



## Zeminlerin dispersibilite sınıfının XRF analiz sonuçlarına dayalı olarak Genetik Programlama (GP) ile tahmini

### Prediction of dispersibility class of soils with Genetic Programming (GP) based on XRF analysis results

Sadettin Topçu<sup>1,\*</sup> , Evren Seyrek<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler MYO, 43000, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43000, Kütahya, Türkiye

#### Öz

Dispersif zeminler, dolgu barajların çekirdek yapısında kullanıldığında erozyon hassasiyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle içsel erozyona neden olarak bu tür barajların göçmesine neden olmaktadır. Bu tür zeminlerin tasarım aşamasında belirlenerek dolgu barajların inşaatında kullanılmaması gerekmektedir. Dispersif zeminler; fiziksel (dağılma deneyi, çifte hidrometre deneyi ve iğne deliği deneyi) ve kimyasal (boşluk sıvısının kimyasal içeriği) deneyler ile belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ise alternatif bir yöntem olarak XRF (X-Işını Floresans) analiz sonuçları kullanılarak genetik programlama (GP) yardımıyla zeminlerin dispersibilite sınıfının tahmin edilebilmesi için bilgisayar modelleri geliştirilmiştir. Genetik İfade Programlama (GİP) ile oluşturulan tahmin modellerinde kullanılan 181 adet verinin % 66.9'u eğitim verisi; geri kalan ise test verisi olarak kullanılmıştır. Majör (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve minör (MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) oksitlerin girdi verisi olarak kullanıldığı bilgisayar modellerinde zeminler dispersif (D) ve dispersif olmayan zeminler (ND) olarak yüksek oranlarda başarılı bir şekilde tahmin edilmektedir. En başarılı tahmin modeli tüm veri seti içinde SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO ve Na<sub>2</sub>O girdi verilerinden oluşan modeldir.

#### Abstract

When dispersive soils are used in the core structure of embankment dams, due to their high erosion sensitivity, they cause internal erosion and cause such dams to collapse. Such soils should be determined at the design stage and not used in the construction of fill dams. Dispersive soils can be determined by physical (Crumb test, double hydrometer test and pinhole test) and chemical (chemical content of the pore fluid) experiments. In this study, as an alternative method, computer models have been developed to predict the dispersibility class of soils with the help of genetic programming (GP) using XRF (X-Ray Fluorescence) analysis results. 66.9% of the 181 data used in prediction models created with Genetic Expression Programming (GEP) are training data; the remainder was used as test data. In computer models where major (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and minor (MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) oxides are used as input data, soils are successfully predicted as dispersive (D) and non-dispersive soils (ND) at high rates. The most successful forecasting model is the one that consists of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO and Na<sub>2</sub>O input data in the entire data set.

**Anahtar kelimeler:** Dolgu baraj, Dispersif zemin, Genetik programlama, XRF analizi

**Keywords:** Embankment dam, Dispersive soil, Genetic programming, XRF analysis

#### 1 Giriş

Suya istinat eden toprak yapılarında ince daneli zeminlerin erozyon direncinin belirlenmesi, bu yapıların kısa ve uzun dönemli güvenliği açısından önem arz etmektedir. Buna göre ince daneli zeminlerde erozyon hassasiyeti yüksek ve erozyon direnci çok düşük olarak bilinen dispersif zeminlerin tanımlanması bu yapıların güvenliği açısından en kritik işlemdir. Literatürde dispersif zeminlerin tanımlanması amacıyla önerilen farklı yaklaşımlar bulunmaktadır.

Erozif ve erozif olmayan zeminleri tanımlamak için pipet metodu kullanılarak bir dispersiyon yüzdesi tanımlanmıştır [1]. İlk defa SCS çifte hidrometre deneyinin ana prensipleri anlatılmış ve dispersibilitenin tanımlanmasında kullanılan dispersiyon yüzdesi önerilmiştir [2]. Dispersiyon yüzdesi

belirlenirken [1]'de olduğu gibi pipet metodu kullanılmış fakat pipet metodunda ince dane oranı yerine kil oranı dikkate alınmıştır [3]. 1977 yılında gerçekleştirilen çalışmada ise kil oranı pipet metodu yerine hidrometre yöntemiyle belirlenerek "SCS Çifte Hidrometre Deneyi" geliştirilmiştir [4]. Borulanmanın görüldüğü toprak dolgu barajlardaki örneklerde yapılan çifte hidrometre deneyinde zeminlerin % 85'inde dispersiyon yüzdesinin 30 ve üzeri olduğu görülmüştür.

Literatürde boşluk sıvısı üzerinden yapılan dispersibilite değerlendirmeleri de dikkati çekmektedir. İnce daneli zeminlerin boşluk sıvısının kimyasal analizinden elde edilen değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) değerlerine bağlı olarak dispersibilite tanımlaması yapılmıştır [5]. Gerber ve Harmse [6] dispersibilitenin tanımlanabilmesi için değişebilir sodyum

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sadettin.topcu@dpu.edu.tr. (S. Topçu)

Geliş / Received: 21.09.2022 Kabul / Accepted: 29.09.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1178313

yüzdesi (ESP) ve katyon değişim kapasitesi (CEC) değerine bağlı bir değerlendirme kartı ile zeminin pH, elektriksel iletkenlik ve boşluk sıvısının sodyum adsorpsiyon oranını (SAR) dikkate alan bir işlem ağı önermiştir. Lityum katyonunun sodyuma göre daha fazla reaktif olmasından dolayı ince daneli zeminlerin dispersif göçmesinde sodyumdan daha etkili bir alkali katyon olduğu gözlemlenmiştir [7].

Dispersif zeminlerin tanımlanmasında Emerson [8] tarafından “Emerson Dağılma Deneyi” geliştirilmiştir. Zeminlerin durağan bir saf suda göstermiş oldukları dağılma davranışı yedi farklı şekilde kategorize edilmiştir. 1976 yılında Sherard vd. [9] tarafından dispersif zeminlerin tanımlanmasında yarı-model deney sistemi olan iğne deliği deneyi geliştirilmiştir. Emerson [8] tarafından tanımlanan yedi farklı kategori dört farklı kategoriye düşürülmüştür [10]. Bunun yanında iğne deliği deneyi sonuçları esas alınarak, dispersibiliteyi tanımlamak için boşluk sıvısının toplam çözünmüş tuz miktarı ( $TDS=Na+Ca+Mg+K$ ) ve sodyum yüzdesine (Na %) bağlı bir tasarım kartı geliştirmişlerdir.

Son yıllarda dispersif zeminleri tanımlamak için kullanılan yöntemlerin birbirlerine göre mukayesesine yönelik çalışmalar özellikle dikkati çekmektedir. Savaş [11] iğne deliği deneyinde büyük boyutlu zemin örneklerindeki dispersibilite tanımlamaların daha gerçekçi olduğunu ifade etmiştir. Doğrudan fiziksel ve kimyasal deney sonuçlarına dayalı değerlendirme dışında farklı tahmin yöntemleri de literatürde gittikçe yer bulmaya başlamıştır. Fiziksel (iğne deliği deneyi, çifte hidrometre) ve kimyasal ( $TDS-Na$  (%) ve ESP-CEC) deneylerden elde edilen dispersibilite tanımlamaları, bulanık mantık yönteminde kombine edilerek daha objektif ve gerçekçi dispersibilite tanımlamaları yapılmıştır [12]. Sodyum adsorpsiyon oranı (SAR) değerinden farklı olarak  $K^*$ ’yı da dikkate alan stabilite katsayısı, ince daneli zeminlerin dispersibilitesini tanımlamak için geliştirilmiştir [13]. Bir başka çalışmada ise boşluk sıvısındaki Na, K, Mg ve Ca için farklı ağırlıkta oranlar verilerek elde edilen net dispersif yük ile dispersiyon yüzdesi arasında doğrusal ve çok anlamlı bir ilişki bulunmuştur [14]. Turgut vd. [15] lojistik regresyon yöntemiyle geliştirilen formülle, ince daneli zeminlerin sodyum yüzdesi ve toplam çözünür tuz miktarlarına göre dispersibilite sınıfını tahmin edebilmiştir.

Son yıllarda biyolojik evrim sürecini taklit eden genetik algoritmalar (GA) ve Genetik Programlama (GP) birçok alanda olduğu gibi Geoteknik Mühendisliği alanında da sıklıkla kullanılmaktadır. Zeminlerin sınıflandırılması, sıvılaşma riski, ince daneli zeminlerin şişme karakteristiği ve zeminlerin esneklik modülü başarıyla tahmin edilmiştir [16-19].

İnce daneli zeminlerde dispersibilite özelliklerinin tanımlanması için fiziksel (Dağılma deneyi, çifte hidrometre deneyi ve iğne deliği deneyi) ve kimyasal deneyler (Boşluk sıvısının kimyasal analizi) yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ise, çok uzun zaman ve çok fazla örnek malzeme gerektiren bu deneyler yerine çok az miktarda örnek ile daha hızlı gerçekleştirilecek XRF analizinin sonuçları kullanılarak dispersibilite sınıfının belirlenebilmesi için GİP ile tahminleme modelleri oluşturulmuştur.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Genetik algoritma (GA) ve genetik ifade programlama (GİP)

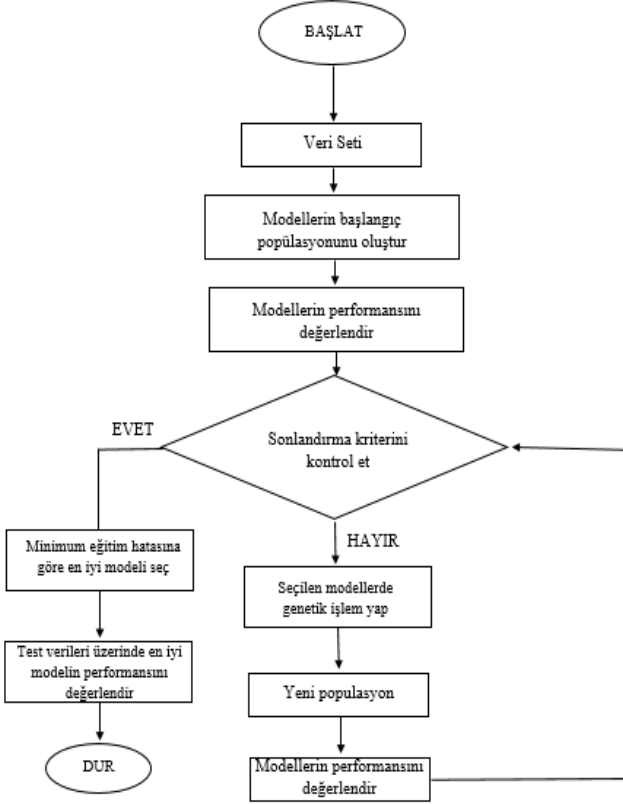
GA; 1970'lerde John Holland ve ekibi tarafından popüler hale getirilen bir evrimsel algoritma sınıfıdır. Genetik algoritmalar canlılardaki gen yapılarını ve biyolojik evrim sürecindeki yöntemleri dikkate alan sezgisel yaklaşımlardır. Bu algoritmada iterasyonlardaki mutasyon ve çaprazlamalarla elde edilen en iyi kromozomlar bundan sonraki popülasyonda yer alan bireylere aktarılmaktadır. Genetik algoritmada bireyleri kromozomlar; genleri kromozomlar içinde yer alan bilgi; popülasyon ise kromozomların bir araya gelmesinden oluşan toplumu ifade eder. Genetik algoritmadaki biyolojik evrimsel süreçte iki temel esas keşif ve faydalanmadır [20].

Popülasyon çeşitliliği, keşif esnasında iki temel genetik operatör olan çaprazlama ve mutasyon ile olur. Çaprazlamada iki ebeveyn kromozomdan gelen genetik bilgiler birleştirilerek yeni bir yavru kromozom oluşturulur. Mutasyonda ise ebeveyn kromozomlarında bulunan genlerin bilgileri rastgele değiştirilir. Faydalanma ise her keşif aşamasında en uygun kromozomlar seçilerek popülasyon çeşitliliği azaltılır. Böylelikle en iyi uyum sağlayan bireylerin (kromozomların) hayatına devam etmesine izin verilir. Genetik algoritmadaki evrimsel süreç bazı yakınsama kriterleri temelinde sonlandırılır. Bazen maksimum nesil sayısı tanımlanır bazen de en iyi uygunluk değerini değiştirmeden oluşturulan çok sayıda nesil olabildiğinde de işleme son verilebilir.

GP ise evrimsel algoritmalar ailesine ait GA'nın bir dalıdır ve ilk olarak Koza [21] tarafından önerilmiştir. GP, GA'ya benzerdir, fakat genetik programlama çözümlerini genetik algoritmadaki gibi kavrama yoluyla değil de “ayrışan ağaç” yapısını kullanarak yapar. Bu teknik gerçek bir “aşağıdan yukarıya” süreçtir. Çünkü bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi oluşturan yapı için hiçbir kabul yoktur ve uygun bir ilişki sadece kullanılan veri seti için tanımlanmaktadır. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında kurulan ilişki mantıksal olabilir. Bununla birlikte tanıdık veya tanıdık olmayan matematiksel fonksiyonlar şeklinde de olabilir. GP'da bu ilişkilerin hayata geçirilmesinde iki bileşen vardır: i) RNA'nın rolünü taklit eden temel operatörlerden oluşan ayrışan ağaç ii) Kromozomların rolünü taklit eden fonksiyonlar ve onların bağlantı seti olan parametrelerin gerçek bileşenleri. Bu iki bileşen birlikte çalıştığında, ancak o zaman evrimsel süreçlerin verimli öykünmesi mümkün hale gelebilmektedir [22].

GİP ise, öğrenilmiş veya keşfedilmiş bilgilerden bilgisayar modelleri oluşturmak için Ferreira [23] tarafından geliştirilmiş yeni bir tekniktir. GİP'nin, GP'dan temel farkı bireylerin yapısıdır. GP'da bireyler, ayrıştırma ağaçlarıdır. Farklı boyut ve şekillerde doğrusal olmayan varlıklardır. GİP'da ise bireyler, GA'da olduğu gibi sabit uzunlukta doğrusal diziler olarak kodlanır (genom veya kromozomlar), daha sonra farklı boyut ve şekillerde doğrusal olmayan varlıklar (ayrıştırma ağacı) olarak ifade edilir. Bu çalışmada GeneXproTools 5.0 programı (www.gepsoft.com) kullanılarak oluşturulan modellerde GİP esnasında XRF analiz sonuçları ile ince daneli zeminlerin dispersibilite sınıfları tahmin edilmiştir. GİP için akış şeması Şekil 1'de verilmektedir. XRF analizi cihaz

organizasyonlu analitik analiz tekniklerinden olup, her çeşit örnekte gaz fazı hariç tüm fazlarda elementel analizi yapmak için en geçerli yöntemlerdendir. Hızlı, kesin ve tekrarlanabilir sonuçlar veren bu analiz yöntemi metal, çimento, petrol, mineraloji, madencilik, jeoloji ve atık kimyasında çokça kullanılmaktadır [24].



Şekil 1. GİP için işlem akış şeması

## 2.2 Veri seti

XRF analiz sonuçlarını kullanarak genetik algoritmalar yardımıyla zeminlerin dispersibilite özelliklerini veya dispersibilite sınıflarını tahmin etmek için literatürde yapılmış çalışmalardan yararlanılmıştır (Tablo 1) Zeminlerde dispersibilite sınıfları üçe ayrılmaktadır: D: Dispersif zemin, I: Ara zemin, ND: Dispersif olmayan zemin. Bu çalışmada ara zeminlerle ilgili yeterli XRF analiz sonuçları bulunamadığı için sınıflandırma, dispersif (D) ve dispersif olmayan (ND) zeminler olarak ele alınmıştır. Yukarıda anlatıldığı gibi zeminlerin sınıflandırılmasında fiziksel ve kimyasal deneyler kullanılmaktadır. Bunların yanında arazide gözlemden ve geçmiş tecrübelerden yararlanılarak yapılan dispersibilite değerlendirmeleri de bulunmaktadır. Arazideki zeminlerde erozyonun neden olduğu yüzey şekilleri belirlenmiş ise kil zeminin dispersibilite açısından ilk tanımlaması yapılmış olur. Arazide güçsüz ve bodur bitki örtüsünün yer alması, bu sahanın yüksek oranlarda tuzlu zeminden oluştuğunu göstermektedir ve bu tip zeminlerin çoğu genellikle dispersiftir. Ancak dispersif zeminler, nötr veya asidik ortamlar içinde de oluşabilir ve bu ortamlarda taze çim ve ot gelişebilir [25]. Derin oyulmalar ve küçük sulama barajlarında içsel erozyon oluşumu, yol yarmalarının yüzey erozyonu,

taşkın boyunca gelişen tünel erozyonu, kille dolu olmayan kayaç boşluklarının varlığı potansiyel dispersif zeminleri işaret edebilir. Bunların yanında yağışlardan sonra oluşan su birikintilerinde ve küçük sulama barajlarındaki bulanıklık dispersif zeminlerin göstergesidir [26].

Bu çalışma kapsamında literatürden elde edilen dispersibilite tanımlamaları; iğne deneyi testi, çifte hidrometre testi, dağılma testi, boşluk sıvısının kimyasal analizi, zemin dispersiyon testi, yapay yağmur testi, arazi gözlemi ve geçmiş tecrübelerle dayalı olarak belirlenmiş ve numunelerin XRF analiz sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.

Literatürde dikkate alınan çalışmalarda XRF analizinde çok az çalışmada örnek hazırlama tekniği, zemin örneklerinin dane çapı dağılımı, spektrometre tipi vb. detaylar bulunmakla birlikte bu etkiler bu çalışma kapsamında değerlendirilememiştir. Bunun sebebi olarak zeminlerde gerçekleştirilen XRF analizleri için yayımlanmış bir standardın olmayışı gösterilebilir.

Modeller için XRF analiz sonuçlarından 6 oksit ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ) dikkate alınmıştır.  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oksitlerini oluşturan elementler dispersibiliteyi etkileyen kil mineralinin yapısını oluşturan oktahedral ve tetrahedral tabakalarda yer alırlar [27]. Bu oksitler aynı zamanda killi zeminlerde en büyük oranlarda bulunurlar [28]. Diğer oksitlerin elementlerinin katyonları ise zeminlerin boşluk sıvısında fiziko-kimyasal etkileri oluşturarak dispersiyon mekanizmasını doğrudan etkilerler.

Dispersibilite sınıfının tahmin edilmesinde kullanılan bağımsız değişkenlerin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri Tablo 2'de verilmektedir.

## 2.3 Model

Bu çalışmada 6 adet majör ve minör oksitin, farklı kombinasyonlarından oluşan bağımsız değişken kümeleri ile bağımlı değişken olan dispersibilite sınıfının tahmini için oluşturulacak modellerde kullanılacak veriler literatürde yer alan çalışmalardan elde edilmiştir [29-46]. Bu kombinasyonlar; Tablo 3'de majör, majör-minör ve minör oksitlerden oluşan bağımsız değişken kümelerinden oluşturulmuştur. Toplamda 31 farklı kombinasyonla gerçekleştirilen tahminlerde veri setindeki bağımsız değişkenlerin % 66.9'u (121 adet) eğitim verisi; % 33.1'i (60 adet) ise test verisi olarak dikkate alınmıştır. Oluşturulan modellerde yapılan sınıflandırmanın tahmin uyum performanslarının ölçümü, hata matrisi ve buna bağlı olarak çizilen ROC (Alıcı İşlem Karakteristiği) eğrisi altında kalan alan (AUC) ile gerçekleştirilmiştir. Hata matrisinde oluşturulan modellerin performansı, gerçek ve tahmin değerlerle oluşturulan 4 farklı kombinasyonlu tablodur (Şekil 2).

Hata matrisindeki pozitif (1) tahmin "dispersif zemin-D"; negatif (0) tahmin "dispersif olmayan zemin-ND" olarak tanımlanmaktadır. Hata matrisini yorumlamak için kullanılan parametrelerden olan Doğruluk (%), Duyarlılık (%), Özgünlük (%), Kesinlik (%) oranları ve  $F_1$  ölçüm değeri Denklem 1, 2, 3, 4 ve 5'de verilmektedir. GİP için dikkate alınan karakteristik parametreler Tablo 4'de verilmektedir.

**Tablo 1.** Tahmin modellerinde kullanılan veri seti

Referans	Metod	Min. – Maks. (%)						Örnek sayısı		Toplam
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	D	ND	
[29]*	İ.D.T	44.57-87.51	6.74-27.88	0.13-6.38	0-6.79	0-2.39	0.29-4.02	52	14	66
[30]	İ.D.T	8.65-15.63	16.8-17.57	0.1-0.21	1.24-1.64	8.03-13.56	0.06-0.19	2	–	2
[31]	İ.D.T	41.45	10.85	3.55	16.55	0.05	1.2	–	1	1
[32]	Z.D.T	76.26-87.67	6.41-13.27	0.18-0.85	0.37-3.55	1.35-2.05	1.67-2.72	12	–	12
[33]	A.G/G.T/Y.Y.T	69.43	16.37	1.46	1.58	2.16	4.23	1	–	1
[34]	Ç.H.T	55.19	14.98	1.28	1.16	2.44	1.14	1	–	1
[35]	A.G/G.T	46.29	38.38	0.59	0.61	0.15	0.51	–	1	1
[36]	A.G/G.T	35.11-44.43	7.6-9.94	3.3-4.48	16.51-21.09	0.68-4.53	1.55-2.17	16	–	16
[37]	G.T	43.12	46.07	0.027	0.03	0.01	0.01	–	1	1
[38]	D.T	47.7	37.6	0.01	0	0	2.67	–	1	1
[39]	G.T/K.A	61.25-64	10.86-11.68	2.09-2.34	1.58-5.8	0.55-3.9	0.39-0.51	1	1	2
[40]	İ.D.T	40.28-40.35	42.9-48.38	0.56-0.57	0.3-0.59	4.65-4.84	0.69-1.48	2	–	2
[41]	İ.D.T	46.58	41.66	0.08	0.03	4.3	0.46	1	–	1
[42]	İ.D.T	41.6	11.99	4.7	13.49	1.12	2.67	1	–	1
[43]	İ.D.T	39.71	9.01	4.54	17.22	1.66	1.83	1	–	1
[44]	İ.D.T	32.69-59.16	7.25-16.89	1.57-5.29	1.51-21.98	0.22-2.6	1.17-3.97	2	1	3
[45]	A.G	36.87-37.01	30.90-41.93	0.96-1.30	0.27-0.76	0.04-0.09	0.16-0.88	–	2	2
[46]	G.T	47.00-47.99	37.00-37.98	0.22-0.30	0.06-0.1	0.1-0.15	0.82-1.99	–	67	67
<b>Σ</b>								<b>92</b>	<b>89</b>	<b>181</b>

\* Tek bir örnekte dispersif tanımlama çifte hidrometre testinde yapılmıştır. İ.D.T: İğne Deliği Testi; Z.D.T: Zemin Dispersiyon Testi (A.G: Arazi Gözlemi; G.T: Geçmiş Tecrübe; Y.Y.T: Yapay Yağmur Testi), Ç.H.T: Çifte Hidrometre Testi D.T: Dağılma Testi, K.A: Boşluk sıvısının kimyasal analizi

**Tablo 2.** Bağımsız değişkenlerin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Ortalama	57.32	23.64	1.03	2.53	0.92	1.73
Standart Hata	1.18	0.93	0.09	0.42	0.11	0.06
Ortanca	47.92	18.16	0.51	0.29	0.43	1.73
Kip	70.95	14.47	0.68	0	0.85	2.66
Standart Sapma	15.84	12.54	1.26	5.65	1.46	0.76
Örnek varyans	251.06	157.27	1.59	31.87	2.13	0.58
Basıklık	-0.73	-1.70	3.18	4.24	34.03	0.47
Çarpıklık	0.15	0.18	1.97	2.43	4.81	0.35
Aralık	79.02	41.97	6.37	21.98	13.56	4.22
En Büyük	87.67	48.38	6.38	21.98	13.56	4.23
En küçük	8.65	6.41	0.01	0	0	0.01
Toplam	10374.13	4279.50	186.52	458.61	165.98	313.54

**Tablo 3.** Bağımsız değişken kombinasyon kümeleri

No.	Kombinasyon Kümesi	Kombinasyon tipi
1	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Majör oksit
2	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO	
3	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	
4	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O	
5	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> O	
6	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO	
7	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Na <sub>2</sub> O	
8	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, K <sub>2</sub> O	
9	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, Na <sub>2</sub> O	Majör-Minör oksit
10	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, K <sub>2</sub> O	
11	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	
12	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO, Na <sub>2</sub> O	
13	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO, K <sub>2</sub> O	
14	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	
15	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	
16	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	
17	MgO	
18	CaO	
19	Na <sub>2</sub> O	
20	K <sub>2</sub> O	
21	MgO, CaO	
22	MgO, Na <sub>2</sub> O	
23	MgO, K <sub>2</sub> O	
24	CaO, Na <sub>2</sub> O	Minör oksit
25	CaO, K <sub>2</sub> O	
26	Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	
27	MgO, CaO, Na <sub>2</sub> O	
28	MgO, CaO, K <sub>2</sub> O	
29	MgO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	
30	CaO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	
31	MgO, CaO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + DN + HP + HN} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + HN} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Özgünlük} = \frac{DN}{DN + HP} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + HP} \times 100 \quad (4)$$

$$F_1 = \frac{2 \times \text{Duyarlılık} \times \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \quad (5)$$

**Tablo 4.** GİP model karakteristikleri

Parametre no.	Parametre	Parametre karakteristiği
P <sub>1</sub>	Kromozom sayısı	30
P <sub>2</sub>	Genin baş uzunluğu	7-8
P <sub>3</sub>	Gen sayısı	3
P <sub>4</sub>	Bağlantı fonksiyonu	Toplama (+)
P <sub>5</sub>	Mutasyon oranı	0.00138
P <sub>6</sub>	Evirme oranı	0.00546
P <sub>7</sub>	Tek ve çift nokta rekombinasyon oranı	0.00277
P <sub>8</sub>	Gen rekombinasyon oranı	0.00277
P <sub>9</sub>	Gen yer değiştirme oranı	0.00277
P <sub>10</sub>	Gen başına sabit değer	10
P <sub>11</sub>	Gen başına sabit değer aralığı	-10 ~ +10

### 3 Bulgular ve tartışma

XRF analizlerinden elde edilen majör ve minör oksitler ile oluşturulan GİP modellerinde doğruluk (%) oranı esasında hem eğitim hem de test verileri için genelde başarılı tahmin modelleri oluşturulmuştur (Şekil 3).

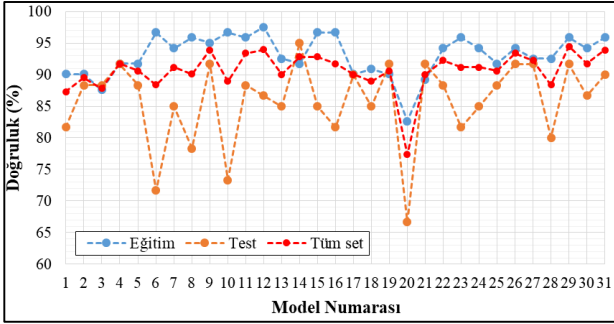
3 no.'lu (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO), 20 no.'lu (K<sub>2</sub>O) ve 21 no.'lu (MgO, CaO) kombinasyon kümesi dışında kalan tahmin modellerin eğitim verileriyle öğrenmeleri, % 90'nın üzerinde doğrulukla sonuçlanmıştır. Eğitim verilerinde en iyi öğrenme 12 no.'lu ( SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O) kombinasyon kümesiyle gerçekleşmiştir. Eğitim ve test sonuçlarının doğruluk (%) oranları birlikte değerlendirildiğinde majör-minör oksit kombinasyon tipinde en başarılı tahmin modeli 12 no.'lu (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O) kombinasyondur (% 93.929). Minor oksit kombinasyon tipinde ise en başarılı tahmin modeli 31 no.'lu ( MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) kombinasyondur (% 93.927). Bu tahmin modellerinin başarı oranları birbirine çok yakındır. 12 no.'lu kombinasyon kümesini oluşturan elementlerin katyonları, zeminlerin boşluk sıvısındaki SAR değerinin hesaplanarak dispersibilite sınıfının belirlenmesinde kullanılan katyonlardır. Bunun yanında 31 no.'lu kombinasyon kümesinde bulunan K<sub>2</sub>O, son yıllarda boşluk sıvısının kimyasal içeriğine göre dispersibilite

		GERÇEK DEĞERLER	
		Pozitif (1)	Negatif (0)
TAHMİN DEĞERLER	Pozitif (1)	DP	HP
	Negatif (0)	HN	DN

**Şekil 2.** Hata matrisi (D:Doğru, H:Hatalı, P:Pozitif, N:Negatif)

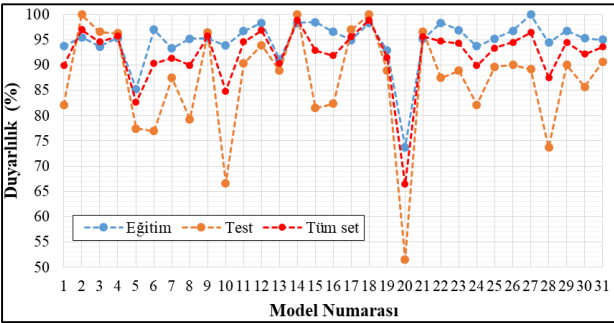


sınıflandırmalarında kullanılan  $K^+$  katyonunun önemini ortaya koymaktadır.



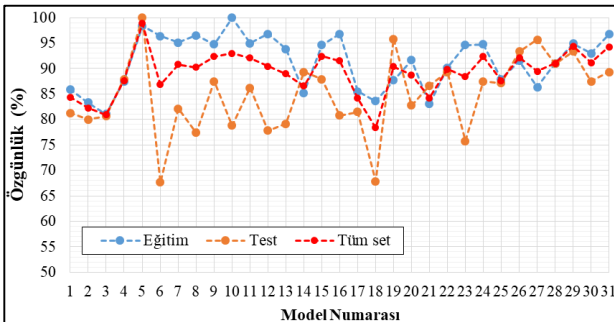
Şekil 3. Tahmin modellerinin doğruluk (%) esasında karşılaştırılması

Tahmin modellemelerinde duyarlılık (%) oranı, ilgili veri setindeki tüm pozitif sınıflardan ne kadar doğru tahmin ettiğini göstermesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bir diğer ifade ile tüm dispersif zeminlerin ne kadar doğrulukla tahmin edildiğini açıklamaktadır (Şekil 4). 14 no.'lu ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) ve 18 no.'lu ( $CaO$ ) kombinasyon kümeleri, eğitim ve test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde duyarlılık (%) oranı esasında en başarılı tahmin modelleri olarak ön plana çıkmaktadır (% 98.9). En başarısız tahmin modeli ise 20 no.'lu ( $K_2O$ ) kombinasyon kümesidir.



Şekil 4. Tahmin modellerinin duyarlılık (%) esasında karşılaştırılması

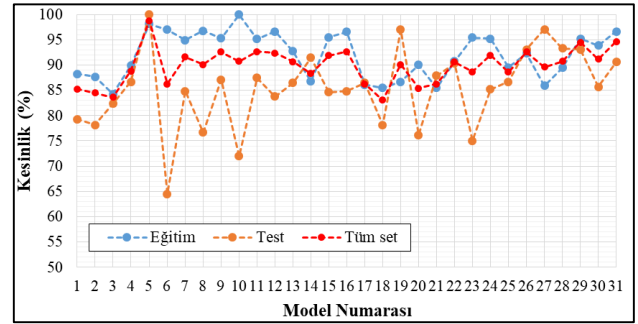
Tüm negatif sınıflardan yani dispersif olmayan zeminlerden ne kadarının doğrulukla tahmin edildiğini gösteren özgünlük (%) oranı değeri ise Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 5. Tahmin modellerinin özgünlük (%) esasında karşılaştırılması

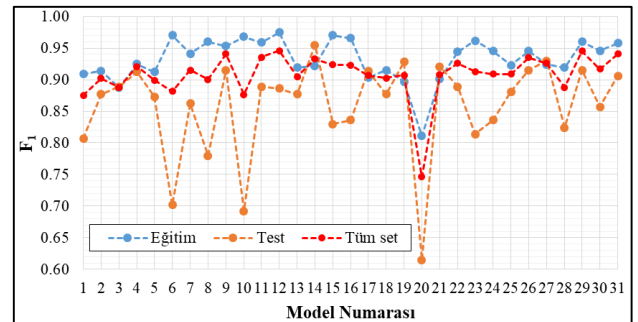
Eğitim ve test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde en başarılı tahmin modeli 5 no.'lu ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ) kombinasyon kümesidir (% 98.9). Duyarlılık (%) oranı esasında en başarılı tahmin modellerinden olan 18 no.'lu kombinasyon kümesi ise en başarısız tahmin modelidir.

Tüm sınıflardan ne kadar doğru tahmin ettiğimizi belirten yani ilgili veri setinin tümü için dispersif zeminleri ne kadar doğru tahmin ettiğimizi gösteren kesinlik (%) oranı ise Şekil 6'da verilmektedir. 5 no.'lu kombinasyon kümesi özgünlük (%) oranında olduğu gibi eğitim ve test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde kesinlik (%) oranında da en başarılı tahmin modeli olarak bulunmaktadır (% 98.7).



Şekil 6. Tahmin modellerinin kesinlik (%) esasında karşılaştırılması

Düşük duyarlılık (%) ve yüksek kesinlik (%) oranlarında veya tam tersi durumlarda modelin başarısının ölçülmesinde zorluk çıkabilir. Bu durumda her iki oranının harmonik ortalamasını alarak değerlendirmeyi kolaylaştıran  $F_1$  ölçüm değerleri çalışmada dikkate alınan tahmin modelleri için Şekil 7'de verilmektedir. Eğitim ve test sonuçlarına göre doğruluk (%) oranına göre major-minör oksit kombinasyon tipinde en başarılı tahmin modeli olan 12 no.'lu kombinasyon kümesi,  $F_1$  ölçüm değerine göre de en başarılı tahmin modeli olarak görülmektedir ( $F_1=0.946$ ).



Şekil 7. Tahmin modellerinin kesinlik (%) esasında karşılaştırılması

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada; ince daneli zeminlerin XRF analiz sonuçlarından elde edilen major ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ) ve minör oksitler ( $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) bağımsız değişkenler olarak dikkate alınıp bağımlı değişken olan dispersibilite sınıfları GİP ile oluşturulan modeller yardımıyla tahmin edilmiştir.

Veri setindeki ince daneli zeminlerin farklı dane çapı dağılımlarına sahip olmasına rağmen, 6 farklı oksitten oluşan 31 farklı kombinasyon kümesinin girdi verisi olarak tanımlandığı modellerin genel olarak tahmin başarı oranları yüksektir. Özellikle veri setindeki major ve minör oksitlerle oluşturulan modellerin GA esasında öğrenme başarıları ise oldukça yüksektir. Eğitim ve test sonuçları birlikte dikkate alındığında en başarılı tahmin modeli  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , oksitlerinden oluşan girdi verisiyle geliştirilen tahmin modelidir (Doğruluk oranı: % 93.929). Bu durum da göstermektedir ki; ince daneli zeminlerde dispersiyon mekanizması majör elementlerin (Al,Si) yer aldığı kil mineralinden bağımsız değildir. En genel sonuç olarak ise; bu çalışma ile ince daneli zeminlerin XRF analiz sonuçlarıyla dispersibilite sınıflarının genetik algoritmalar esasında çalışan GP ile oluşturulan modeller yardımıyla başarılı bir şekilde tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Bu tür bilgisayar modelleriyle ince daneli zeminlerin dispersibilite özelliklerinin tanımlanabilmesi için fiziksel ve kimyasal tanımlama deneyleri ile birlikte XRF analizlerinin de yapılması önerilmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %6

#### Kaynaklar

- [1] H.E. Middleton, 1930, The properties of soils which influence erosion, Tech. Bull, U.S. Dept. Agri., 178: 1-16,1930.
- [2] G.M. Volk, Method of determination of degree of dispersion of the clay fraction of soils, Proceedings Soil Science Society of America, 2, 561-567,1937.
- [3] A. Maharaj and P. Paige-Green, P., The SCS double hydrometer test in dispersive soil identification, In The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2-6, France, 2013.
- [4] R.S. Decker and L.P. Dunnigan, L.P., Development and use of the Soil Conservation Service Dispersion Test, J. Sherard, R. Decker (Eds), In STP623-EB Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, West Conshohocken, PA: ASTM International, 94-109, 1977.
- [5] G.D. Aitchison, O.G. Ingles and C.C. Wood C.C, Post-construction deflocculation as a contributory factor in the failure of earth dams, In: Fourth Australia-New Zealand conference on soil mechanics and foundation engineering, Australia, 275-279, 1963,
- [6] F.A. Gerber, and V.M. Harmse, Proposed procedure for identification of dispersive soils by chemical testing, Civil Engineer in South Africa, 29(10), 397-399, 1987.
- [7] P. Paige-Green, Dispersive and erodible soils – Fundamental differences, SAIEG/ SAICE Problem Soils Conference, 59-67, Midrand, November 2008.
- [8] W.W. Emerson, A Classification of soil aggregates based on their coherence in water, Australian Journal of Soil Research 5, 47-57, 1967.
- [9] J.L. Sherard, E.F. Steele, R.S. Decker and L.P. Dunnigan, Pinhole test for identifying dispersive soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102(1), 69-85, 1976.
- [10] J.L. Sherard, L.P. Dunnigan and R.S. Decker, Identification and nature of dispersive soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102, No. GT4, 298-312. 1976.
- [11] H. Savaş, 2008, Development on pinhole test adopted to identify the dispersive clays used for earthfill dams and a comparative study, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Eskişehir Osmangazi University, Turkey (In Turkish).
- [12] I. Zorluer, Y. Icaga, S. Yurtcu and H. Tosun, Application of a fuzzy rule-based method for the determination of clay dispersibility, Geoderma, 160(2), 189-196, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.017>.
- [13] P. Rengasamy and A. Marchuk, A., 2011, Cation ratio of soil structural stability (CROSS), Soil Research, 49(3), 280-285, 2011.
- [14] P. Rengasamy, P.E. Tavakkoli and G.K. McDonald, Exchangeable cations and clay dispersion: net dispersive charge, a new concept for dispersive soil, European Journal of Soil science, 67(5), 659-665. 2016. <https://doi.org/10.1111/ejss.12369>.
- [15] A. Turgut, N.S. Isik and K.E. Kasapoglu, Investigation of factors affecting the dispersibility of clays and estimation of dispersivity, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76(3), 1051-1073, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0935-x>.
- [16] A.A.R. Heshmati, H. Salehzade, A.H. Alavi, A.H. Gandomi, A. Badkobe and A. Ghasemi, A., On the applicability of linear genetic programming for the formulation of soil classification, American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci, 45, 575-583. 2008.
- [17] S.K. Das, P.K. Muduli, Evaluation of liquefaction potential of soil using genetic programming, In Proceedings of the Golden Jubilee Indian Geotechnical Conference, Kochi, India, 827- 830, 2011.
- [18] G.D. Öget, Estimating Swelling Characteristics of Clays Using Methylene Blue Test -A Machine Learning Approach, The Degree of Master of Science, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, 2014.
- [19] E. Çöleri, Relationship Between Resilient Modulus and Soil Index Properties of Unbound Materials, The Degree of Master of Science, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, 2007.
- [20] L. Scrucca, GA: A package for genetic algorithms in R, Journal of Statistical Software, 53(1), 1-37, 2013. <https://doi.org/10.18637/jss.v053.i04>.
- [21] J.R. Koza, Genetic Programming, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.
- [22] A. Pourzangbar, Determination of the most effective parameters on scour depth at seawalls using genetic programming (GP). In The 10th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMASS 2012), Tehran, Iran, 9p, November 2012.

- [23] C. Ferreira, Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems, *Complex Systems*, 13, 87-129, 2001. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0102027>.
- [24] P. Brouwer, *Theory of XRF*, PANalytical BV, Almelo, Netherlands, 2006.
- [25] H. Tosun, İ. Zorluer, H. Tozluk, ve H. Savaş, *Toprak Dolgu Barajlarda Dispersif Killerin Kullanımı ve Tasarım ve Kontrol Kriterlerinin Araştırılması*, TÜBİTAK, İNTAG-719, 2001.
- [26] R. Fell, *Geotechnical Engineering of Dams*, CRC press, Boca Raton, 2005.
- [27] J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of Soil Behavior (Vol. 3)*, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [28] P. S. Nayak and B. K. Singh, Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR, *Bulletin of Materials Science*, 30(3), 235-238, 2007. <https://doi.org/10.1007/s12034-007-0042-5>.
- [29] F. G. Bell and D. J. H. Walker, A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 33(3), 187-199, 2000. <https://doi.org/10.1144/qjegh.33.3.187>.
- [30] S. Alam, B.K. Das and S. K. Das, Dispersion and sedimentation characteristics of red mud, *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(4), 04018025(1-10), 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000420](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000420).
- [31] M. Belen ve E. Pınarcı, Atatürk Barajı kil çekirdeğinde kullanılan malzemenin dispersivite özelliğinin araştırılması, MÜHJEO'2017: Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, sayfa 277-284, Adana, Türkiye, 12-14 Ekim 2017.
- [32] M. Y. Evans, *The Geology, sedimentology, geochronology and palaeo-environmental reconstruction of the Heelbo Hillslope deposit, free state province, South Africa*, Ph.D Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 2015.
- [33] S. Matsumoto, S. Ogata, H. Shimada, T. Sasaoka, A. Hamanaka and G.J. Kusuma, Effects of pH-induced changes in soil physical characteristics on the development of soil water erosion, *Geosciences*, 8(4), 134(1-13), 2018. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040134>.
- [34] S. Mohanty, N. Roy, S.P. Singh and P. Sihag, Effect of industrial by-products on the strength of stabilized dispersive soil, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), 405-417, 2021. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1654281>.
- [35] W. E. Worrall, *Clays and ceramic raw materials*, Elsevier Applied Science, New York, 1986.
- [36] S. Nasseh, G.R. Lashkaripour and M. Ghafoori, Evaluation of Mineralogical Characteristics and Erosion of Tous Historic Mud Wall, Ne of Iran, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(5), 919-925, 2011.
- [37] A. K. Panda, B.G. Mishra, D.K. Mishra, and R.K. Singh, Effect of sulphuric acid treatment on the physico-chemical characteristics of kaolin clay. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 363(1-3), 98-104, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.022>.
- [38] N.S. Phillips, Disaggregation of soil during slurry pipe jacking, Ph.D Thesis, University of London, London, U. Kingdom, 2015.
- [39] P.T Shourijeh, A. Soroush and A.H. Daneshi-Sadr, The effects of lime, bentonite and nano-clay on erosion characteristics of clay soils, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(9), 3762-3787, 2022. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1818629>.
- [40] A.H. Vakili, M.R. bin Selamat, H.B.A Aziz, A. Mojiri, Z. Ahmad and M. Safarzadeh, Treatment of dispersive clay soil by ZELIAC, *Geoderma*, 285, 270-279, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.009>.
- [41] A. H. Vakili, M. Kaedi, M. Mokhberi, M.R. bin Selamat and M. Salimi, Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application, *Applied Clay Science*, 152, 1-8, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.039>.
- [42] A.H. Vakili, J. Ghasemi, M.R. bin Selamat, M. Salimi and M.S. Farhadi, Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber, *Construction and Building Materials*, 193, 405-415, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.213>.
- [43] A. H. Vakili, S.I. Shojaei, M. Salimi, M.R. bin Selamat and M.S. Farhadi, Contact erosional behaviour of foundation of pavement embankment constructed with nanosilica-treated dispersive soils, *Soils and Foundations*, 60(1), 167-178, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.001>.
- [44] S. Topçu, İnce Daneli Zeminlerin Farklı Gerilme Koşullarında İçsel Erozyon Davranışının Mukayeseli Analizi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [45] G. Sankar, K.V. Ajay, S.L. Kuriakose, P.R. Prasobh, C. Deepa and K. Eldhose, Studies on soil piping in the highlands and foot hills of Kerala to avoid the disaster, Final Report NCESS-PR-01-2020, January 2020.
- [46] A.J. Bloodworth, D.E. Highley and C.J. Mitchell, *Industrial minerals laboratory manual: Kaolin*, British Geological Survey, Technical Report WG/93/1, 1993.

