

İnce taneli zeminler için önerilen bulanık sınıflama sürecinin bir uygulaması

An application of a fuzzy classification routine suggested for fine grained soils

Derya TOKSÖZ^{1*}, Işık YILMAZ²

^{1,2}Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
detoksoz@gmail.com, isik.yilmaz@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 19.12.2018
Kabul Tarihi/Accepted: 05.03.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 04.03.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.88278
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Mühendislik jeolojisinde tasarıma yönelik ön çalışmalarda zeminlerin sınıflandırılması önemli bir aşamadır. Bir zemine atanabilecek birkaç harf ya da sayı uygulayıcı mühendisler için hızlı olarak bir fikir sağlamaktadır. Ulusal ve uluslararası zemin sınıflama sistemlerinde ince taneli zeminlerin sınıflandırılması plastisite abağı ile yapılmaktadır. Ancak, likit limit ve plastik limit deneylerini etkileyen bazı faktörlere bağlı olarak zemin sınıfının plastisite abağı ile belirlenmesi sırasında belirsizlikler oluşmaktadır. Ayrıca, tanımlama noktalarının kimi zaman sınıfları ayıran çizgiler üzerine veya yakınına düşmesi durumunda belirsizlik seviyesi artmaktadır. Bu çalışmada söz konusu belirsizlikleri en aza indirmek için daha önce geliştirilen bir bulanık sınıflama sürecinin uygulaması yapılmıştır. Söz konusu bulanık sınıflama sürecinde plastisite abağındaki tanımlama noktalarının sınırları ayıran çizgilere olan dik mekansal mesafeleri dikkate alınmıştır. Sigmoid fonksiyonu kullanılarak tanımlama noktalarının bulanık plastisite ve bulanık zemin değerleri hesaplanmıştır. Son olarak bulanık işlemciler yardımı ile bulanık zemin sınıfları elde edilmiştir. Önerilen bulanık sınıflama süreci 100 adet laboratuvar verisi üzerinde uygulanmış ve elde edilen bulanık zemin sınıfları klasik zemin sınıfları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Zemin sınıflaması, Plastisite abağı, Belirsizlikler, Bulanık küme kuramı.

Abstract

Soil classification is an important stage in preliminary studies for design applications in engineering geology. A few letters or numbers assigned to a soil provide rapidly an idea to engineers. The classification of fine grained soils in national and international soil classification systems is determined using plasticity chart. However, because of the factors affecting liquid and plastic limit tests, uncertainties can arise in classification of fine-grained soils when this approach is used. Furthermore, uncertainty level has increased in case points fall sometimes on the lines or near the lines. In this study, an application of a fuzzy classification routine which was suggested before to minimize these uncertainties was performed. In the suggested method, the spatial distances of the evaluation points on the chart from the lines were considered. The membership degrees that define the fuzzified soil and plasticity were determined by using sigmoid function. Finally, fuzzy soil classes were obtained by using fuzzy operators. The suggested fuzzy classification routine, was performed on classification of 100 fine-grained soil samples and obtained fuzzy soil classes were compared with crisp soil classes.

Keywords: Soil classification, Plasticity chart, Uncertainties, Fuzzy set theory.

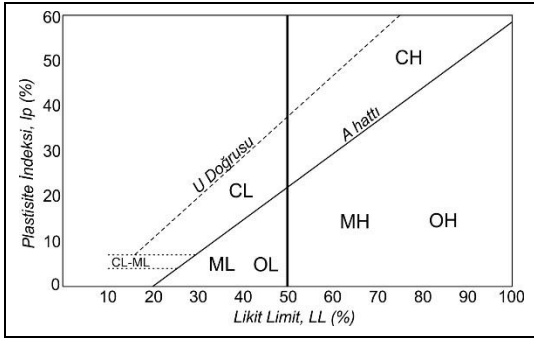
1 Giriş

Zemin, kayaların fiziksel ve kimyasal ayrışmasıyla oluşan parçacıkların çeşitli faktörlerle taşınıp biriktirilmesi ile oluşan taneli, boşluklu doğal bir malzemedir. Zeminler yapıların altında yük taşıyan temel malzemesi olabildikleri gibi toprak yapıların ve dolguların oluşturulmasında da kullanılmaktadırlar. Zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi tasarıma yönelik çalışmalarda oldukça önemli bir aşamadır. Mühendislik özelliklerini etkileyen başlıca faktörlerden biri zeminin türüdür. Farklı zemin türleri mühendislik girişimleri karşısında farklı davranış sergilemektedirler. Zemin türlerinin belirlenmesi zemin sınıflaması ile yapılmaktadır. Zeminlerin iri taneli (kum, çakıl), ince taneli (kil, silt), kohezyonlu ve kohezyonsuz gibi terimlerle tanımlanarak sınıflandırılması çok genel bir yaklaşımdır. Oysa bir mühendisin diğerini kolayca anlayabileceği, daha sistematik ve ayrıntılı olacak şekilde sınıflandırmalara gereksinim duyulur. Bu nedenle çoğu ülkelerde benzer sınıflama sistemleri

kullanılmaktadır. Bu sınıflama sistemlerinden önemlileri Amerikan Karayolları Zemin Sınıflaması (AASTHO M 145) [1], İngiliz Zemin Sınıflama Sistemi (BS 5930) [2], Alman Zemin Sınıflama Sistemi (DIN 18196) [3] ve ASTM D 2487 [4] standardında yer alan Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi (USCS) olarak sayılabilir. Bu sınıflama sistemlerinden günümüzde en çok kullanılanı Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi olup dünyanın çeşitli ülkelerinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu sınıflamada her zemin bir grup simgesi ile belirtilir. Grup simgeleri iki harften meydana gelir. Birinci harf zeminde en çok bulunan tane cinsini ikinci harf ise zeminin plastikliğini, sıkışabilirliğini veya derecelenme durumunu belirtir [5]. Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi (USCS)ne göre ince taneli zeminler tane boyu 0.075 mm'den daha küçük olan, iri taneli zeminler ise tane boyu 0,075 mm' den daha büyük olan zeminlerdir. Benzer şekilde, AASTHO standardında ince taneli malzeme sınırı 0.075 mm iken BS standardında 0.060 mm, DIN standardında ise 0.071 mm'dir [6].

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Tane boyu dağılım eğrileri birbirine çok benzeyen ancak oldukça farklı mühendislik davranışları sergileyen başlıca iki tür ince taneli zemin olabilir. Bu farklılık zemin içerisindeki kil minerallerinin özelliklerinin ve su içeriğinin değişik oluşundan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle ince taneli zeminlerin sınıflandırılabilmesi için bir alt sınıflamaya gereksinim duyulur. Bu alt sınıflama zeminlerin kıvam limitleri veya bir diğer adıyla Atterberg limitleri göz önüne alınarak yapılmaktadır. İnce taneli zeminlerde zeminin kıvam değişimini veren sınır su içeriği değerlerine kıvam limitleri adı verilmektedir. Zeminin kendi ağırlığı altında akabildiği su içeriği likit limit, plastik bir malzmeden yarı plastik hale dönüştüğü andaki su içeriği ise plastik limit olarak bilinmektedir. Zeminin plastik davranış gösterdiği su içeriği aralığı ise plastisite indeksi olarak tanımlanmakta olup likit limit değerinden plastik limit değerinin çıkarılması ile elde edilir [7]. İnce taneli zeminlerin sınıflandırılması kıvam limitleri esas alınarak oluşturulan plastisite abağı ile yapılmaktadır. Plastisite abağında düşey eksen plastisite indeksi, yatay eksen ise likit limit ile temsil edilmektedir (Şekil 1). Killer için ilk büyük harfi 'C', siltler için 'M', organik zeminler için ise 'O' oluşturmaktadır. İkinci büyük harf ise plastisite özelliğinden gelmektedir. Plastisite indeksi %50'den düşük ise L, %50'den büyük ise H harfi kullanılmaktadır.



Şekil 1. Plastisite abağı [8].

Figure 1. The plasticity chart.

Abak 'A hattı' ve LL= %50 yi ifade eden düşey bir doğru ile 4 kısma ayrılır. A hattının üstü killeri, altı siltleri ve düşey doğrunun solu düşük, sağı ise yüksek plastisiteyi belirtir. Plastisite abağındaki A hattı önemli bir çıkarımsal sınırı temsil eder. Bu hat likit limiti 20, plastisite indeksi 0 ve likit limiti 50, plastisite indeksi 22 olan noktalar boyunca uzanır. Bu nedenle A hattının eşitliği Casagrande [9] tarafından aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$I_p = 0.73 * (LL - 20) \quad (1)$$

A hattı genellikle hattın üstünde olan tipik inorganik killeri (CL-CH grupları) ve hattın altında olan organik koloidler içeren plastik zeminler (OL-OH grupları) arasındaki çıkarımsal sınırı temsil eder [9]. Ayrıca inorganik siltler (ML ve MH grupları) A hattının altına yerleşmiştir, fakat likit limiti %30'dan az olan inorganik siltler A hattının üstüne çıkabilmektedir [9]. LL= %50'yi ifade eden düşey doğru ise düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli zeminler arasındaki sınırı temsil etmektedir. Likit limiti %50 den büyük olan zeminler yüksek plastisiteli, likit limiti %50'den küçük olan zeminler ise düşük plastisiteli zeminlerdir. Plastisite abağında ayrıca U doğrusu olarak bilinen bir hat daha vardır. Bu hat doğal zeminler için üst sınırı temsil etmektedir. Diğer bir ifadeyle doğal durumdaki bir zemin bu hat üzerinde bulunamaz. U doğrusu likit limiti 8, plastisite

indeksi 0 ve likit limiti 16, plastisite indeksi 7 olan noktalar boyunca uzanmakta olup eşitliği aşağıdaki gibidir [8]:

$$I_p = 0.90 * (LL - 8) \quad (2)$$

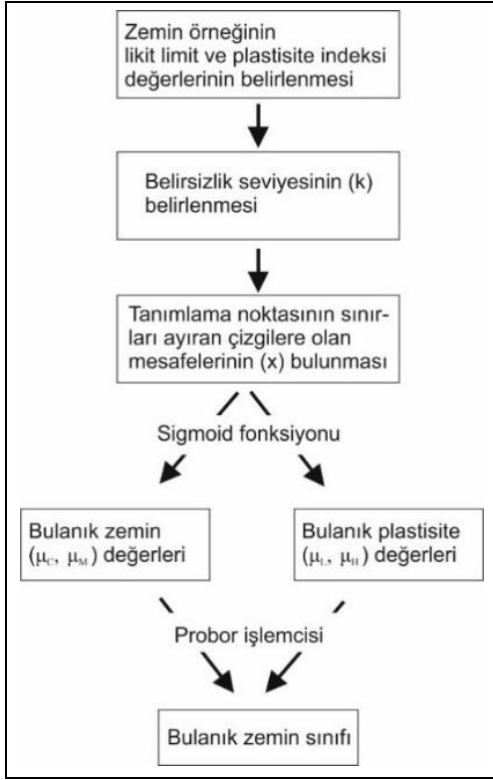
Zeminlerin likit limit ve plastik limit değerlerini belirlemek için farklı yöntemler mevcuttur. Likit limit değeri yaygın olarak Casagrande deney yöntemi ile belirlenirken, plastik limit deneyi plastik limit değerini belirlemek için kullanılan yöntemdir [10]. Zeminlerin likit limit değeri ayrıca düşey koni yöntemi ile de belirlenebilmektedir [11]. Bu deneylerin uygulanması sırasında deney sonuçlarını etkileyen çeşitli faktörler söz konusudur [12]-[14]. Örneğin; deney yapan kişinin deneyimi, Casagrande kabının hatalı düşüş frekansı, kaba konulan zeminde doğru bir şekilde açılmayan oluk Casagrande likit limit testini etkileyen faktörler arasındadır. Plastik limit deneyini etkileyen faktörler ise uygulama basıncı, yuvarlama hızı ya da kirlilik olarak sıralanabilir. Bu gibi faktörler ince taneli zeminlerin likit limit ve plastik limit değerlerinin tanımlanmasında belirsizlikler ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla likit limit ve plastisite indeksi kullanılarak plastisite abağında elde edilen zemin türlerinde de belirsizlikler oluşmaktadır. Plastisite abağında noktalar kimi zaman sınıfları ayıran çizgiler (A hattı, LL=%50'yi ifade eden düşey doğru) üzerine veya yakınına düşmektedir. Bu gibi durumlarda genel çözüm çift sembol kullanmaktır. Ancak bu durum belirsizlik seviyesini daha da arttırmaktadır. İnce taneli zeminlerin plastisite abağı ile sınıflandırılması sırasında oluşan söz konusu belirsizliklerin en aza indirgenmesi amacıyla Toksoz ve diğ. [15] tarafından bulanık küme kuramının kullanım potansiyeli araştırılmış ve bulanık bir sınıflama süreci geliştirilmiştir. Bu çalışmada ise bir kısmı laboratuvar çalışmalarından bir kısmı ise VSB-Ostrava Teknik Üniversitesi (Çek Cumhuriyeti)'nden sağlanan toplam 100 adet veri üzerinde Toksoz ve diğ. [15] tarafından önerilen bulanık sınıflama sürecinin bir uygulaması yapılmıştır. Uygulama sonucu elde edilen bulanık zemin sınıfları klasik zemin sınıfları ile karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

Toksoz ve diğ. [15] tarafından ince taneli zeminlerin sınıflandırılması sırasında ortaya çıkan belirsizlikleri en aza indirmek amacıyla oluşturulan bulanık yaklaşımda plastisite abağındaki tanımlama noktalarının sınırları ayıran çizgilere (A hattı ve LL=%50'yi ifade eden düşey doğru) olan dik mekansal mesafelerinden yararlanılmıştır. Mesafeleri belirlemek için, plastisite abağı ilk olarak grid hücrelerine ayrılmış, sayısallaştırılmış ve abak üzerindeki belirli bir likit limit ve plastisite indeksi değerine sahip her bir noktanın sayısal olarak konumu belirlenmiştir. Mesafeler elde edildikten sonra belirli bir belirsizlik seviyesi dikkate alınarak plastisite abağındaki her bir tanımlama noktasının kil, silt, düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli olma üyelik dereceleri sigmoid fonksiyonu kullanılarak belirlenmiştir. Son olarak bulanık işlemciler yardımıyla bulanık zemin sınıfları elde edilmiştir. Bu çalışmada önceki çalışmadan farklı olarak tanımlama noktalarının sınırları ayıran çizgilere olan mesafelerini bulmak için matematiksel formüllerden yararlanılmıştır. Böylelikle bütün kullanıcılar söz konusu mesafeleri kolaylıkla bulabileceklerdir. Toksoz ve diğ. [15] tarafından ince taneli zeminler için önerilen bulanık sınıflama sürecinin işlem adımları Şekil 2'de gösterilmiştir.

2.1 Bulanıklaştırma süreci

İlk kez Zadeh [16] tarafından önerilen bulanık küme kuramı, karmaşık ve tanımlanmasında güçlüklerin yaşandığı sistemlerin modellenmesinde esnek ve tutarlı bir şekilde uygulanabilmektedir [17]. Bulanık küme kuramı mühendislik jeolojisi uygulamalarında birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [18]-[23]. Ayrıca, değişik zemin sınıflama sistemlerindeki belirsizliklerin azaltılması amacıyla kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.



Şekil 2. Plastisite abağı için bulanık işlem süreci.

Figure 2. Fuzzification process for the plasticity chart.

Zhang ve Tumay [24], CPT (Konik Penetrasyon Testi) verilerini baz alan bir zemin sınıflandırma yöntemindeki belirsizlikleri azaltmaya yönelik olarak bulanık küme kuramından yararlanmışlardır. Odhiambo ve diğ. [25], GPR (Ground Penetrating Radar) görüntülerini kullanan bir zemin sınıflama yöntemi için bulanık sınır ağları yardımıyla yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Göktepe ve diğ. [26] ince taneli zeminler için kayma dayanımı ve plastisite indeksi değerleri esas alınarak yapılan bir sınıflama metodunda bulanık c ortalaması algoritmasını kullanmışlardır. Araştırmacılar bir dizi veri üzerinde geliştirdikleri sınıflama algoritmasını uygulamışlar ve bulanık c ortalamaları algoritmasının klasik k ortalamaları sınıflayıcısına göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Kıyak ve diğ. [27] yaptıkları çalışmada, Mamdani bulanık mantık yöntemini kullanarak Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından zemin sınıflandırması için oluşturulan tablodaki işlemleri esnek olarak yapabilecek bir model geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, kayma dalgası hızı ve kayma modülü değerlerini girdi zemin türünü ise çıktı olarak almışlardır. Yıldırım ve diğ. [28] AASHTO (Amerikan Karayolları Zemin Sınıflaması) sisteminde kullanılan kriterleri baz alarak zeminlerin tanımını yine Mamdani bulanık mantık yöntemiyle elde etmişlerdir. Oluşturulan bulanık mantık modelinde 10, 40 ve 200 No.lu elekten geçen tanelerin yüzdesi, 40 No.lu elekten

geçen kısmın likit limiti, plastisite indeksi ile grup indeksi değerleri bulanıklaştırılarak zemin tanımları elde edilmiştir. Bhargavi ve Jyothi [29] zemin sınıflama problemlerini en aza indirmek amacıyla bulanık sınıflama kuralları üretmişlerdir. Araştırmacılar 7 adet girdi verisi (derinlik, kil, kum, siltli kum, killi kum, siltli-killi kum) kullanarak üçgen üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanık zemin sınıfları elde etmişlerdir. Han ve diğ. [30] zeminlerin sınıflandırılmasında bulanık hücreleme analizini uygulamışlardır. Yazarlar elde ettikleri bütün verileri standardize ettikten sonra bulanık bir benzerlik matrisi geliştirmişler ve bulanık ilişkiler üretmişlerdir. Riberio ve diğ. [31], bulanık bir karar ağacı algoritmasını kullanarak bir zemin sınıflama süreci geliştirmişlerdir. Sandhu ve Dubey [32] hidrolojik zemin sınıflama sistemlerindeki belirsizlikleri en aza indirmek için bulanık mantıktan yararlanmışlardır. Miloud ve diğ. [33] ise zeminlerin tarımsal amaçlı sınıflandırılmasında kullanılan WRB (The World Reference Base) zemin sınıflama sistemindeki belirsizlikleri azaltmaya yönelik olarak Mamdani bulanık mantık yönteminden yararlanmışlardır. Son olarak, Toksoz ve diğ. [15] ince taneli zeminlerin plastisite abağı ile sınıflandırılması sırasındaki belirsizlikleri en aza indirmek amacıyla bulanık küme kuramının kullanılabilirliğini araştırmıştır. Toksoz ve diğ. [15] tarafından önerilen yaklaşımın diğer çalışmalardan farkı en yaygın olarak kullanılan zemin sınıflama sistemini (USCS) baz alması ve bütün uygulayıcılar tarafından kolaylıkla uygulanabilir matematiksel formüllere dayanmasıdır.

Bulanık küme kuramında, bir küme içerisindeki elemanların o kümeye ait olma derecelerine üyelik derecesi denir. Üyelik dereceleri üçgen, yamuk, sigmoid, gauss gibi üyelik fonksiyonları kullanılarak belirlenir. Klasik küme kuramında, bir kümeye giren elemanların o kümeye ait olmaları durumunda üyelik dereceleri 1'e, ait olmamaları durumunda 0'a eşit kabul edilmiştir. Bu ikisinin arasında hiçbir üyelik derecesi söz konusu değildir. Bulanık küme kuramında ise 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerinden söz edilebilir. Plastisite abağı daha yakından incelenirse abağın klasik küme kuramını yansıttığını açık bir şekilde görebilmek mümkündür. Plastisite abağının kendisi bütün olarak evrensel bir küme, CL, CH, ML ve MH zemin türlerini ifade eden bölgeler ise alt kümeler olarak düşünülürse bu alt kümelerin birbirinden kesin sınırlarla ayrıldığı görülmektedir. Söz konusu sınırları ise A hattı ve likit limiti %50'yi ifade eden düşey doğru temsil etmektedir. Burada komşuluklarında örtüşmeler olmadan üyelik dereceleri 1 veya 0 olacak biçimde 4 tane alt küme vardır. Eğer CL kümesi göz önünde tutulacak olursa buradaki elemanların CL kümesine olan üyelik dereceleri 1'e, CH, ML ve MH kümesine olan üyelik dereceleri ise 0'a eşit alınır. Dolayısıyla, klasik küme kuramına göre plastisite abağındaki kümelerin elemanlarının üyelik dereceleri 1 ya da 0'dır. Oysa bulanık mantık ortamına girince her kümenin değişik elemanları 0 ile 1 arasında değişen üyelik dereceleri alacaktır.

Plastisite abağını bulanıklaştırmak için tanımlama noktalarının A hattına ve LL = %50'yi ifade eden düşey doğruya olan en yakın (dik) mekansal mesafeleri dikkate alınmıştır. Her biri belirli bir likit limit ve plastisite indeksi değerine sahip olan bu noktaların A hattına olan mesafelerini bulmak için analitik düzlemde bir noktanın bir doğruya olan dik uzaklığını tanımlayan formülden yararlanılmıştır. Buna göre plastisite abağı üzerindeki bir tanımlama noktasının A hattına olan dik mesafesi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir.

$$x = \frac{|0.73LL - Ip - 14.6|}{1.24} \quad (3)$$

Plastisite abağı üzerindeki bir tanımlama noktasının LL = %50' yi ifade eden düşey doğruya olan dik mesafesi ise aşağıdaki formül yardımıyla belirlenir.

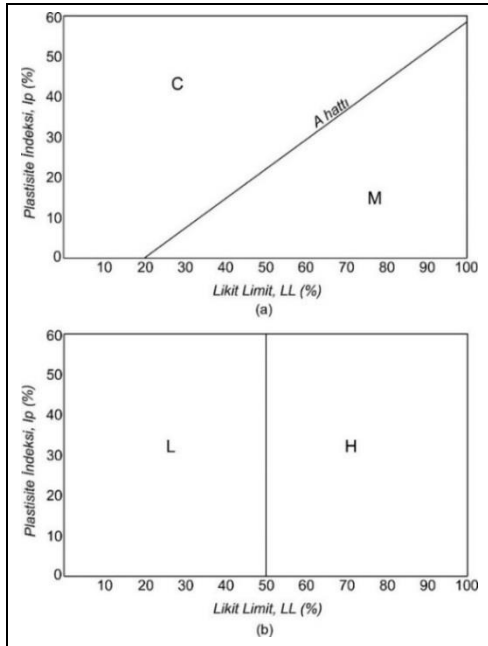
$$x = |50 - LL| \quad (4)$$

A hattı ile C ve M olmak üzere iki küme tanımlanmıştır (Şekil 3a). Her iki kümede de A hattından değişik mesafelerde tanımlama noktaları vardır. Bu tanımlama noktaları C ve M kümelerinin öğelerini oluşturmaktadır. Burada C ve M kümelerinde kendi aralarında A hattına olan dik mesafelerine göre her bir elemana verilen ağırlıklarla üyelik dereceleri atanabilir. Şen [34]'in bulanıklaştırma yaklaşımları ile ilgili yaptığı tanımlamalardan yola çıkarak, bir noktanın C ve M kümelerine ait olma dereceleri μ_C ve μ_M ise bunların toplamının 1'e eşit olması gerekir. Plastisite abağı için Toksoz ve diğ. [15] tarafından önerilen yaklaşım Eşitlik 5'te sunulmuştur.

$$\mu_C + \mu_M = 1 \quad (5)$$

LL=%50 olan düşey doğru ile L ve H olmak üzere iki küme tanımlanmıştır (Şekil 3b). Benzer şekilde bir noktanın L ve H kümelerine ait olma derecesi μ_L ve μ_H ise bunların toplamının 1'e eşit olması gerekir [15].

$$\mu_L + \mu_H = 1 \quad (6)$$



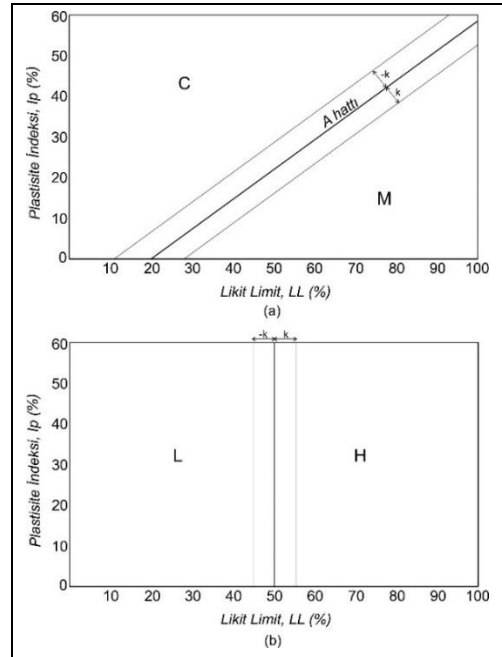
Şekil 3. Plastisite abağında, (a): C ve M, (b): L ve H alt kümeleri [15].

Figure 3. The subsets (a): C and M, (b): L and H on the plasticity chart.

Dikkat edilmesi gereken önemli bir husus üyelik derecelerinin doğru olarak atanmasıdır. Belirsizliğin sınırları ayıran çizgilere yakın mesafelerde daha fazla olduğu muhakkaktır. Ancak bu belirsizliğin hatlardan sadece belirli bir mesafeye kadar devam ettiğini ve aslında bu mesafeden sonra belirsizliğin sona erdiğini bilmek gerekir. A hattı temel alınır, kesin olan bir şey var ki o da A hattından belirli bir mesafeden uzak olan tanımlama noktaları kesinlikle içinde buldukları kümeye aittirler (C veya M) ve bu kümeye göre üyelik dereceleri 1'dir.

Buna karşın A hattından itibaren hattın iki tarafından da belirli bir mekansal mesafe içerisinde A hattına yaklaştıkça belirsizlik artacaktır. Dolayısıyla noktaların üyelik dereceleri bu mesafe içerisinde 0 ile 1 arasında değişecektir. Bu mesafenin sınır değerinde ise belirsizlik sona erecektir.

Aynı şeyler LL=%50'yi ifade eden doğru için de geçerli olacaktır. Bu doğrudan belirli bir mesafeden uzak olan noktaların hiç şüphe getirmeden abak üzerinde okunan plastisite özelliğine (yüksek plastisiteli veya düşük plastisiteli) sahip olması gerektiği söylenmelidir, yani içinde buldukları kümeye göre üyelik dereceleri 1 olmaktadır. Buna karşın, doğrunun her iki tarafından da belirli bir mekansal mesafe içerisinde tanımlama noktalarının üyelik dereceleri 0 ile 1 arasında değişim göstermelidir. Bu belirsizlik sınırını belirlemek için zeminin su içeriğini belirleme esnasında oluşabilecek belirsizlikler göz önünde tutulmuştur. Daha önce de belirtildiği üzere ince taneli zeminlerin sınıflandırılması sırasında oluşan belirsizliğin ana sebebi likit limit ve plastik limit deneylerini etkileyen faktörlerdir. Likit limit ve plastik limit değerleri esnasında su içeriği değerleridir, dolayısıyla zeminin su içeriğinde oluşan belirsizlik plastisite abağında gözlenen belirsizliğin ana kaynağı olarak düşünülebilir [15]. Plastisite abağında su içeriğinden dolayı oluşan belirsizliğin yüzdesi elbette ki tam olarak bilinemez ancak deneyimli bir mühendis belirsizliğin seviyesine belirli bir mantık çerçevesinde karar verebilir. Toksoz ve diğ. [15] tarafından yapılan çalışmada belirsizlik seviyesi 'k' ile ifade edilen bir değişken ile temsil edilmiştir. Önerilen metoda göre deneyimli bir mühendis öngördüğü belirsizlik seviyesine göre 'k' değerinin büyüklüğüne karar verebilir.



Şekil 4. Plastisite abağında, (a): C ve M, (b): L ve H kümeleri için k ile temsil edilen belirsizlik sınırı [15].

Figure 4. The level of uncertainty represented by k on the plasticity chart for the sets (a): C and M, (b): L and H.

Şekil 4'te plastisite abağında oluşan belirsizlik sınırları gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi belirsizliğin sınırı 'k' ile belirlenmiştir. Abak üzerindeki herhangi bir tanımlama noktasının hatlardan olan dik mesafesi 'k' değerinden büyük ise bu nokta kesinlikle içinde bulunduğu kümeye aittir. Diğer bir

deyişle üyelik derecesi 1'dir. Buna karşın bir tanımlama noktasının hatlara olan dik mesafesi 'k' değerinden küçükse bu noktanın üyelik derecesi 1 ile 0 arasında değişecektir. 'k'nın önündeki eksi işareti hatlardan olan hareketin yönünü göstermektedir. Artı işareti hatlardan itibaren sağa doğru hareketi, eksi işareti (-) ise sola doğru hareketi temsil etmektedir.

Çalışma kapsamında tanımlama noktalarının C ve M kümelerine olan üyelik dereceleri bulanıklaştırılmış zemin, L ve H kümelerine olan üyelik dereceleri ise bulanıklaştırılmış plastisite olarak terimlendirilmiştir. Bulanıklaştırılmış zemin ve bulanıklaştırılmış plastisite değerlerini bulabilmek için sigmoid üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Sigmoid fonksiyonu $-\infty$ ve $+\infty$ arasında her hangi bir değere sahip olan girdi verisini 0 ve 1 arasındaki bir değere dönüştüren 'S' şeklinde bir fonksiyondur [35]. Belirsizliğin hatlara yaklaştıkça arttığı ve uzaklaştıkça azaldığı göz önüne alındığında en uygun üyelik fonksiyonunun doğrusal olmayan sigmoid fonksiyonu olduğu sonucuna varılmaktadır. Sigmoid fonksiyonları $[-k, k]$ aralığında tanımlanmış olup abaktaki tanımlama noktalarının sınırları ayıran çizgilere olan dik mekansal mesafeleri bağımsız değişken olarak alınmıştır. Buna göre M ve H, C ve L bulanık kümelerinin matematiksel tanımı aşağıda gösterildiği gibidir [15]:

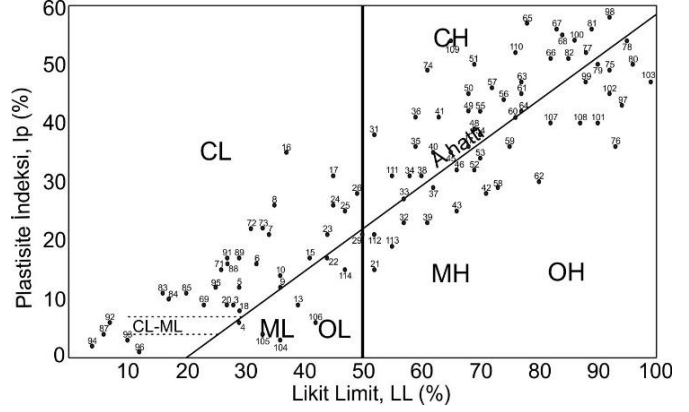
$$\mu_{M,H}(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x \geq k \\ \frac{1}{1 + e^{-x}} & , \quad x < k \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{C,L}(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x \geq k \\ \frac{1}{1 + e^x} & , \quad x < k \end{cases} \quad (8)$$

Burada, x tanımlama noktalarının sınırları ayıran çizgilere olan dik mekansal mesafesi, k ise belirsizlik seviyesidir. Toksoz ve diğ. [15] tarafından önerilen bulanık işlem süreci laboratuvar çalışmalarından elde edilen 100 adet veri üzerinde uygulanmıştır. Verilerin plastisite abağı üzerindeki dağılımı Şekil 5'te sunulmuştur. Verilerin bir kısmının sınırları ayıran çizgilerin (A hattı ve LL=%50'yi ifade eden düşey doğru) çok yakınında, hatta bir kısmının çizgilerin üstünde olduğu görülmektedir. Noktaların sınırları ayıran çizgilere olan dik mekansal mesafeleri Tablo 1'de verilmiştir. Toksoz ve diğ. [15] tarafından yapılan çalışmada belirsizlik seviyesi $\pm 5\%$ olarak alınmıştır (k=5). Dolayısıyla bu çalışmada da 'k' değeri 5 olarak düşünülmüştür. Verilerin abak üzerindeki dağılımı ve Tablo 1 yakından incelendiğinde deney sonuçlarının %49'unun A hattı için belirlenen belirsizlik sınırları içinde ($x < k$), %9'unun ise LL=%50'yi ifade eden doğruya ait belirsizlik sınırları içinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca verilerin A hattına ve LL=%50'yi ifade eden doğruya olan ortalama uzaklıkları sırasıyla 5.81 ve 22.09'dur.

Çalışmada kullanılan zemin örneklerinin C ve M, L ve H kümelerine olan üyelik dereceleri hesaplanmıştır (Tablo 1). Örneğin, 33 No.lu zeminin A hattına olan dik mekansal mesafesi Eşitlik 3 kullanılarak 0.01, LL=%50'yi ifade eden doğruya olan dik mekansal mesafesi ise Eşitlik 4 kullanılarak 7 olarak bulunmuştur. Söz konusu tanımlama noktasının kümelere olan

üyelik dereceleri Eşitlik 7 ve 8 kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre bu tanımlama noktasının C kümesine olan üyelik derecesi (μ_C) 0.50, M kümesine olan üyelik derecesi (μ_M) 0.50, L kümesine olan üyelik derecesi (μ_L) 0, H kümesine olan üyelik derecesi (μ_H) ise 1 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Zemin örneklerinin plastisite abağı üzerinde dağılımı.

Figure 5. The distribution of the soil samples on the plasticity chart.

2.2 Sınıflandırma ve isimlendirme süreci

Bulanıklaştırılmış zemin ve bulanıklaştırılmış plastisite değerleri dikkate alınarak bulanık zemin sınıfları elde edilmiştir. Bu amaçla bulanık işlemciler kullanılmıştır. Bulanık işlemciler bir sayı kümesini tek bir temsilciye veya anlamlı bir sayıya indirgeyen fonksiyonlardır [36]. Bulanık işlemciler yardımıyla bulanık zemin değerlerinden (μ_C, μ_M) biri ve bulanık plastisite (μ_L, μ_H) değerlerinden de biri seçilerek tanımlama noktaları için iki harfle simgelenmiş bulanık zemin sınıfları elde edilmiştir. Başlıca bulanık işlemciler ise 'min', 'max', 'prod' ve 'probor' işlemcileridir. Toksoz ve diğ. [15] ince taneli zeminlerin isimlendirilmesinde en iyi sonuç veren bulanık işlemcinin 'probor' işlemcisi olduğunu belirtmişlerdir. Dolayısıyla yapılan bu çalışmada da laboratuvar verilerinin zemin sınıfları 'probor' işlemcisi kullanılarak elde edilmiştir. 'probor' işlemcisi 'max' işlemcisinin kuvvetlendiricisi olup matematiksel ifadesi C ve M kümeleri için aşağıdaki gibidir [15]:

$$probor [\mu_C(x), \mu_M(x)] = \mu_C(x) + \mu_M(x) - \mu_C(x) \times \mu_M(x) \quad (9)$$

Söz konusu işlemcinin L ve H kümeleri için matematiksel tanımı ise aşağıdaki gibidir:

$$probor [\mu_L(x), \mu_H(x)] = \mu_L(x) + \mu_H(x) - \mu_L(x) \times \mu_H(x) \quad (10)$$

Yine 33 No.lu örnek ele alınacak olursa bu noktanın bulanıklaştırılmış zemin için üyelik dereceleri $\mu_C = 0.50$ ve $\mu_M = 0.50$ ' dir. Bu noktanın zemin sınıfı 'probor' işlemcisi ile $M_{(0.75)}$ olarak bulunur. Benzer şekilde, noktanın bulanıklaştırılmış plastisite için üyelik dereceleri $\mu_L = 0$, $\mu_H = 1$ 'dir. Buna göre 'probor' işlemcisi ile elde edilen plastisite sınıfı $H_{(1)}$ dir. Sonuç olarak 33 No.lu örneğin bulanık zemin sınıfı $MH_{(0.75, 1)}$ olarak ifade edilir. Diğer zemin örnekleri için elde edilen bulanık zemin sınıfları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Zemin örneklerinin bulanık sınıflama süreci sonunda bulunan bulanık zemin ve plastisite değerleri ile bulanık zemin sınıfları.

Table 1. Fuzzified plasticity and soil values of the soil samples and the fuzzy soil classes obtained by fuzzy classification process.

| Örnek No | LL (%) | Ip (%) | Klasik Zemin Sınıfı | A hattına olan mesafe | LL=%50 doğrusuna olan mesafe | Bulanık Zemin | | Bulanık Plastisite | | 'prabor' işlemcisi ile elde edilen zemin sınıfı |
|----------|--------|--------|---------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|---------|--------------------|---------|---|
| | | | | | | μ_c | μ_M | μ_L | μ_H | |
| 3 | 28 | 9 | CL | (-) 2.55 | (-) 22 | 0.93 | 0.07 | 1 | 0 | CL _(0.94, 1) |
| 4 | 29 | 6 | ML | 0.46 | (-) 21 | 0.39 | 0.61 | 1 | 0 | ML _(0.76, 1) |
| 5 | 29 | 12 | CL | (-) 4.38 | (-) 21 | 0.99 | 0.01 | 1 | 0 | CL _(0.99, 1) |
| 6 | 32 | 16 | CL | (-) 5.84 | (-) 18 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |
| 7 | 34 | 21 | CL | (-) 8.69 | (-) 16 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |
| 8 | 35 | 26 | CL | (-) 12.14 | (-) 15 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |
| 9 | 36 | 12 | CL | (-)0.26 | (-)14 | 0.56 | 0.44 | 1 | 0 | CL _(0.75, 1) |
| 10 | 36 | 14 | CL | (-)1.87 | (-)14 | 0.87 | 0.13 | 1 | 0 | CL _(0.88, 1) |
| 13 | 39 | 9 | ML | 3.93 | (-) 11 | 0.02 | 0.98 | 1 | 0 | ML _(0.98, 1) |
| 15 | 41 | 17 | CL | (-)1.35 | (-)9 | 0.79 | 0.21 | 1 | 0 | CL _(0.84, 1) |
| 17 | 45 | 31 | CL | (-) 10.28 | (-) 5 | 1 | 0 | 0.99 | 0.01 | CL _(1, 0.99) |
| 18 | 29 | 8 | CL | (-) 1.15 | (-) 21 | 0.76 | 0.24 | 1 | 0 | CL _(0.82, 1) |
| 20 | 27 | 9 | CL | 3.14 | (-) 23 | 0.96 | 0.04 | 1 | 0 | CL _(0.96, 1) |
| 21 | 52 | 15 | MH | 6.74 | 2 | 0.00 | 1 | 0.12 | 0.88 | MH _(1, 0.90) |
| 22 | 44 | 17 | ML | 0.42 | (-) 6 | 0.40 | 0.60 | 1 | 0 | ML _(0.76, 1) |
| 23 | 44 | 21 | CL | (-) 2.81 | (-) 6 | 0.94 | 0.06 | 1 | 0 | CL _(0.95, 1) |
| 24 | 45 | 26 | CL | (-) 6.25 | (-) 5 | 1 | 0 | 0.99 | 0.01 | CL _(1, 0.99) |
| 25 | 47 | 25 | CL | (-) 4.27 | (-) 3 | 0.99 | 0.01 | 0.95 | 0.05 | CL _(0.99, 0.95) |
| 26 | 49 | 28 | CL | (-) 5.51 | (-) 1 | 1 | 0 | 0.73 | 0.27 | CL _(1, 0.80) |
| 29 | 50 | 21 | ML-MH | 0.73 | 0 | 0.33 | 0.67 | 0.50 | 0.50 | MH _(0.78, 0.75) |
| 31 | 52 | 38 | CH | (-) 11.81 | 2 | 1 | 0 | 0.12 | 0.88 | CH _(1, 0.90) |
| 32 | 57 | 23 | MH | 3.23 | 7 | 0.04 | 0.96 | 0 | 1 | MH _(0.96, 1) |
| 33 | 57 | 27 | CH-MH | 0.01 | 7 | 0.50 | 0.50 | 0 | 1 | MH _(0.75, 1) |
| 34 | 58 | 31 | CH | (-) 2.63 | 8 | 0.93 | 0.07 | 0 | 1 | CH _(0.94, 1) |
| 35 | 59 | 36 | CH | (-) 6.07 | 9 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 36 | 59 | 41 | CH | (-) 10.10 | 9 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 37 | 62 | 29 | MH | 1.34 | 12 | 0.21 | 0.79 | 0 | 1 | MH _(0.84, 1) |
| 38 | 60 | 31 | CH | (-) 1.45 | 10 | 0.81 | 0.19 | 0 | 1 | CH _(0.85, 1) |
| 39 | 61 | 23 | MH | 5.59 | 11 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1, 1) |
| 40 | 62 | 35 | CH | (-) 3.50 | 12 | 0.97 | 0.03 | 0 | 1 | CH _(0.97, 1) |
| 41 | 63 | 41 | CH | (-) 7.75 | 13 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 42 | 71 | 28 | MH | 7.44 | 21 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1, 1) |
| 43 | 66 | 25 | MH | 6.92 | 16 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1, 1) |
| 45 | 65 | 35 | CH | (-) 1.73 | 15 | 0.85 | 0.15 | 0 | 1 | CH _(0.87, 1) |
| 46 | 66 | 32 | MH | 1.27 | 16 | 0.22 | 0.78 | 0 | 1 | MH _(0.83, 1) |
| 47 | 68 | 36 | CH | (-) 0.77 | 18 | 0.68 | 0.32 | 0 | 1 | CH _(0.78, 1) |

Tablo 1. devamı.

Table 1. Continued.

| Örnek No | LL (%) | Ip (%) | Klasik Zemin Sınıfı | A hattına olan mesafe | LL=%50 doğrusuna olan mesafe | Bulanık Zemin | | Bulanık Plastisite | | 'prabor' işlemcisi ile elde edilen zemin sınıfı |
|----------|--------|--------|---------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|------|--------------------|----|---|
| | | | | | | μc | μm | μL | μH | |
| 48 | 69 | 39 | CH | (-) 2.60 | 19 | 0.93 | 0.07 | 0 | 1 | CH _(0.94, 1) |
| 49 | 68 | 42 | CH | (-) 5.61 | 18 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 50 | 68 | 45 | CH | (-) 8.03 | 18 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 51 | 69 | 50 | CH | (-) 11.48 | 19 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 52 | 69 | 32 | MH | 3.04 | 19 | 0.05 | 0.95 | 0 | 1 | MH _(0.96, 1) |
| 53 | 70 | 34 | MH | 2.02 | 20 | 0.12 | 0.88 | 0 | 1 | MH _(0.90, 1) |
| 54 | 70 | 38 | CH | (-) 1.21 | 20 | 0.77 | 0.23 | 0 | 1 | CH _(0.82, 1) |
| 55 | 70 | 42 | CH | (-) 4.44 | 20 | 0.99 | 0.01 | 0 | 1 | CH _(0.99, 1) |
| 56 | 74 | 44 | CH | (-) 3.69 | 24 | 0.98 | 0.02 | 0 | 1 | CH _(0.98, 1) |
| 57 | 72 | 46 | CH | (-) 6.48 | 22 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 58 | 73 | 29 | MH | 7.81 | 23 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1, 1) |
| 59 | 75 | 36 | MH | 3.35 | 25 | 0.03 | 0.97 | 0 | 1 | MH _(0.97, 1) |
| 60 | 76 | 41 | MH-CH | 0.10 | 26 | 0.48 | 0.52 | 0 | 1 | MH _(0.75, 1) |
| 61 | 77 | 45 | CH | (-) 2.73 | 27 | 0.94 | 0.06 | 0 | 1 | CH _(0.94, 1) |
| 62 | 80 | 31 | MH | 10.32 | 30 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1, 1) |
| 63 | 77 | 47 | CH | (-) 4.35 | 27 | 0.99 | 0.01 | 0 | 1 | CH _(0.99, 1) |
| 64 | 77 | 42 | CH-MH | 0.31 | 27 | 0.58 | 0.42 | 0 | 1 | CH _(0.76, 1) |
| 65 | 78 | 57 | CH | (-) 11.82 | 28 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 66 | 82 | 51 | CH | (-) 4.63 | 32 | 0.99 | 0.01 | 0 | 1 | CH _(0.99, 1) |
| 67 | 83 | 56 | CH | (-) 8.07 | 33 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 68 | 84 | 55 | CH | (-) 6.68 | 34 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 69 | 23 | 9 | CL | (-) 5.49 | (-) 27 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |
| 71 | 26 | 15 | CL | (-) 8.56 | (-) 24 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |
| 72 | 31 | 22 | CL | (-) 11.27 | (-) 19 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |
| 73 | 33 | 22 | CL | (-) 10.09 | (-) 17 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |
| 74 | 61 | 49 | CH | (-) 15.38 | 11 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1, 1) |
| 75 | 92 | 49 | MH | 2.87 | 42 | 0.05 | 0.95 | 0 | 1 | MH _(0.95, 1) |
| 76 | 93 | 36 | MH | 13.94 | 43 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1, 1) |
| 77 | 88 | 52 | CH | (-) 1.90 | 38 | 0.87 | 0.13 | 0 | 1 | CH _(0.89, 1) |
| 78 | 95 | 54 | MH | 0.60 | 45 | 0.35 | 0.65 | 0 | 1 | MH _(0.77, 1) |
| 79 | 90 | 50 | MH | 0.89 | 40 | 0.29 | 0.71 | 0 | 1 | MH _(0.79, 1) |
| 80 | 96 | 50 | MH | 4.42 | 46 | 0.01 | 0.99 | 0 | 1 | MH _(0.99, 1) |
| 81 | 89 | 56 | CH | (-) 4.54 | 39 | 0.99 | 0.01 | 0 | 1 | CH _(0.99, 1) |
| 82 | 85 | 51 | CH | (-) 2.86 | 35 | 0.95 | 0.05 | 0 | 1 | CH _(0.95, 1) |
| 83 | 16 | 11 | CL | (-) 11.23 | (-) 34 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |
| 84 | 17 | 10 | CL | (-) 9.83 | (-) 33 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |
| 85 | 20 | 11 | CL | (-) 8.87 | (-) 30 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1, 1) |

Tablo 1. Devamı.

Table 1. Continued.

| Örnek No | LL (%) | Ip (%) | Klasik Zemin Sınıfı | A hattına olan mesafe | LL=%50 doğrusuna olan mesafe | Bulanık Zemin | | Bulanık Plastisite | | 'prabor' işlemcisi ile elde edilen zemin sınıfı |
|----------|--------|--------|---------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|---------|--------------------|---------|---|
| | | | | | | μ_c | μ_M | μ_L | μ_H | |
| 87 | 6 | 4 | CL | (-) 11.47 | (-) 44 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1,1) |
| 88 | 27 | 16 | CL | (-) 8.78 | (-) 23 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1,1) |
| 89 | 30 | 17 | CL | (-) 7.82 | (-) 20 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1,1) |
| 91 | 27 | 17 | CL | (-) 9.59 | (-) 23 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1,1) |
| 92 | 7 | 6 | CL | (-) 12.49 | (-) 43 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1,1) |
| 93 | 10 | 3 | CL | (-) 8.31 | (-) 40 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1,1) |
| 94 | 4 | 2 | CL | (-) 11.03 | (-) 46 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1,1) |
| 95 | 25 | 12 | CL | (-) 6.73 | (-) 25 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1,1) |
| 96 | 12 | 1 | CL | (-) 5.52 | (-) 38 | 1 | 0 | 1 | 0 | CL _(1,1) |
| 97 | 94 | 43 | MH | 8.89 | 44 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1,1) |
| 98 | 92 | 58 | CH | (-) 4.39 | 42 | 0.99 | 0.01 | 0 | 1 | CH _(0.99,1) |
| 99 | 88 | 47 | MH | 2.13 | 38 | 0.11 | 0.89 | 0 | 1 | MH _(0.90,1) |
| 100 | 86 | 54 | CH | (-) 4.69 | 36 | 0.99 | 0.01 | 0 | 1 | CH _(0.99,1) |
| 101 | 90 | 40 | MH | 8.95 | 40 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1,1) |
| 102 | 92 | 45 | MH | 6.10 | 42 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1,1) |
| 103 | 99 | 47 | MH | 8.60 | 49 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1,1) |
| 104 | 36 | 3 | ML | 7.00 | (-) 14 | 0 | 1 | 1 | 0 | ML _(1,1) |
| 105 | 33 | 4 | ML | 4.43 | (-) 17 | 0.01 | 0.99 | 1 | 0 | ML _(0.99,1) |
| 106 | 42 | 5 | ML | 8.92 | (-) 8 | 0 | 1 | 1 | 0 | ML _(1,1) |
| 107 | 82 | 40 | MH | 4.24 | 32 | 0.01 | 0.99 | 0 | 1 | MH _(0.99,1) |
| 108 | 87 | 40 | MH | 7.19 | 37 | 0 | 1 | 0 | 1 | MH _(1,1) |
| 109 | 65 | 54 | CH | (-) 17.06 | 15 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1,1) |
| 110 | 75 | 52 | CH | (-) 9.56 | 25 | 1 | 0 | 0 | 1 | CH _(1,1) |
| 111 | 55 | 31 | CH | (-) 4.40 | 5 | 0.99 | 0.01 | 0.01 | 0.99 | CH _(0.99,1) |
| 112 | 52 | 21 | MH | 1.90 | 2 | 0.13 | 0.87 | 0.12 | 0.88 | MH _(0.89,0.90) |
| 113 | 55 | 19 | MH | 5.28 | 5 | 0.01 | 0.99 | 0.01 | 0.99 | MH _(0.99,0.99) |
| 114 | 47 | 15 | ML | 3.80 | (-) 3 | 0.02 | 0.98 | 0.95 | 0.05 | ML _(0.98,0.95) |

2.3 Bulanık ve klasik zemin sınıflarının karşılaştırılması

Önerilen bulanık sınıflama sürecinin laboratuvar verileri üzerinde uygulanması sonucu elde edilen bulanık zemin sınıfları, verilerin klasik zemin sınıfları ile karşılaştırılmıştır. İki tür sınıflama yönteminde de zemin örnekleri için elde edilen harflendirme, A hattı ve LL=%50' yi ifade eden doğru üzerine düşen noktalar (29, 33, 60 ve 64 No.lu örnekler) hariç, aynıdır (Tablo 1). Diğer bir ifadeyle, bu tanımlama noktaları için aynı zemin sınıfları elde edilmiştir. Ancak bu noktaların söz konusu sınıflara olan üyelik dereceleri iki sınıflama yöntemine göre farklıdır. Klasik zemin sınıflama yönteminde noktaların üyelik dereceleri, hatlara olan uzaklığa bakılmaksızın, 1' dir. Başka bir ifadeyle zemin örnekleri kesinlikle içinde buldukları sınıfa

aittirler. Buna karşın bulanık sınıflama süreci sonucu elde edilen zemin sınıfları 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerine sahiptirler. Örneğin, 4 No.lu zemin örneği klasik metoda göre ML (düşük plastisiteli kil), Toksoz ve diğ. [15] tarafından önerilen bulanık sınıflama yöntemine göre ise ML_(0.76,1) olarak sınıflandırılmıştır. Bu zemin örneği klasik küme kuramına göre hiç şüphe getirmeksizin 1 üyelik derecesiyle ML sınıfına aittir. Oysa bulanık küme kuramına göre 0.76 üyelik derecesiyle M(silt) ve 1 üyelik derecesiyle L(düşük plastisite) sınıfındadır. A hattı ve LL=%50' yi ifade eden doğru üzerine düşen zemin örnekleri için ise farklı bir durum söz konusudur. Bu zemin örnekleri klasik sınıflama yöntemine göre çift simge ile gösterilir. Bu durumda belirsizlik seviyesi maksimuma ulaşmaktadır. Toksoz ve diğ. [15] tarafından önerilen bulanık

sınıflama sürecine göre ise söz konusu zemin örnekleri tek simge ile gösterilebilmiştir. Böylelikle belirsizlik seviyesi minimuma indirilmiştir. Örneğin, A hattı üzerinde olan 33 No.lu örnek klasik sınıflama metoduna göre CH-MH olarak ifade edilirken Toksoz ve diğ. [15] tarafından önerilen bulanık sınıflama sürecine göre MH_(0.75,1) olarak ifade edilebilmektedir (Tablo 1). Bu isimlendirmeye göre bu zemin örneğinin M kümesine olan üyelik derecesi 0.75, H kümesine olan üyelik derecesi ise 1'dir. Diğer bir ifadeyle, bu zemin örneği %75 oranında silt ve %100 oranında yüksek plastisiteli bir zemindir. Dolayısıyla, bulanık sınıflama süreci sonucu plastisite abağında belirsizlik sınırları (k ile belirlenen zon) içerisinde kalan tanımlama noktalarının kümelerine olan üyelik derecesi 0 ile 1 arasında değişim göstermektedir. Sonuç olarak, Toksoz ve diğ. [15] tarafından ince taneli zeminler için geliştirilen bulanık sınıflama sürecinin esnek bir şekilde ve yüksek bir doğrulukla uygulanabilir olduğu söylenebilir.

3 Sonuçlar ve tartışma

İnce taneli zeminlerin plastisite abağı ile sınıflandırılması sırasında likit limit ve plastik limit deneylerini etkileyen faktörlerden dolayı belirsizlikler oluşmaktadır. Özellikle tanımlama noktalarının sınırları ayıran çizgiler üzerine veya yakına düşmesi durumunda belirsizlikler artmaktadır. Bu belirsizliklerin en aza indirgenmesi amacıyla Toksoz ve diğ. [15] tarafından bulanık küme kuramı kullanılarak bulanık bir sınıflama süreci geliştirilmiştir. Önerilen metod plastisite abağı üzerindeki tanımlama noktalarının sınırları ayıran çizgilere olan dik mekansal mesafelerini baz almıştır. Bu çalışmada ise Toksoz ve diğ. [15] tarafından önerilen bulanık sınıflama sürecinin 100 adet veri üzerinde uygulaması yapılmıştır. Önceki çalışmadan farklı olarak bu çalışmada kullanıcıya kolaylık sağlaması için tanımlama noktalarının sınırları ayıran çizgilere olan mesafeleri formüller yardımıyla belirlenmiştir. Mesafelerin bağımsız değişken olarak alındığı sigmoid fonksiyonu kullanılarak bulanık zemin ve bulanık plastisite değerleri elde edilmiştir. Bulanık zemin ve bulanık plastisite değerlerinden bulanık zemin sınıflarını elde etmek için 'probor' işlemcisi kullanılmıştır. Önerilen bu metod ile maksimum belirsizlik koşullarında çift simge ile belirtilen bir zemin örneğini tek simge ile belirtmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada belirsizlik seviyesi %5 olarak alınmıştır (k=5). Ancak farklı belirsizlik seviyeleri dikkate alınarak da bulanık zemin sınıfları elde edilebilir. Önerilen bulanık sınıflama süreci matematiksel formüllere dayalı olduğundan dolayı bütün kullanıcılar tarafından kolaylıkla uygulanabilir niteliktedir.

Toksoz ve diğ. [15] tarafından önerilen bu yaklaşım plastisite abağının bulanıklaştırılmasına yönelik atılan bir ilk adım olarak düşünülmelidir. Abakta A hattının üstünde bulunan ve plastisite indeksi 4-7 arasında olan bölge bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir. Daha sonraki çalışmalarda söz konusu bölgenin de dikkate alınarak bir değerlendirme yapılması önerilmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi ince taneli zeminlerin plastisite abağı ile sınıflandırılması sırasında oluşan belirsizlikler likit limit ve plastik limit deneylerini etkileyen faktörlerden kaynaklanmaktadır. Ancak söz konusu deneylerin hata payı siltli zeminlerde killi zeminlere oranla daha fazladır. Bu durumun da daha sonra yapılacak olan çalışmalarda dikkate alınması önerilmektedir. Vurgulanması gereken diğer bir nokta ise Türk Standardı (TS 1500) ve İngiliz Standardı (BS 5930) zemin sınıflama sistemlerinde düşük ve yüksek plastisite sınıflarına ek olarak orta plastisite sınıfının da mevcut

olduğudur. Dolayısıyla bu zemin sınıflama sistemlerindeki belirsizlikleri azaltmaya yönelik yapılacak olan herhangi bir çalışmada 'orta plastiklik' kavramı da incelenmelidir. Son olarak, μ_C , μ_M ve μ_H , μ_L bulanık değerlerinin ince taneli zeminlerin şişme potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulacak olan modellemelerde girdi parametresi olarak kullanılması önerilmektedir.

4 Conclusions and discussion

Because of the factors affecting liquid limit and plastic limit tests, uncertainties can arise in the classification of fine-grained soils by using the plasticity chart. The uncertainty increases especially when the points on the chart are on the lines that separate certain soil classes or very close to these lines. In order to minimize these uncertainties, Toksoz et al. [15] suggested a fuzzy classification routine by using the fuzzy set theory. The proposed method considers the spatial distances of the evaluation points on the chart from the lines. In the present study, an application of the fuzzy classification routine suggested by Toksoz et al. [15] was performed on a total of 100 fine-grained soil samples. Differently from the previous study, in this study, the spatial distances of the evaluation points from the lines were determined by means of the formulas to provide convenience to the users. The fuzzified soil and fuzzified plasticity values were obtained by considering the sigmoid function whose independent variable was taken as the spatial distances of the points. In order to obtain the fuzzy soil classes from the fuzzified soil and plasticity values, the 'probor' operator was taken into account. By applying this fuzzy classification routine, it is possible to define a fine-grained soil class, which is defined by two symbols in maximum uncertainty conditions, using only one symbol. In the present study, the uncertainty level was taken as 5% (k=5). However, the fuzzy soil classes can be obtained by considering different uncertainty levels. Since the suggested fuzzification process is based on mathematical formulas, it is easily applicable to all users.

The approach suggested by Toksoz et al. [15] should be considered as a first step in the fuzzification of the plasticity chart. In this approach, the region which is between the plasticity indices of 4-7 and above the A line on the chart was not taken into consideration. It is suggested for the next studies to make an evaluation considering this region, as well.

As it is mentioned before, the uncertainties which arises during the classification of fine-grained soils by using plasticity chart stem from the factors affecting the liquid limit and plastic limit tests. However, the error margin of these tests is higher in silty soils than clayey soils. It is recommended to consider this situation in the future studies. Another point to emphasize is that there is also a medium plasticity class in addition to low and high plasticity classes in Turkish Standard (TS 1500) and British Standard (BS 5930). Therefore, in a study to reduce uncertainties in these classification systems, "medium plasticity" class should also be taken into consideration. Finally, it is recommended to use the fuzzy values μ_C , μ_M and μ_H , μ_L as input parameters in the modelling the determination of the swelling potential of fine-grained soils.

5 Kaynaklar

- [1] The American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) M-145-91, "Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes". Washington, DC, 2008.

- [2] British Standard (BS) 5930. "Code of practice for site investigation". British Standards Institution, London, 1981.
- [3] German Institute for Standardization (DIN) 18196. "Soil Classification for Civil Engineering Purposes". Berlin, Germany, 1988.
- [4] American Society for Testing and Materials (ASTM) D2487-06. "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". West Conshohocken, PA, 2006.
- [5] Holtz RD, Kovacs WD. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1981.
- [6] Genç D. *Zemin Mekaniği ve Temeller*. 1. Baskı, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Yayın No: 100, Ankara, Türkiye, 2008.
- [7] Atterberg A. "Die plastizität der tone". *Internationale Mitteilungen für Bodenkunde*, 1, 10-43, 1911.
- [8] ASTM D2487-11, "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [9] Casagrande A. "Classification and identification of soils". *Trans ASCE*, 133, 901-992, 1948.
- [10] ASTM D4318-10e1, "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils". ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [11] BSI, "British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes". British Standards Institution, London, 1990.
- [12] Lee LT. "Freeman RB. An alternative test method for assessing consistency limits". *Geotechnical Testing Journal*, 30(4), 1-8, 2007.
- [13] Sivakumar V, Glynn D, Cairns, P, Black JA. "A new method of measuring plastic limit of fine materials". *Géotechnique*. 59(10), 813-823, 2009.
- [14] Haigh SK. "Mechanics of the Casagrande liquid limit test". *Canadian Geotechnical Journal*, 49(9), 1015-1023, 2012.
- [15] Toksoz D, Yilmaz I, Hefeslioglu HA, Marschalko M. "A fuzzy classification routine for fine grained soils". *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 49(4), 344-349, 2016.
- [16] Zadeh LA. "Fuzzy sets". *Information and Control*, 8, 338-353, 1965.
- [17] Alvarez Grima M. *Neuro-Fuzzy Modelling in Engineering Geology*. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 244 p. 2000.
- [18] Provenzano P. "A fuzzy-neural network method for modeling uncertainties in soil-structure interaction problems". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18, 391-411, 2003.
- [19] Mishra DA, Basu A. "Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system". *Engineering Geology*, 160, 54-68, 2013.
- [20] Gong W, Wang L, Khoshnevisan S, Juang CH, Huang H, Zhang J. "Robust geotechnical design of earth slopes using fuzzy sets". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1), 1-9, 2014.
- [21] Sezer EA, Nefeslioglu HA, Gokceoglu C. "An assessment on producing synthetic samples by fuzzy C-means for limited number of data in prediction models". *Applied Soft Computing*, 24, 126-134, 2014.
- [22] Sai Samanth A. "Fuzzy theory application for analysis and assessment of slope stability". *The 29th International Conference of The Jangjeon Mathematical Society on Number Theory and Special Functions and its Applications*, Pondicherry University, Pondicherry, India, 8-10 August 2016.
- [23] Mutlu B, Sezer EA, Nefeslioglu HA. "A defuzzification-free hierarchical fuzzy system (DF-HFS): Rock mass rating prediction". *Fuzzy Sets and Systems*, 307, 50-66, 2017.
- [24] Zhang Z, Tumay MT. "Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification". *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(3), 179-186, 1999.
- [25] Odhiambo LO, Freeland RS, Yoder RE, Hines JW. "Investigation of a fuzzy-neural network application in classification of soils using ground penetrating radar imagery". *Applied Engineering in Agriculture*, 20(1), 109-117, 2004.
- [26] Göktepe AB, Altun S, Sezer A. "Soil clustering by fuzzy c-means algorithm". *Advances in Engineering Software*, 36(10), 691-698, 2005.
- [27] Kıyak A, Ergüven H, Karavul C. "Zemin sınıflamasında bulanık mantık uygulaması". *Uluslar Arası Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 22-24 Ekim 2007.
- [28] Yıldırım E, Doğan E, Karavul C, Aşçı M, Özçep F, Arman H. "Bulanık mantık modeli ile zeminlerin sınıflandırılması". *Uluslar Arası Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 22-24 Ekim 2007.
- [29] Bhargavi P, Jyothi S. "Soil classification by generating fuzzy rules". *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2(8), 2571-2576, 2010.
- [30] Han P, Wang J, Ma Z, Lu A, Gao M, Pan L. "Application of fuzzy clustering analysis in classification of soil in Qinghai and Heilongjiang in China". *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, Nanchang, China, 282-289, 2010.
- [31] Riberio MV, Cunha LMS, Camargo HA, Rodrigues LHA. "Applying a fuzzy decision tree approach to soil classification". *International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Cham, Springer-Verlag, France, 15-19 July 2014.
- [32] Sandhu HAS, Dubey OP. "Hydrological soil classification-A fuzzy approach". *International Journal of Research in Science and Technology*, 6(2), 84-95, 2016.
- [33] Miloud SH, Djili K, Benidir M. "Fuzzy logic expert system for classifying solonchaks of Algeria". *Applied and Environmental Soil Science*, 2018, 1-11, 2018.
- [34] Şen Z. *Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme*. 3. Baskı, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, Türkiye 2009.
- [35] Negnevitsky M. *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. Addison Wesley, London, 2002.
- [36] Detyniecki M. *Fundamentals on Aggregation Operators*. AGOP, Berkeley, 2001.