iken BS 5930 ve TS EN ISO 14688'de 0,063 mm olarak tanımlanmıştır. Ayrıca iri daneli/ince daneli zemin ayrımı için USCS ve TS EN ISO 14688 %50 sınırını kullanırken, BS 5930 ve AASHTO %35 sınırını esas almaktadır. Bir diğer deyişle, BS 5930, içinde %35 ve daha fazla ince dane yüzdesi içeren bir zemini "ince daneli zemin" olarak sınıflar. AASHTO genel mühendislik davranışını değil, karayolu taban zemini (subgrade) performansını derecelendirmek amacıyla geliştirilmiştir; bu nedenle bir zeminin USCS

sembolü ile AASHTO grubu, sınıflandırma vurgusu bakımından örtüşmeyebilir. TS 1500 standardının yerini alan TS EN ISO 14688 (EN ISO 14688-2:2018), dane boyutu sınırları bağlamında BS 5930 ile paralellik göstermektedir. Buna karşın, ilgili standart plastisiteyi dört ayrı bant (L, M, H, V) üzerinden sınıflandırmakta ve zemin isimlendirmelerini "baskın bileşen + ikincil bileşen" yapısında, küçük harfli semboller (örn. siGr, saClM) kullanarak ifade etmektedir.

Söz konusu iki sistem genel yapısı itibarıyle büyük bir benzerlik taşısa da, iri ve ince dane eşik değerleri (%50 - %35) ile plastisite bantlarındaki farklılıklar neticesinde sınıflandırmada değişken sonuçlar üretebilmektedir. Bu sebeple, mevcut çalışmada TS EN ISO 14688 bağımsız bir sınıflandırma sistemi olarak ele alınmış ve sistemler arası karşılaştırma Tablo 1'de özetlenmiştir. Çalışma kapsamındaki yazılımda kullanılan grup sembolleri ve zemin adlandırmaları ise EN ISO 14688-2:2018 standardı için literatürde sunulan uygulama şemasını (Kovačević vd., 2018) temel almaktadır.

Tablo 1. Farklı zemin sınıflandırma sistemlerinin iri dane/ince dane sınırları

Zemin Sınıflandırma Sistemi	**Çakıl/kum sınırı**	**Kum/ince dane sınırı**	**İri daneli - ince daneli zemin eşiği**	**Plastisite sınıfları (LL)**	**Sembol yapısı / Referans**
USCS	4,75 mm (No.4 elek)	0,075 mm (No.200 elek)	%50 (sabit)	İki bant: L/H (LL = %50)	İki harfli (örn. SC, CL, SW-SM); ASTM D2487
BS 5930	2,0 mm	0,063 mm	%35 (sabit)	Beş bant: L, I, H, V, E (LL = 35, 50, 70, 90)	Büyük harf (örn. GCL, S-CL); BS 5930:2015+A1:2020
AASHTO M 145	2,0 mm	0,075 mm	%35 (sabit)	Sabit bant yok; LL-PI grafiği ve Grup İndeksi (GI) ile değerlendirilir	A-1–A-7 grup sembolleri, parantez içinde Grup İndeksi (örn. A-4 (3)); AASHTO M 145 / ASTM D3282
TS EN ISO 14688	2,0 mm	0,063 mm	%50 (sabit)	Dört bant: L, M, H, V (LL = 35, 50, 70)	Baskın + ikincil bileşen, küçük harf (örn. siGr, saClM); TS EN ISO 14688-2
RSCS	4,75 mm* (oran hesabı için)	0,075 mm* (oran hesabı için)	Zemine özgü, değişken (e_{maks}/e_{min} ve LL'ye bağlı)	12 alt grup (saf su, tuzlu su ve gazyağı ile ölçülen LL)	mekanik(akış), örn. G(G), SF(F); Park ve Santamarina (2017)

Dane boyutu sınırlarındaki bu küçük farklar, sınırda yer alan zeminlerin iri dane oran baskınlığını dahi değiştirebilmektedir. Örneğin, çakıl oranı %32, kum oranı %46 ve ince dane oranı %22 olan killi-çakıllı bir kum numunesi, USCS'de (4,75 mm sınırı ile) kum baskın kabul edilerek "SC - killi, çakıllı kum" olarak sınıflandırılırken; aynı numune BS 5930'da (2,0 mm sınırı ile) çakıl baskın kabul edilerek "GCL - çok killi çakıl" olarak sınıflandırılmaktadır. Bu örnek, yalnızca dane boyutu sınırı tanımındaki bir farkın dahi iri dane oranının baskınlığını ve dolayısıyla nihai zemin grubu ismini değiştirebildiğini göstermektedir.

Beş bantlı bir plastisite skalası (düşük (L), orta (I), yüksek (H), çok yüksek (V) ve aşırı yüksek (E) plastisite) kullanan BS 5930 ile dört bantlı (düşük (L), orta (M), yüksek (H), çok yüksek (V)) bir skala kullanan TS EN ISO 14688, USCS'nin iki bantlı (L/H, LL = %50 sınırı) skalasına göre yüksek plastisiteli zeminler arasındaki farkları daha ayrıntılı temsil edebilmektedir. Ancak bu bantlar da yine sabit LL sınırlarına dayanmaktadır. RSCS bir adım

öteye giderek ince daneleri sabit bir LL skalası yerine Jang ve Santamarina (2016) yöntemiyle -saf su, tuzlu su ve gazyağı ile ölçülen likit limitlere dayanarak- hem plastisite hem de gözenek suyu kimyasına duyarlılık (mineraloji) eksenlerinde 12 alt gruba ayırmaktadır. Bu, zemine özgü eşik değerler mantığı, iri dane tarafında da geçerlidir: RSCS'nin fraksiyon hesabında ASTM'nin #4 / #200 elek sınırları kullanılsa da, üçgen diyagram üzerindeki nihai poligon sınırları sabit değildir; her zemin numunesi için iri dane paketlenme (sıkılık) özellikleri ve ince dane likit limitine göre yeniden hesaplanır. Böylece RSCS, BS 5930 ve TS EN ISO 14688'in sağladığı ayrıntı düzeyini de aşarak sınıflandırmayı tümüyle zemine özgü, fiziksel temelli bir çerçeveye taşımaktadır. Tablo 2'de farklı zemin sınıflandırma sistemlerine göre zeminleri sınıflandırmak için yapılması gereken laboratuvar deneyleri ve girdi verileri özetlenmiştir.

Tablo 2. Farklı zemin sınıflandırma sistemleri için gerekli laboratuvar deneyleri ve girdiler

Sınıflandırma Sistemi	Gerekli laboratuvar deneyleri	Temel girdi verileri
USCS	Elek analizi (ASTM D6913), kıvam (Atterberg) limitleri (ASTM D4318)	No.4/No.200 elek geçen yüzde, D10/D30/D60, LL, PL
BS 5930	Elek analizi (ISO 17892-4), düşen koni yöntemi ile kıvam (Atterberg) limitleri (ISO 17892-12)	2,0/0,063 mm geçen yüzde, LL, PL
AASHTO	Elek analizi (No.10/40/200), Atterberg limitleri (ASTM D4318)	No.10/40/200 geçen yüzde, LL, PI
TS EN ISO 14688	Elek analizi (TS EN ISO 17892-4), düşen koni yöntemi ile kıvam (Atterberg) limitleri (TS EN ISO 17892-12), görsel tanımlama (TS EN ISO 14688-1)	2,0/0,063 mm geçen yüzde, D10/D30/D60, LL, PL
RSCS	Elek analizi (#4/#200), iri dane e_{maks}/e_{min} (ASTM D4253/D4254) veya R ve Cu, düşen koni yöntemi ile LL (opsiyonel: tuzlu su ve gazyağı ile LL)	Çakıl/kum/ince dane yüzdeleri, e_{maks}/e_{min} (veya R, Cu), $LL_{saf\ su}$

4. GELİŞTİRİLEN YAZILIM: SOILCLASS PRO

4.1. Genel Yapı ve Kullanım Akışı

Bu çalışma kapsamında Python programlama dili kullanılarak, USCS, BS 5930, AASHTO M 145, TS EN ISO 14688 ve RSCS sistemlerine göre zemin sınıflandırması yapabilen masaüstü bir uygulama (SoilClass Pro) geliştirilmiştir.

Kullanım akışı beş adımdan oluşmaktadır: (1) başlangıç ekranından Yeni/Aç veya doğrudan bir standart (ASTM/BS/AASHTO/TS EN ISO 14688/RSCS) seçilir; fare imleci bir standardın üzerine getirildiğinde ilgili yönetmelik, gerekli deneyler ve girdi verilerini özetleyen bir bilgi kartı görüntülenir (Şekil 1a); (2) proje adı, numune/sondaj adı, konum, deneyi yapan ve tarih bilgilerini içeren kısa bir proje formu doldurulur; (3) elek analizi ve Atterberg limitleri deneylerinin sonuçları elle girilir ya da Menü → İçe Aktar seçeneğinden CSV/Excel dosyası kullanılarak aktarılır; (4) SINIFLANDIR düğmesine basıldığında sonuçlar ayrı bir sonuç penceresinde, her adımı gerekçelendiren bir karar izlemesi ile birlikte gösterilir (Şekil 1b) ve verilere uygun grafikler sekmeler halinde çizilir; (5) sonuçlar .soilpro uzantılı bir proje dosyası olarak kaydedilebilir veya çok sayfalı bir PDF raporu veya AGS4 dosyası olarak dışa aktarılabilir, program çıktıları JSON formatındadır.

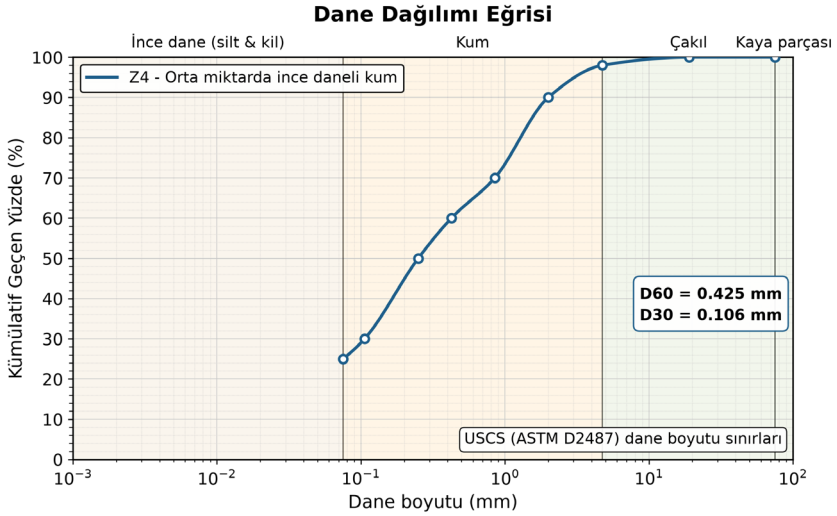


(a) (b)

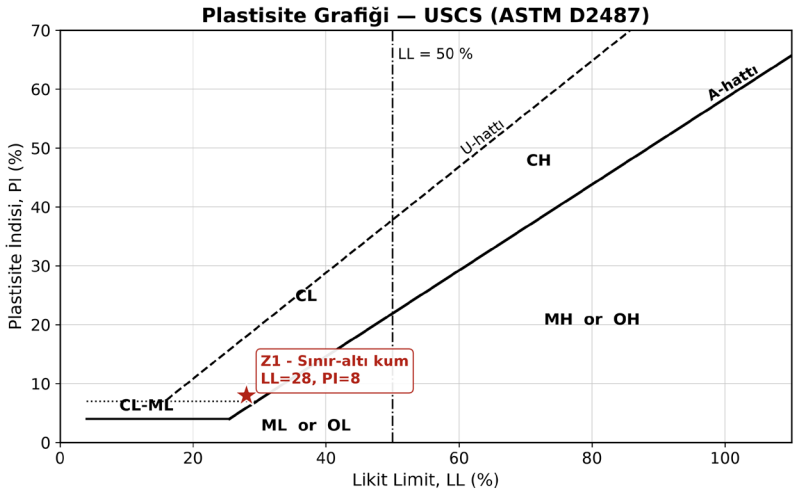
Şekil 1. SoilClass Pro yazılımının arayüzleri (a) zemin sınıflandırma sistemi (TS EN ISO 14688) hakkında bilgi kartı, (b) Z4 zemin örneği için sonuç penceresi: farklı sistemlere göre sınıflandırma özeti ve karar izlemesi

4.2. Sınıflandırma Sistemleri ve Üretilen Grafikler

Yazılım; laboratuvar deney sonuçlarını kullanarak bir zemini USCS (ASTM D2487), BS 5930, AASHTO M 145, TS EN ISO 14688 ve RSCS (Park ve Santamarina 2017) olmak üzere beş zemin sınıflandırma sistemine göre, eşzamanlı olarak sınıflandırmaktadır. Her sınıflandırma sistemi için otomatik olarak ilgili grafik üretilir: yarı-logaritmik dane dağılımı eğrisi (D_{10}, D_{30}, D_{60}, C_u ve C_c değerleri ile birlikte, Şekil 2), USCS Casagrande plastisite grafiği (Şekil 3), BS 5930 ve TS EN ISO 14688 plastisite grafiği, AASHTO LL-PI grafiği ve RSCS diyagramı (Şekil 4). Dane dağılımı grafiğinde USCS, BS 5930, AASHTO, TS EN ISO 14688 ve RSCS dane boyutu sınırları seçilebilmektedir.



Şekil 2. Yazılım tarafından üretilen bir dane dağılımı eğrisi örneği (Tablo 3'teki Z4 için)



Şekil 3. Yazılım tarafından üretilen bir USCS Casagrande plastisite grafiği örneği (Tablo 3'teki Z1 zemin örneği için, LL=%28, PI=%8)

Yazılımda, her sonucun yanında, hangi kritere göre karar verildiği kullanıcıya sunulmaktadır; örneğin siltli bir kum için "Cu = 145,5 (sınır 6) → kötü derecelenmiş" ya da "ince dane oranı %29 → SC-SM" gibi ara adımlar kullanıcıya raporlanmaktadır. Bu şeffaflık, özellikle sınır değerlere yakın numunelerde sonucun manuel olarak kontrol edilebilmesini kolaylaştırmaktadır.

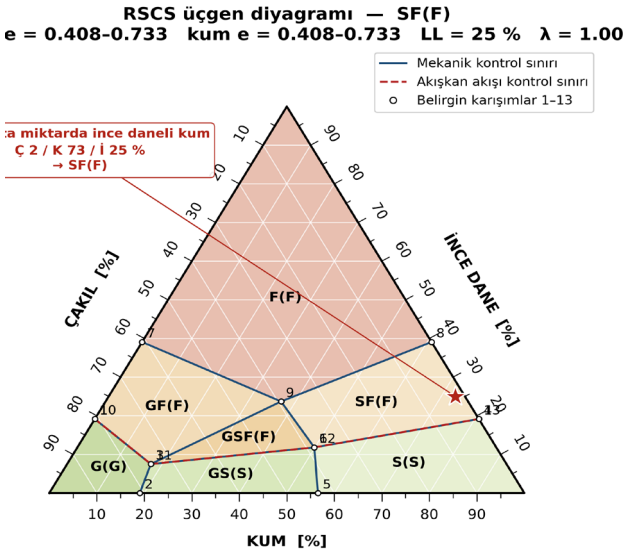
Yazılımın beş sistemi de doğru şekilde uyguladığını ve RSCS'nin diğer sistemlerin ıskaladığı farkları nasıl yakaladığını göstermek amacıyla, birbiriyle kasıtlı olarak eşleştirilmiş dört örnek numune -USCS'nin %50 sınırının hemen altında ve üstünde kalan bir çift (Z1-Z2) ile aynı kum iskeletinde ince dane oranı yalnızca %10'dan %25'e çıkan bir çift (Z3-Z4)- sınıflandırılmış ve sonuçlar Tablo 3'te özetlenmiştir. Z1 "zemin örneği 1" olarak isimlendirmek yerine, bu çalışma için indikatif olması açısından "sınır altı kum" olarak, Z4 "orta miktarda ince daneli kum" olarak isimlendirilmiştir; bu isimlendirmelerin herhangi bir sınıflandırma sistemi ile ilişkisi yoktur. Yazılımın doğruluğu ayrıca, ASTM/BS/AASHTO/TS EN ISO 14688/RSCS kurallarının doğru uygulandığını kontrol eden çok sayıda numune ile test edilmiştir. Yazılımın ürettiği sonuçlar ayrıca Önalp (2025) ders kitabındaki çözümlü bir problemle de (Problem 5.2) karşılaştırılmıştır. Aynı elek analizi verileri ve kıvam limitleri (LL=%41, PL=%20) girildiğinde, yazılımın USCS (ASTM D2487), AASHTO ve TS EN ISO 14688 sonuçları Önalp (2025)'teki çözümle birebir örtüşmektedir (USCS: SC, AASHTO: A-2-7 (0), TS EN ISO 14688: cLSa).

Tablo 3. Yazılım ile sınıflandırılan dört zemin örneğinin sonuçları

Zemin (temsili örnek)	**0.075 mm'den geçen yüzde[1] (%)**	**USCS**	**BS 5930**	**AASHTO M 145**	**TS EN ISO 14688**	**RSCS**
Z1 - Sınır-altı kum	48	SC	GCL	A-4 (3)	clGr	F(F)
Z2 - Sınır-üstü silt/kil	52	CL	GCL	A-4 (3)	clGr	F(F)
Z3 – Az miktarda ince daneli kum	10	SP-SM	S-CL	A-2-4 (0)	clSa	S(S)
Z4 - Orta miktarda ince daneli kum	25	SC-SM	SCL	A-2-4 (0)	clSa	SF(F)

[1] Farklı sınıflandırma sistemlerinde "ince dane" sınırı farklı olmakla birlikte, zemin örneğinin gradasyonu hakkında bir fikir vermek için 0.075 mm değeri tabloda kullanılmıştır.

Tablo 3'teki Z1 ve Z2 örnekleri, ince dane oranı USCS'nin %50 sınırının hemen altında (%48) ve üstünde (%52) kalacak şekilde seçilmiştir; aynı gradasyon ve plastisiteye sahip bu iki zemin USCS'ye göre tamamen farklı bir aileye -sırasıyla killi kum (SC) ve çakıllı düşük plastisiteli kil (CL)- atanırken, BS 5930, AASHTO, TS EN ISO 14688 ve RSCS'nin dördü de Z1 ve Z2 zemin örneklerini aynı şekilde (sırasıyla GCL, A-4 (3), clGr ve F(F)) sınıflandırmaktadır; bu da USCS'nin %50'deki keskin sınırının zemin davranışında karşılığı net olmayan, yapay bir sınır olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca, Z1 zemin örneği, USCS'ye göre "killi kum" olarak sınıflanan, dominant olarak kum zemin olarak ifade edilirken, RSCS'ye göre mekanik davranışını da hidrolik özelliklerini de ince dane yüzdesinin kontrol ettiği F(F) olarak sınıflandırılmaktadır. Z3 ve Z4 örnekleri ise aynı kum iskeletine ve aynı ince dane plastisitesine (LL=%25, PL=%20) sahip olup yalnızca ince dane oranı bakımından (%10 ve %25) farklılaşmaktadır. USCS bunu ikili sembolde ufak bir farklılaştırma (SP-SM → SC-SM) yansıtırken, AASHTO her ikisi için de aynı A-2-4 (0) sonucu vermektedir. BS 5930 (S-CL → SCL) ve TS EN ISO 14688 (siclSa → clSa) de yalnızca ikincil bileşen tanımını değiştirmekte, üçü de zemini kum olarak adlandırmayı sürdürmektedir. RSCS ise köklü bir rejim değişikliği tespit eder: %10 ince dane oranına sahip Z3 zemin örneği, S(S) olarak sınıflandırılır -bir diğer deyişle kum hem mekanik davranışı hem de hidrolik özellikleri kontrol eder, ince danelerin davranıştaki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Öte yandan ince dane yüzdesi %25'e çıktığında, Z4 zemin örneği, SF(F) olarak sınıflandırılır -kum ve ince dane birlikte mekanik davranışı kontrol eder, su akışı gibi hidrolik özellikleri ise ince daneler kontrol eder. USCS, BS 5930, AASHTO ve TS EN ISO 14688'in zemin sınıfı ve isimlendirmesi düzeyinde ayırt edemediği bu geçiş, Şekil 4'teki RSCS üçgen diyagramında görsel olarak izlenebilmektedir.



Şekil 4. Yazılım tarafından üretilen bir RSCS üçgen diyagramı örneği (Tablo 3'teki Z4 zemin örneği için)

Geliştirilen bu uygulama literatürdeki benzerlerinden çeşitli özellikleri ile farklılaşmakta ve öne çıkmaktadır. Literatürde ve mühendislik pratiğinde zemin sınıflandırması için kullanılan çok sayıda hesap tablosu, eklenti ve ticari yazılım modülü bulunmaktadır. Ancak bu araçların büyük bölümü yalnızca tek bir standardı (çoğunlukla USCS) desteklemekte; birden çok sayıda farklı zemin sınıflandırma sistemini içermemekte ve RSCS gibi görece yeni sistemleri içermemektedir. Ticari geoteknik yazılımlarının bir kısmında zemin sınıflandırması, ana analiz modüllerinin (taşıma gücü, oturma, şev stabilitesi vb.) yanında yalnızca yardımcı bir işlev olarak sunulmakta ve genellikle sonucun hangi ara adımlara dayandığını (karar izlemesini) kullanıcıya göstermemektedir.

Bu çalışmada geliştirilen SoilClass Pro, aşağıdaki noktalarda literatürdeki benzer araçlardan ayrışmaktadır: (i) aynı zemin için beş farklı zemin sınıflandırma sistemini (USCS, BS 5930, AASHTO, TS EN ISO 14688, RSCS) eşzamanlı olarak sınıflandırarak karşılaştırmalı bir sonuç sunması; (ii) her sınıflandırma adımını gerekçelendirmesi; (iii) elle veri girişine ek olarak CSV/Excel dosyası kullanım imkanı sağlayarak esnek içe aktarma seçenekleri sunması; (iv) yalnızca ham veriyi saklayan, sürüm bağımsız bir proje dosyası (.soilpro) kullanması; böylece bir sınıflandırma kuralı güncellendiğinde eski projelerin otomatik olarak güncel sonuçla yeniden sınıflandırılabilmesi.

5. LİTERATÜRDEN ÖRNEK ZEMİNLERİN YAZILIM İLE SINIFLANDIRILMASI

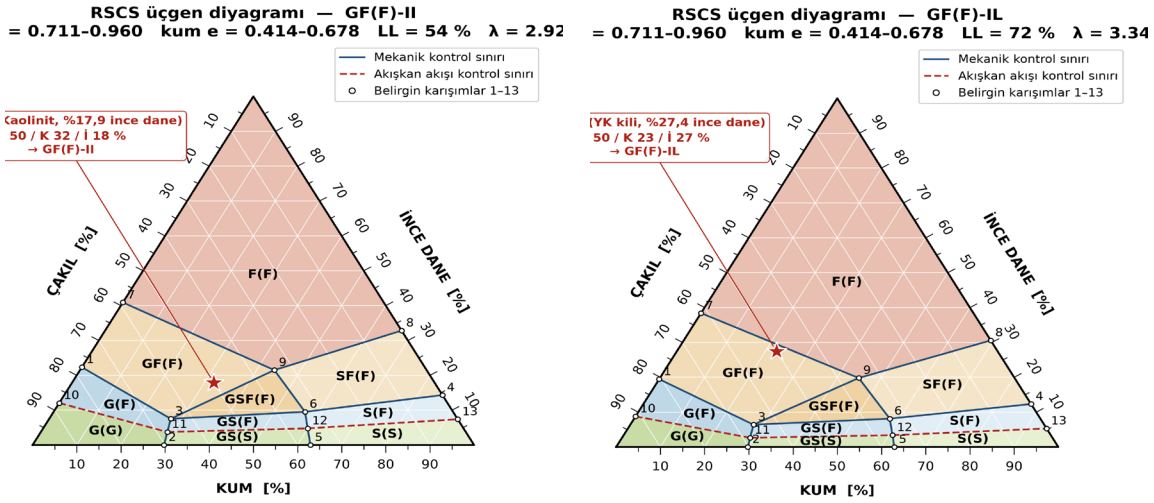
Bu bölümde, Özkul Birgören ve Makttoof (2026) tarafından yapılan bir don kabarması araştırmasından alınan laboratuvar verileri, SoilClass Pro'nun kendi sınıflandırıcıları ve kendi grafik modülleri (RSCS üçgen diyagramı) kullanılarak sınıflandırılmıştır. Çalışmada, iyi derecelenmiş bir kırmataş-kum karışımına üç farklı ince dane türü -plastik olmayan bir silt, kaolinit kili ve yüksek plastisiteli doğal bir kil ("YK kili")- %5,2 ile %18 arasında değişen oranlarda karıştırılmıştır. Bu çalışmada, en yüksek ince dane oranına (~%18) sahip iki karışım -Kaolinit içeren "K Mix 4" ve YK kili içeren "YK Mix 4"- ele alınmıştır.

Bu iki karışımın çakıl/kum/ince dane yüzdeleri, kaynak çalışmada doğrudan ölçülmüş iri dane paketlenme boşluk oranları (çakıl için e_{maks}=0,960, e_{min}=0,711; kum için e_{maks}=0,678, e_{min}=0,414) ve ince dane likit limitleri (saf su, tuzlu su ve gazyağı ile) Tablo 4'te özetlenen değerlerle SoilClass Pro'ya girilmiştir. Yazılımın USCS sınıflandırıcısı, standart Casagrande likit limit ve plastik limit değerlerini (Kaolinit için LL=%50, PL=%31, YK kili için LL=%67, PL=%23) kullanarak K Mix 4'ü GM (siltli çakıl), YK Mix 4'ü ise GC (killi çakıl) olarak sınıflandırmıştır. Kaolinit karışımı için elde edilen bu sonuç, kaynak çalışmada rapor edilen GC sembolünden farklıdır; PI=%19 değeri, LL=%50 için A-hattı değerine (yaklaşık %21,9) çok yakın olduğundan, bu numune USCS'nin silt/kil (M/C) sınırına son derece yakın bir sınır-durum zeminidir ve ondalık düzeydeki küçük farklar sembolü değiştirebilmektedir; bu durum ayrıca USCS'nin sabit eşiklerinin sınır bölgelerdeki kırılganlığına bir örnektir.

Tablo 4. K Mix 4 ve YK Mix 4 karışımlarının (Özkul Birgören ve Makttoof, 2026) SoilClass Pro ile hesaplanan sınıflandırma sonuçları

Karışım	Çakıl, %	Kum, %	İnce Dane, %	USCS (yazılım)	RSCS (yazılım)
K Mix 4 (Kaolinit)	50,0	32,1	17,9	GM	GF(F) – ince dane: II
YK Mix 4 (YK kili)	50,0	22,6	27,4	GC	GF(F) – ince dane: IL

Buna karşılık, yazılımın RSCS (Park ve Santamarina, 2017) sınıflandırıcısı -ölçülmüş e_{maks}/e_{min} değerleri ve üç likit limit değeri girilerek- her iki karışım için de kaynak çalışmayla birebir örtüşen sonuçlar üretmiştir: K Mix 4 → GF(F), ince dane sınıfı II (orta plastisite, orta duyarlılık); YK Mix 4 → GF(F), ince dane sınıfı IL (orta plastisite, düşük duyarlılık). Yazılımın kendi RSCS üçgen diyagramı modülüyle üretilen bu iki grafikte (Şekil 5a ve 5b), her iki karışım da iri dane-ince dane geçiş bölgesindeki aynı GF(F) mekanik grubuna düşmekte, ancak ince dane etiketi mineralojiye bağlı olarak farklılaşmaktadır. Böylece RSCS, USCS'nin ayırt edemediği (ve K Mix 4 örneğinde görüldüğü gibi kendi içinde de sınır-hassasiyeti taşıyan) mineralojik farkı, ince dane oranı yüksek karışımların nihai sembolünde görünür kılmaktadır.

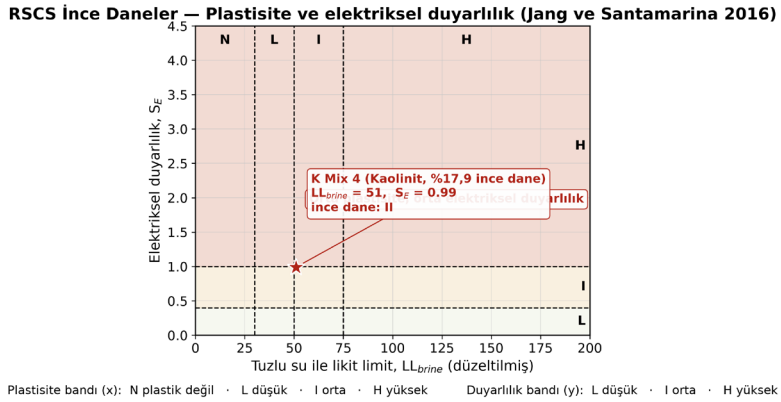


(a) (b)

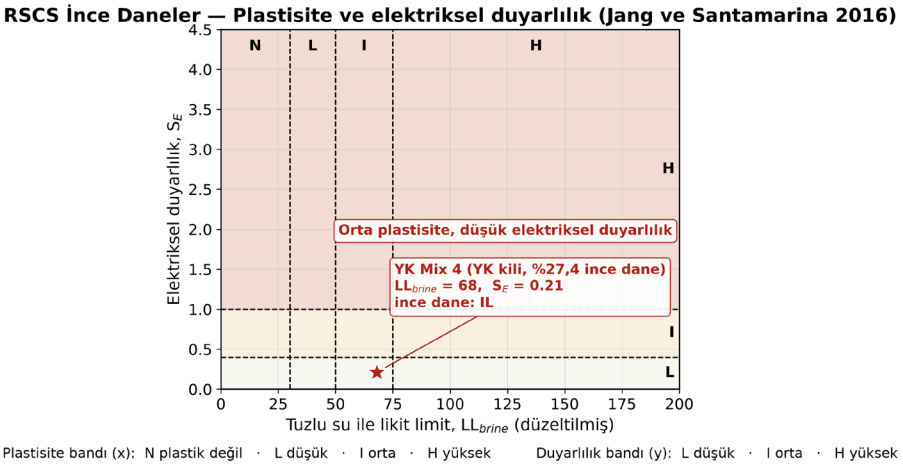
Şekil 5. (a) K Mix 4 (Kaolinit, %17,9 ince dane) karışımının, (b) YK Mix 4 (YK kili, %27,4 ince dane) karışımının SoilClass Pro RSCS üçgen diyagramındaki konumu

Bu ayrımın mühendislik açısından önemi, çalışmanın donma-çözülme deneyi sonuçlarında açıkça görülmektedir. Aynı ince dane oranında ortalama don kabarması hızı Kaolinit karışımında yaklaşık 20 mm/gün ("çok yüksek" don duyarlılığı sınıfına karşılık gelecek düzeyde) ölçülürken, YK kili karışımında bu değer yaklaşık 6,5 mm/gün'de ("düşük-orta" düzeyde) kalmıştır. Özkul Birgören ve Makttoof (2026) bu farkı, RSCS'nin LL_{Brine} ve S_E parametrelerinin ince danenin özgül yüzeyini ve difüz çift tabaka kalınlığını -dolayısıyla hidrolik iletkenliği- USCS'nin yakalayamadığı bir çözünürlükte yansıtmasına bağlamaktadır; yüksek plastisiteli YK kilinin düşük geçirimliliği, donma cephesine ulaşan su akışını sınırlandırarak beklenenin aksine daha düşük bir kabarma hızına yol açmaktadır. Bu örnek, yalnızca üç farklı sıvıyla yapılan düşen koni likit limit deneyi ile, XRD gibi özel bir mineralojik analize gerek kalmadan, USCS'nin ayırt edemediği ve pratikte don duyarlılığı açısından kritik önemde olan bir zemin farkının RSCS ile yakalanabildiğini göstermektedir.

Yazılımın RSCS ince dane duyarlılık grafiği, bu farkı S_E ve LL_{Brine} eksenlerinde görsel olarak da doğrulamaktadır (Şekil 6 ve Şekil 7): K Mix 4'ün Kaolinit bileşeni S_E = 0,99 ile "orta duyarlılık" bandına, YK Mix 4'ün ince danesi ise S_E = 0,21 ile "düşük duyarlılık" bandına düşmektedir.



Şekil 6. K Mix 4 (Kaolinit) ince dane bileşeninin SoilClass Pro RSCS duyarlılık grafiğindeki konumu (S_E = 0,99, orta plastisite / orta duyarlılık)



Şekil 7. YK Mix 4 (YK kili) ince dane bileşeninin SoilClass Pro RSCS duyarlılık grafiğindeki konumu (S_E = 0,21, orta plastisite / düşük duyarlılık)

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 2017 yılında Park ve Santamarina tarafından önerilen Revize Zemin Sınıflandırma Sistemi (RSCS) tanıtılmış, USCS, BS 5930, AASHTO ve TS EN ISO 14688 sistemleriyle karşılaştırılmış ve bu beş sistemi bir arada uygulayabilen SoilClass Pro adlı bir yazılım geliştirilerek sunulmuştur.

İri daneli zemin/ince daneli zemin sınıflandırması sınırlarının (kum/çakıl ve kum/ince dane) sistemden sisteme farklı tanımlanması, sınırda yer alan bir zeminin iri dane oran baskınlığının dahi sisteme göre değişmesine yol açabilmektedir; bu durum killi-çakıllı kum örneğinde (USCS: SC killi kum, BS 5930: GCL killi çakıl) somut olarak gösterilmiştir. Ayrıca, ağırlıkça %52'si "iri daneli" olan bu zeminin RSCS sistemine göre F(F) olarak isimlendirilmesi (bir diğer deyişle mekanik davranışı da hidrolik özellikleri de ince dane kısmının kontrol edecek olmasını işaret etmesi) dikkat çekicidir.

RSCS'nin zemine özgü, değişken sınırları, sabit yüzde eşiklerine kıyasla mekanik ve hidrolik davranışı (basit bir deyişle, yükü hangi danelerin taşıyacağını – kayma dayanımını hangi danelerin, su akışını hangi danelerin kontrol edeceğini) daha doğrudan yansıtmaktadır; ancak hesaplama karmaşıklığı, sistemin pratikte yaygınlaşmasını yazılım desteğine bağımlı kılmaktadır.

Geliştirilen yazılım; beş sınıflandırma sistemine göre aynı anda hesaplayabilmesi, her sınıflandırma adımını gerekçelendiren şeffaf bir akış sunması, esnek içe aktarma seçenekleri barındırması yönleriyle literatürdeki benzer araçlardan ayrışmakta; özellikle çok sayıda numunenin sınıflandırılması gereken projelerde zaman kazandırmaktadır.

İleriki çalışmalarda, yazılımın arayüz ve grafiksel seçeneklerinin artırılması, gerçek saha ve laboratuvar veri setleri üzerinde daha geniş ölçekte doğrulanması ve açık kaynak kullanıma sunulması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

AASHTO (2017), "Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes", M 145, American Association of State Highway and Transportation Officials.

EN ISO 14688-1:2018 ve EN ISO 14688-2:2018, "Geotechnical investigation and testing — Identification and classification of soil", CEN; TS EN ISO 14688-1 ve TS EN ISO 14688-2, "Jeoteknik araştırma ve deneyler - Zeminlerin tanımlanması ve sınıflandırılması", Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

ASTM (2017), "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", D2487-17, ASTM International.

ASTM (2017), "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", D4318-17, ASTM International.

British Standard BS 5930 (2015+A1:2020), "Code of Practice for Ground Investigations", British Standards Institution, London.

Casagrande, A. (1932), "Research on the Atterberg Limits of Soils", Public Roads, Vol 13, 121-136.

Castro, G.M., Park, J. ve Santamarina, J.C. (2023), "Revised Soil Classification System: Implementation and Engineering Implications", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 149, No 11, 04023109.

Jang, J. ve Santamarina, J.C. (2016), "Fines Classification Based on Sensitivity to Pore-Fluid Chemistry", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 142, No 4, 06015018.

Kovačević, M.S., Jurić-Kaćunić, D., Librić, L. ve Ivoš, G. (2018), "Engineering soil classification according to EN ISO 14688-2:2018", Građevinar.

Önalp, A. (2025), "Geoteknik Bilgisi 1: Zeminler ve Mekaniği Çözümlü Problemlerle", Birsen Yayınevi, İstanbul.

Özkul Birgören, Z.H. ve Makttoof, K. (2026), "Frost Heave Classification of Compacted Well-Graded Gravels: A New Perspective Based on the Revised Soil Classification System", Transportation Geotechnics, Vol 60, 101990.

Park, J. ve Santamarina, J.C. (2017), "Revised Soil Classification System for Coarse-Fine Mixtures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 143, No 8, 04017039.

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, 98-112.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
LL	Likit limit (%)	PI	Plastisite indisi (%)
PL	Plastik limit (%)	Cu	Derecelenme (üniformluk) katsayısı (D60/D10)
Cc	Eğrilik katsayısı	D10, D30, D60	Efektif dane çapları (mm)
e_{maks}, e_{min}	Maksimum / minimum paketlenme (sıkılık) boşluk oranı	GI	Grup İndeksi (AASHTO)
		L, M, H, V	TS EN ISO 14688 plastisite sınıfları (düşük, orta, yüksek, çok yüksek)
R	Dane yuvarlaklığı	λ	RSCS akış parametresi