



Zemin Özelliklerinin Belirlenmesinde Yeni Trendler

Asena Karslıoğlu^{1*}, Ahmet Ali Mert², Mehmet İnanç Onur³

^{1*}Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Eskişehir, Türkiye, (ORCID:0000-0001-5178-4069), asenakarslioglu@eskisehir.edu.tr

²Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Eskişehir, Türkiye, (ORCID:0000-0001-9205-488X), ahmetalimert@utexas.edu

³Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Eskişehir, Türkiye, (ORCID:0000-0002-2421-4471), mionur@eskisehir.edu.tr

(1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2021, November 1-3, 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.1012397)

ATIF/REFERENCE: Karslıoğlu, A., Mert, A. A. & Onur, M.İ (2021). Zemin Özelliklerinin Belirlenmesinde Yeni Trendler. *European Journal of Science and Technology*, (28), 998-1007.

Öz

Zemin özelliklerinin belirlenmesi ve zemin davranışının açıklanması geoteknik mühendisliğinin temellerini oluşturmaktadır. Zemin davranışına ilişkin teoriler 1900'li yıllarda geliştirilmeye başlanmış, günümüzde ise yeni nesil yöntemler ile yeni bir aşamaya geçilmiştir. Yeni nesil nümerik metotlar ile en karmaşık koşullar altında zemin davranışı modellenilebilmektedir. Zemin özelliklerinin belirlenmesi ve zemin davranışının açıklanması genel olarak deneysel çalışmalar ile bu çalışmalardan elde edilen verilen ampirik teorilerde kullanılması olarak yürümekteyken, günümüzde yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi uzman sistemler ile mevcut deneysel ekipmanların modifikasyonu ve geleneksel deney metodolojilerinin geliştirilmesi sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada geoteknik mühendisliğinde zemin özelliklerinin belirlenmesi ve zemin davranışının açıklanmasına yönelik yeni nesil yöntemlerin tanıtılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin Mekaniği, Geoteknik mühendisliği, Yeni Trendler.

New Trends in Determining Soil Properties

Abstract

Determination of soil properties and explanation of soil behavior are the basis of geotechnical engineering. Theories on soil behavior are developed from the 1900s, and today, a new phase has been started with new generation methods. Soil behavior can be modeled under the most complex conditions with the new generation numerical methods. While the determination of soil properties and the explanation of soil behavior are generally used in experimental studies and empirical theories obtained from these studies, nowadays, expert systems such as artificial neural networks, fuzzy logic, modification of existing experimental equipment and development of traditional experimental methodologies are frequently used. In this study, it is aimed to introduce new generation methods for determining soil properties and explaining soil behavior in geotechnical engineering.

Keywords: Soil mechanics, Geotechnical engineering, New Trends.

* Corresponding Author: asenakarslioglu@eskisehir.edu.tr

1. Giriş

Zemin mekaniği ilkelerinin çeşitli yapılar için temellerin tasarımı ve inşasına uygulanması, temel mühendisliği olarak bilinmektedir. Geoteknik mühendisliğinin hem zemin mekaniğini hem de temel mühendisliğini içerdiği düşünülebilir. Aslında Terzhaği'ye göre zemin mekaniği ve temel mühendisliği arasında belirgin bir sınır çizgisi çizmek zordur; geoteknik mühendisliği, temel mühendisliğinin bittiği yerde başlar [1].

Geoteknik mühendisliğinde zemin davranışını modelleyen teoriler 1900'lü yıllarda geliştirilmeye başlanmış, günümüzde teorik zemin mekaniği ve temel mühendisliği yeterli olgunluğa ulaşmıştır. Zemin davranışını modelleyen nümerik metotlar ile en karmaşık yapı geometrisi ve zemin koşullarında yapı-zemin ilişkisini analiz edebilecek seviyeye ulaşılmıştır. Gerek teorik yaklaşımları gerekse nümerik metotları uygulayabilmek için en önemli aşama zeminin doğru modellenmesi, diğer bir deyişle zemin davranışını yansıtacak geoteknik parametrelerin gerçekçi olarak belirlenebilmesidir [2].

Geoteknik mühendisliği deneysel çalışmalar, teoriler ve uygulamalar olarak yürümekteyken, artık günümüzde yeni nesil metotların oluşmasıyla yeni bir sayfaya geçmiştir. Bu çalışmada kısaca bu yeni nesil yöntemlerin tanıtılması ve tartışılması amaçlanmıştır.

2. Literatür

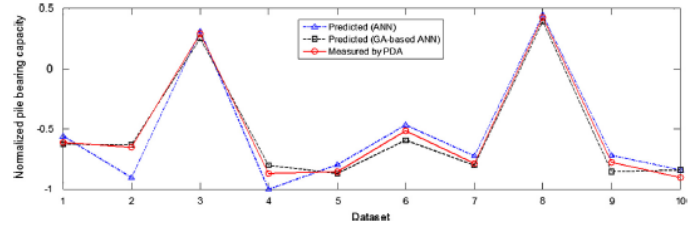
2.1. Uzman Sistemler Kullanarak Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Son yıllarda, zemin özelliklerinin tahmini ve zemin davranışının modellenmesi için makine öğrenmesi veya yapay zekâ yöntemleri yaygın olarak uygulanmaktadır. Uzman sistemler kullanarak yapılan çalışmalar bu bölümde incelenmektedir.

Yapay Sinir Ağlarının (YSA) inşaat mühendisliğinde geoteknik dâhil uygulamaları artmıştır. Işık ve Özden (2013) hem kaba hem de ince taneli zeminlerin sıkıştırma parametrelerini tahmin etmek için YSA tahmin modellerini kullanmıştır. Standart Proctor enerjisinde toplam 200 zemin karışımı hazırlanıp sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma parametreleri, farklı girdi veri setleri kullanılarak YSA modelleri aracılığıyla tahmin edilmiştir. YSA tahmin modelleri, indeks özelliklerinden hangilerinin sıkıştırma parametreleriyle iyi ilişkili olduğunu bulmak için geliştirilmiştir. Geçiş ince içerik oranı (TFR), zemin indeksi parametrelerine ek olarak yeni bir girdi parametresi olarak tanımlanmıştır. Optimum su içeriği (Wopt) ve maksimum kuru birim ağırlık tahmininin, temel zemin indeksi parametreleri kullanılarak yüksek doğrulukla yapılabileceği gösterilmiştir. Bununla birlikte, istenen tahmin doğruluğu ve genelleme yeteneği, verilerin uygun şekilde normalleştirilmesi ve bölünmesiyle elde edilebilmektedir. TFR parametresinin kullanılması YSA modellerinin Wopt tahminindeki performansını artırmaktadır [3].

Momeni vd. (2014) kazıkların taşıma kapasitesini tahmin etmek için genetik algoritma (GA) optimizasyon tekniği ile geliştirilmiş YSA tabanlı bir tahmin modeli geliştirmiştir. Modelin oluşturulması için gerekli veri setini sağlamak amacıyla prekast beton kazıklarda 50 dinamik yük testi yapılmıştır. Kazık geometrik özellikleri, kazık seti, çekiç ağırlığı ve düşme yüksekliği ağ girdileri olarak ayarlanmış ve kazık nihai taşıma kapasitesi, GA tabanlı YSA modelinin çıktısı olarak ayarlanmıştır. Sonuçta, GA tabanlı YSA modelinin kazık taşıma kapasitesinin

tahmin edilmesinde geleneksel YSA modelinden daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur [4].

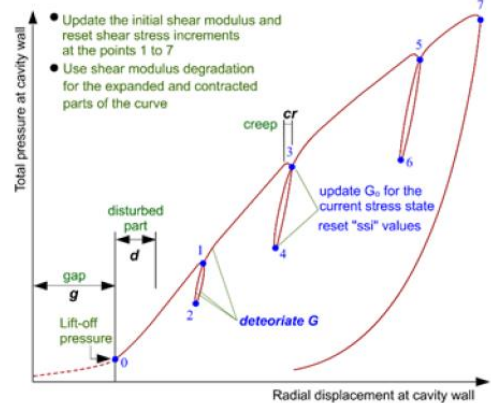


Şekil 1. Kazık taşıma kapasitesinin GA tabanlı YSA ve YSA tahmin modellerinin performansı [4]

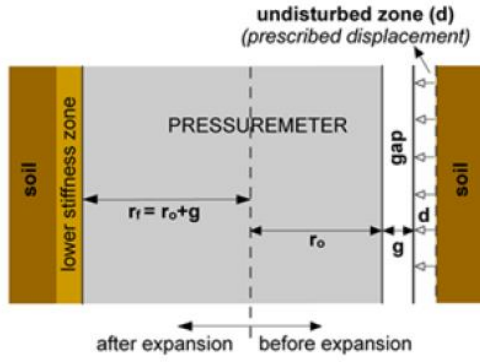
Diaz vd. (2018) bir temelin altındaki eğimli ana kaya tarafından sınırlandırılan sonlu bir elastik yarı alanın etkisini dikkate alan etki faktörünün (Ia) belirlenmesini iyileştirmek için sinir ağlarını kullanmaktadır. YSA'nın eğimli bir rijit tabaka ile sonlu bir yarı uzayda oturan temellerin oturmasını doğru bir şekilde tahmin edebildiği doğrulanmıştır. Ayrıca YSA yönteminin geleneksel analitik regresyon yöntemlerinden daha iyi sonuçlar sağlayabileceğini de ortaya koymuştur [5].

Tran vd. (2018) zemin karakterizasyonlarındaki varyasyonları gerçekleştirmek için önerilen bir prosedür geliştirmiştir. Sabit zemin özellikleri ve profili kullanmak yerine, girdi verileri olarak sönümlenme (MRD) eğrilerinin belirsizliklerini, katman kalınlığını ve kayma dalgası hızını (Vs) kullanmaktadır. Yapılan analizlerin sonuçları, doğrusal olmayan zemin özelliklerindeki değişikliklerin medyan yüzey tepki spektrumu ve yüzey hareketlerinin büyütme spektrumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir [6].

Öztoprak vd. (2018) üç boyutlu sonlu farklar kodu FLAC3D'de benimsenen sertliğe dayalı bir yaklaşım aracılığıyla presiyometre testinin tam eğrisini yakalamak için sayısal bir metodoloji önermektedir. Bunu sağlamak için, Mohr-Coulomb zemin modelinin pik dayanımından önce geleneksel doğrusal elastik modelin yerini almak üzere yeni bir hiperbolik model kullanılmış ve kayma modülünün güncellenmesi düşünülmüştür. Sunulan modelleme yaklaşımı ve uygulanan kurucu model etkileyici bir şekilde başarılıdır. Kumları karakterize etmek için tüm parametrelerin elde edilmesini sağlar ve geoteknik yapıların çoğunu modellemek için umut verici görünmektedir. Önerilen yaklaşımı uygulamak için en az iki döngü gereklidir. Daha fazla döngü, daha iyi zemin karakterizasyonu belirlemektedir [7].



(a) FLAC3D'de modelleme adımlarının sunumu

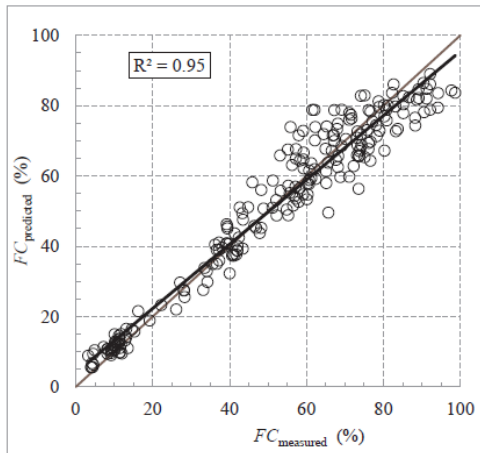


(b) Parametrelerin tanımlanması

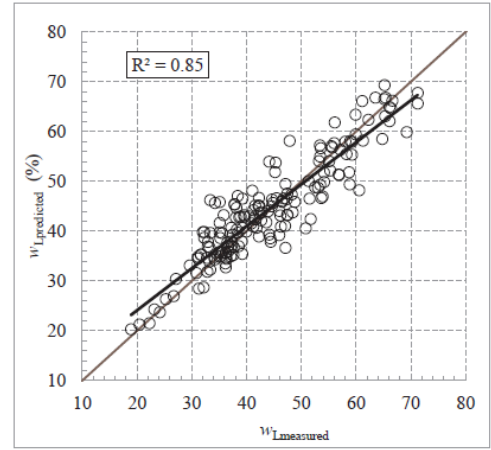
Şekil 2. Presiyometre testinin modellenmesi [7]

Zeminin kayma mukavemeti, geoteknik yapıların tasarım ve denetiminde kullanılan önemli bir mühendislik parametresidir. Pham vd. (2018) dört makine öğrenme yönteminin performansını araştırmayı ve karşılaştırmayı amaçlamıştır. Parçacık Sürüşü Optimizasyonu - Uyarlanabilir Ağ tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (PANFIS), Genetik Algoritma - Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (GANFIS), Destek Vektör Regresyonu (SVR) ve YSA yumuşak zeminlerin kayma dayanımını tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu amaçla, modellerin oluşturulması ve doğrulanması için eğitim ve test veri setlerinin oluşturulması için 188 plastik killi zemin örneği kullanılmıştır. Dört modelden PANFIS'in yumuşak zeminlerin mukavemetini tahmin etmek için en uygun bir teknik gösterdiği sonucuna varılabilir [8].

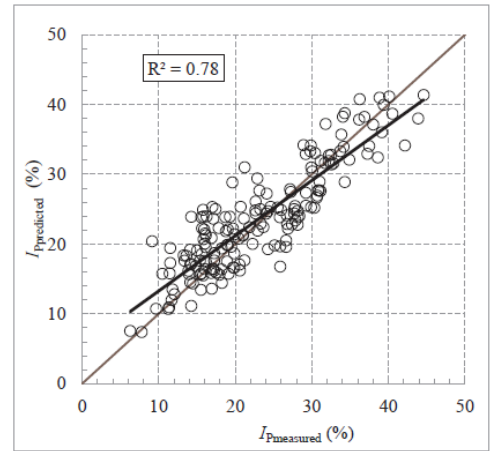
Zemin sınıflandırması, yük altında benzer mühendislik davranışı sergileyecek ortak özelliklere göre zeminleri kategorilere ayırmanın bir yoludur. Ayrıca, temel tasarımından önce gerçekleştirilmesi gereken önemli, maliyetli ve zaman alıcı bir süreçtir. Reale vd. (2018), ESCS (Avrupa Zemin Sınıflandırma Sistemi) ve USCS (Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi) zemin sınıflandırmalarını otomatik olarak belirlemek için YSA uygulamasını incelemektedir. YSA, zemindeki ince parçacıkların yüzdesini ve LL ile ona karşılık gelen plastisite indeksini tahmin ederek zeminin kıvamını belirlemek için geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, hem ESCS hem de USCS zeminlerin yaklaşık % 90'ını doğru bir şekilde sınıflandırmıştır. YSA kullanımı hem zamandan hem de paradan tasarruf edilerek inşaat sürecini kolaylaştırmaktadır [9].



(a) İncelik Yüzdesi



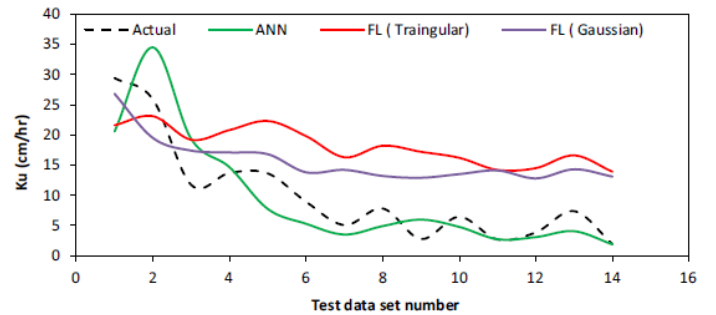
(b) Likit Limit



(c) Plastisite İndeksi

Şekil 3. YSA ve laboratuvarında ölçümler [9]

Sihag (2018) zeminin (Ku) doymamış hidrolik iletkenliğini tahmin etmek için bulanık mantık (FL) ve YSA tabanlı modeller geliştirmiştir. Rastgele seçilen modellemede eğitim için verilerin %70'i, test için verilerin %30'u kullanılmıştır. Çalışmadan, her iki yaklaşımın da bu veri setiyle iyi çalıştığı sonucuna varılmıştır. Performans değerlendirme parametrelerinin karşılaştırılmasından YSA yaklaşımının FL yaklaşımlarına göre iyi çalıştığı görülmüştür [10].

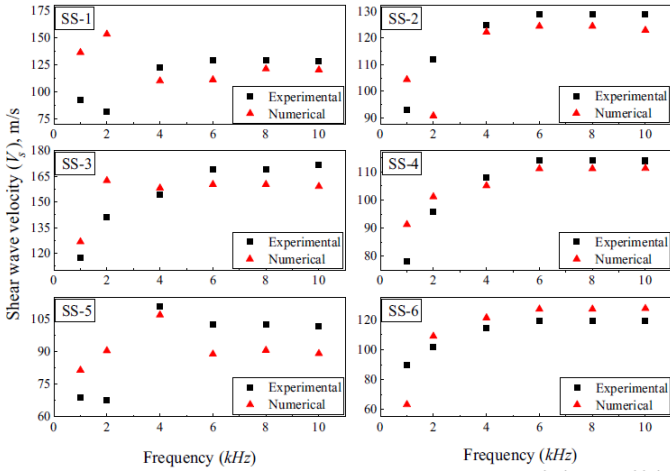


Şekil 4. Ku'nun gerçek değerlerine kıyasla farklı yaklaşımlar kullanarak Ku değerlerinde değişim [10]

Azadmard vd. (2020) neredeyse doymuş zemin hidrolik özelliklerinin tahmini için çoklu doğrusal regresyon (MLR) ve hibrit GA yönteminin YSA ile etkinliğini karşılaştırmak için bir çalışma yapmıştır. MLR analizinin sonuçları, bu yöntemin çalışma alanında neredeyse doymuş zemin hidrolik özelliklerini tahmin etme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. MLR

modellerine kıyasla GA-YSA modellerinin daha yüksek performansı, zeminin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile hidrolik özellikler arasında doğrusal olmayan ilişkilerin varlığını doğrulamıştır [11].

Literatürde, Bender elemanı (BE) test simülasyonunun sayısal analizine daha az odaklanılmıştır. Ingale vd. (2020) yaptığı çalışmada sayısal simülasyondan ve deneylerden elde edilen sonuçların analiz edilmesi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaçla, USCS'ye göre altı farklı sınıflandırılmış zemin numuneleri seçilmiş ve farklı sıkıştırma durumlarına göre kalıplanmıştır. BE testleri sonucunda kayma dalgası hızı (V_s) deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemine (FEM) dayalı sayısal bir kod AbaqusTM yardımı ile sayısal simülasyon yapılmıştır. Bu araştırmadaki FE analizinin amacı, numune geometrisinin, sınır koşullarının ve giriş frekansının laboratuvar BE sonuçlarına kıyasla farklı malzeme modelleri üzerindeki etkisini araştırarak doğru bir yaklaşıma ulaşmaktır. FE analizi, belirli bir frekansın ötesinde deneysel olarak elde edilenle makul ölçüde aynı S-dalgası hızlarını vermektedir. Dolayısıyla, FE modelinin BE testini yeniden üretebildiği söylenebilmektedir [12].

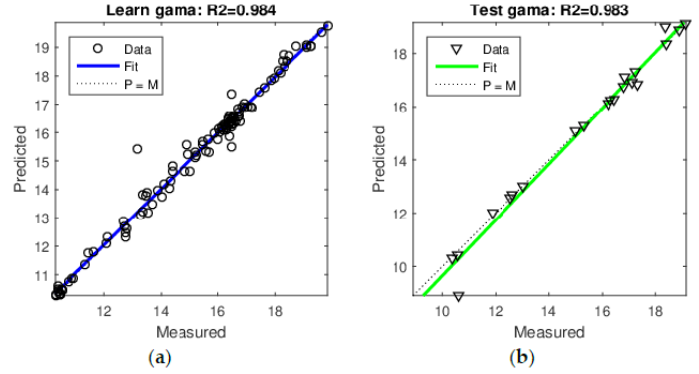


Şekil 5. Farklı zemin örnekleri için giriş frekansı ile kayma dalgası hızındaki değişimi [12]

Adab vd. (2020) yaptıkları çalışmada, pratikte farklı arazi kullanımına göre yüzeye yakın (5 cm) zemin nemini tahmin etmek için dört farklı hızlı doğrusal olmayan veri odaklı model oluşturmuştur. Landsat 8'in optik ve termal sensörleri tarafından zemin nemi geri kazanımı için rastgele orman (RF), destek vektör makinesi (SVM), YSA ve elastik ağ regresyon (EN) algoritmaları uygulanmıştır. İstatistiksel karşılaştırmalar, RF yönteminin, farklı arazi kullanım türleri tarafından kapsanan zemin nemini ölçmek için en yüksek Nash-Sutcliffe verimlilik değerini (0.73) sağladığını göstermektedir. Modellemelerden elde edilen sonuçlar, saha verilerinden elde edilen ölçümlerle karşılaştırılmış ve RF modelinin, zemin nem tahmini için diğer üç yöntemden daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [13].

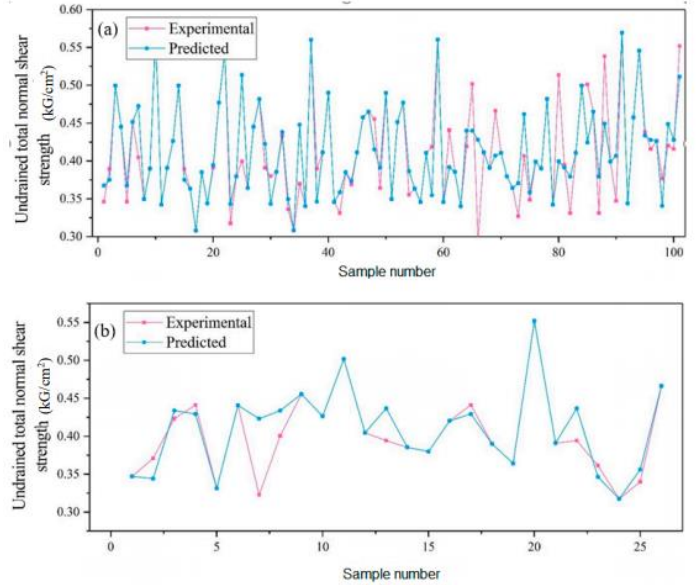
Zeminin birim ağırlığının (BA) tahmini laboratuvar yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Özellikle BA'nın organik zeminlerde elde edilmesi son derece zor, zaman alıcı ve pahalı olan, örselenmemiş yapılara sahip numuneler şeklinde yüksek kaliteli araştırma malzemesi gerektirmektedir. Straz ve Borowiec (2020) makalede, organik zeminlerin birim ağırlığını tahmin etmek için YSA kullanmayı önermiştir. Alt zeminin ilk tanınması mekanik bir koni penetrasyon testi (CPTM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Standart çok katmanlı geri yayılım ağları, iki

ana değişkene (organik içerik LOIT ve doğal su içeriği w) dayalı olarak BA tahmin etmek için kullanılmıştır. Uygulanan modelin, standart regresyon yöntemleriyle karşılaştırılabilir güvenilir tahmin sonuçları sağladığı belirtilmiştir [14].



Şekil 6. Zemin BA'nın YSA tahmini (LOIT, w): (a) eğitim verileri ve (b) test verileri [14]

Pham vd. (2020) zeminin drenajsız kesme dayanımını tahmin etmek için rastgele orman (RF) ve parçacık sürü optimizasyon (PSO) modellerinin bir kombinasyonu olan yeni bir hibrit makine öğrenmesi olan RF-PSO modelini önermiştir. Bu model zeminin kil içeriğine, nem içeriğine, özgül ağırlığa, boşluk oranına, likit limite ve plastik limite dayalı olarak zeminin kesme dayanımını tahmin etmek için kullanılmıştır. Önerilen hibrit modelin (RF-PSO) zeminin kesme dayanımını tahmininde yüksek bir doğruluk performansı ($R = 0.89$) elde ettiği bulunmuştur [15].



Şekil 7. Deneysel ve tahmin edilen kesme dayanımı değerleri: (a) eğitim seti, (b) test seti [15]

2.2. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesinde Yeni Nesil Deneysel Sistemlerinin Kullanılması

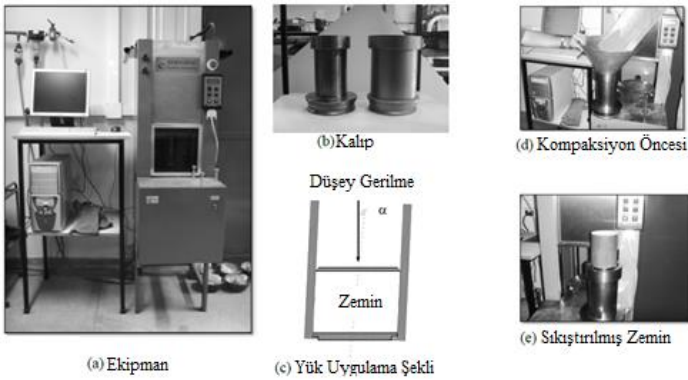
Zemin özelliklerinin ve zemin davranışının belirlenmesi için geçmişten beri çeşitli deney aletleri tasarlanarak kullanılmıştır. Geleneksel deney aletlerinin çeşitli modifikasyonlarla geliştirilerek kullanımı veya yeni üretilen deney sistemleri bu bölümde incelenmektedir.

Kayabalı vd. (2016) likit limit (LL) ve plastik limit (PL) değerlerini tek bir cihazda birleştirmek için, Çamur Baskı Yöntemi (Mud Press Method = MPM) adı verilen ekipman geliştirmiştir. MPM'den elde edilen bulguları doğrulamak için geleneksel yöntemler kullanılmıştır. Toplamda LL = 28 - 166 arasında değişen 275 zemin örneği hazırlanıp incelenmiştir. MPM yönteminden elde edilen log(a) ve 1/b parametreleri, geleneksel yöntemlerin sonuçlarıyla ilişkilendirilmiştir. Yeni yaklaşımın, 1 saat gibi kısa sürede gereken verilerin elde edilmesi ve operatör bağımlılığını en aza indirmesi gibi çeşitli açılardan geleneksel yöntemlerden üstün olduğu belirtilmiştir [16].



Şekil 8. Çamur Baskı Makinesi (Mud Press Machine) [16]

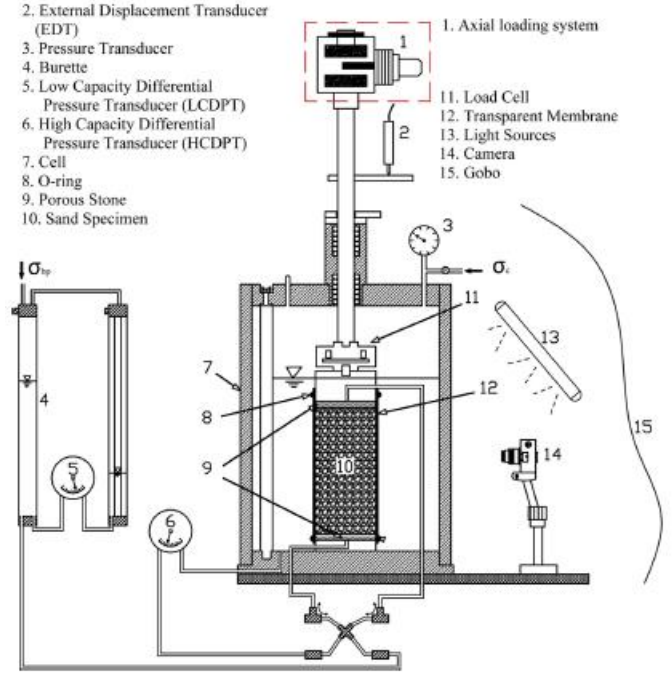
Superpave yağurmalı sıkıştırıcı (SGS), diğer sıkıştırma yöntemlerine göre daha etkili, doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar göstermektedir. Bazı araştırmacılar, SGS'nin saha koşullarına daha benzer olduğunu öne sürmüştür. Dantas vd. (2016) maksimum kuru yoğunluklar karşılaştırılarak Proctor ve SGS yöntemi arasında bir benzerliğe ulaşmaya çalışmıştır. Killi zemin, Brezilya standardına (NBR 7182/1986) göre üç farklı enerjide Proctor testine tabi tutulmuştur. SGS ekipmanı aynı zamanda zemini sıkıştırmak için de kullanılabilir. Ayrıca, SGS'deki prosedür umut vericidir, çünkü optimum parametreler normal ve orta Proctor enerjisine eşdeğer veya daha üstündür [17].



Şekil 9. Superpave yağurmalı sıkıştırıcıda sıkıştırma şeması [17]

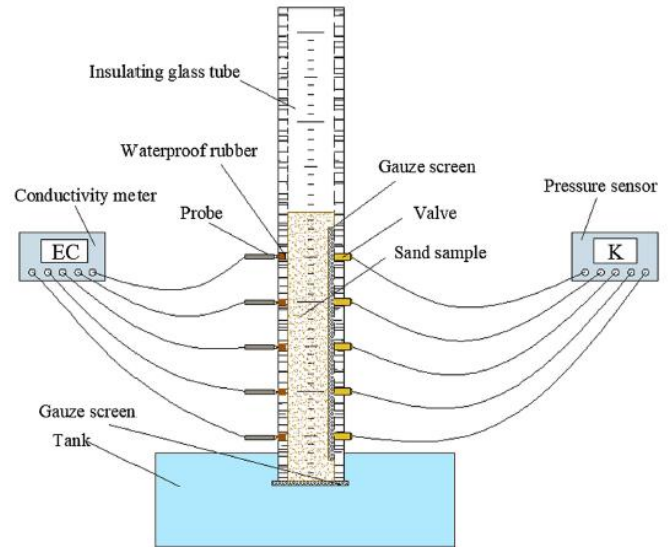
Zhao vd. (2018) beyaz ve siyah renklerde silis kumu partiküllerinin bir karışımı ile hazırlanan numunelerin yerel deformasyon özelliklerini doğrudan ve dolaylı drenajsız üç eksenli testte değerlendirmek için, şeffaf bir membran kullanılarak Partikül Görüntü Velosimetrisine dayalı bir prosedür geliştirilmiştir. Doğrudan ve dolaylı arasındaki karşılaştırma, bitişik kum parçacığına göre membran üzerindeki bir noktanın konumunun sıvılaşmanın başlamasından sonra sabit kalmadığını ortaya koymuştur. Dikey kaymanın değeri, aşırı gözenek suyu

basıncı, özellikle büyük bir eksenel gerilme koşulu altında, başlangıçtaki etkili gerilime eşit olduğunda önemli ölçüde artmıştır [18].



Şekil 10. Üç eksenli deney düzeneğinin şematik diyagramı [18]

Lu vd. (2019), hidrolik iletkenlik (K) ile elektriksel iletkenlik (EC) arasındaki nicel ilişkiyi kurarak, zemin K'sını tahmin etmek için uygun bir yaklaşım sağlamaya çalışmıştır. Deneysel çalışma, sayısal analiz ve model karşılaştırması yapılmıştır. Deneysel üç faktörün (partikül boyutu, zemin sıkıştırma derecesi ve sıvı (NaCl çözeltisi) konsantrasyonu) K üzerindeki etkileri test edilmiştir. Karşılaştırma EC'yi kullanarak hızlı bir K tahmini sağlayan modellerin, klasik tane boyutu tabanlı formüllerin çoğundan daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir [19].



Şekil 11. Zemin hidrolik iletkenliğini ölçmek için tasarlanmış cihaz [19]

Alkayış (2019) yaptığı çalışmada zemin problemleri üzerinde deneyler yapabilmek için laboratuvar ölçekli geoteknik santrifüj deney aleti geliştirmiştir. Deney aleti, bir döndürme kolunun ucundaki model zeminini döndürerek zeminin kendi ağırlık

gerilmeleri oluşturulması üzerinde ortaya çıkmıştır. Bu deney sistemi ile tanımlanan ölçek faktörlerine göre küçük modellerin gerçek modelleri büyük ölçüde temsil edildiği vurgulanmaktadır. Deney aleti ile konsolidasyon süreci incelenmiş olup, sistemin 1-D ödometre sonuçlarından elde edilen sonuçların, model üzerindeki teorik konsolidasyon süreci ile Santrifüj konsolidasyon uygunluğu kontrol edilmiştir. Sonuç olarak deney sisteminin konsolidasyon sürecine uygunluğu deney aletinin kalibrasyonu için yeterli görülmüştür. Ayrıca rijit temel altındaki tek ve tabakalı zeminlerin oturma davranışı incelenmiş ve literatür ile karşılaştırılmıştır [20].

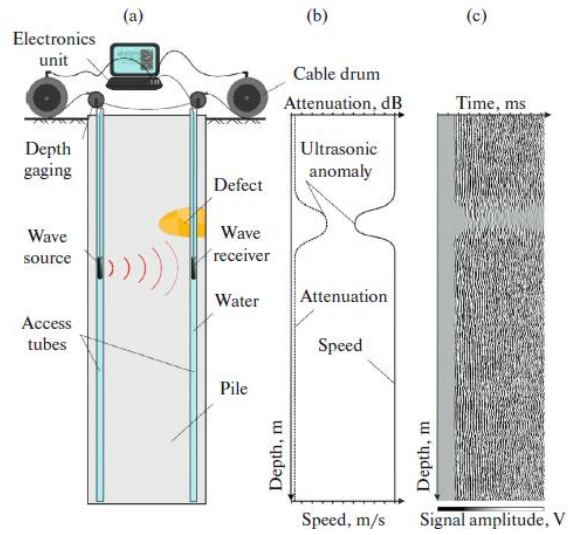


Şekil 12. Laboratuvar Ölçekli Geoteknik Santrifüj [20]

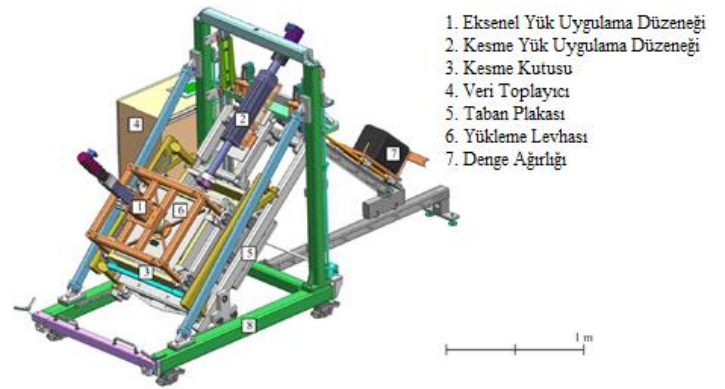
Kucerik vd. (2020) laboratuvar koşullarında termogravimetri kullanılarak zemin özelliklerini belirlenmeyi amaçlamıştır. Sonuç olarak, geoteknikte termogravimetri yaklaşımlarının rutin uygulaması için, termogravimetri verileri ve zemin özellikleri arasındaki ilişkileri modellerken teşhis sıcaklıklarındaki olası değişiklikleri hesaba katan bir bağıl nem parametresinin dâhil edilmesi gerektiğini göstermiştir [21].

Kazık bütünlüğünün ultrasonik izlenmesi, sensörler kullanılarak kazık gövdesinde uyarılan ve kaydedilen elastik dalgaların parametrelerinin analizine dayanmaktadır. Lozovsky vd. (2020) COMSOL Multiphysics yazılımında ultrasonik verilerin yorumlanmasına yönelik yaklaşımları açıklığa kavuşturmak için elastik dalgaların yayılmasının sayısal simülasyonu gerçekleştirmiştir. Ultrasonik dalgaların yayılma hızı değerlerinin kazığın dayanım değerlerine çevrilmesinin yanlış olduğu sonucuna varılmıştır [22].

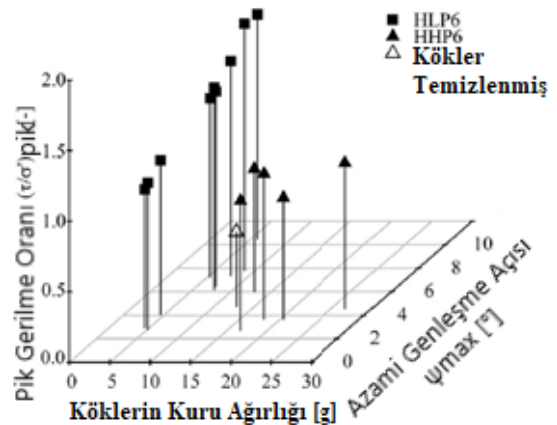
Yıldız vd. (2018), bitki kökü içeren (root-permeated) zeminlerde kesme davranışını belirlemek için yeni oluşturulmuş büyük ölçekli meyilli direkt kesme aparatı (ILDSA) kullanarak, köklerin kuru ağırlığı ile pik gerilme oranı ve azami genişleme açısı ile boşluk oranı ilişkilerinin incelenmesi sonucu kök içeren zemin davranışını araştırmıştır. Köklerin karmaşık yapısı ve zemin davranışının farklı etkenlerden etkilenmesi nedeniyle, basit bir değerlendirme yapmanın zorluğu nedeniyle, en azından laboratuvar ortamında, kök varlığı ve genişleme davranışını dikkate alan bu birleşik yaklaşımın, kök güçlendirmesi etkilerinin miktarının belirlenmesinde daha gerçekçi sonuçlar doğuracağı açıklanmıştır [23].



Şekil 13. Ultrasonik kazık bütünlük testi: (a) test tasarımı, (b) yayılma hızı ve ultrasonik dalgaların zayıflaması grafikleri; (c) ölçüm profiline kaydedilen tüm sinyallerden oluşan sismogram [22]



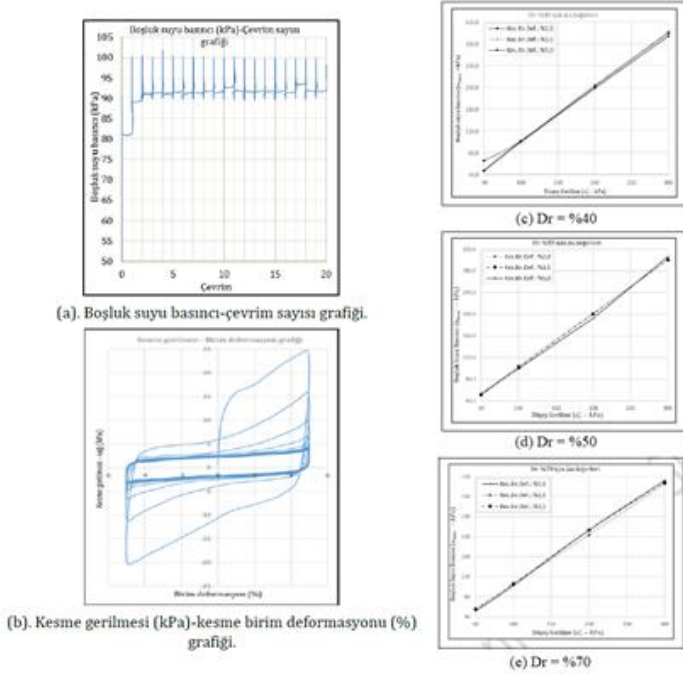
Şekil 14. Büyük Ölçekli Meyilli Direkt Kesme Aparatının (ILDSA) Üç Boyutlu Çizimi [23]



Şekil 15. Tüm Deneyler için Üç Boyutlu Pik Gerilme Oranı, Köklerin Kuru Ağırlığı ve Azami Genişleme Açısı [23]

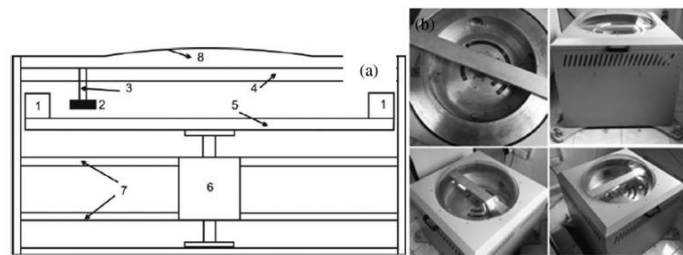
Beyaz vd. (2020), kesme birim deformasyonu ve rölatif sıklığın, temiz ince deniz kumunda, kumların sıvılaşma enerjisinin belirlenmesine etkisini, daha önce kullanılmayan bir Devirsel Basit Kesme Düzeneği (DBKD) kullanarak incelemiştir. Cihazın yaygın olarak kullanılan ve sadece düşey yönde tekrarlı yük uygulayabilen cihazlardan farkı, düşeyde dinamik yük ve

Yapılan 36 deney sonucunda, sıvılaştırma potansiyelinde, kesme birim deformasyon oranındaki artış sonucu %3'lük bir azalma meydana gelirken, artan rölatif sıklığın, kumda kesme direncini artırdığı, sonuç olarak da devir sayısında artış ve sıvılaştırmada gecikme gözlemlenmiştir [24].



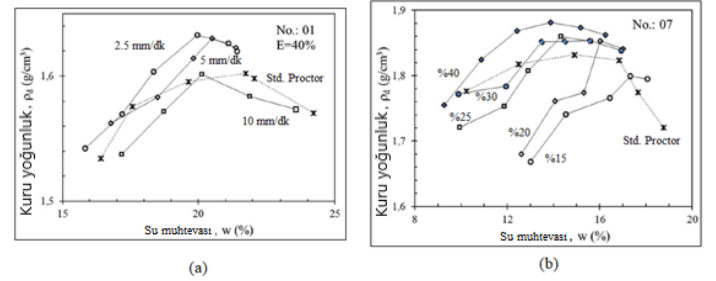
Şekil 16. (a) ve (b) DBKD'den Elde Edilen Grafik Örnekleri. (c), (d) ve (e) Farklı Rölatif Sıklıktaki Kumların, Farklı Kesme Birim Deformasyon Oranında Boşluk Suyu Basıncı Grafikleri [24]

Genel olarak, konsolidasyon parametreleri laboratuvaroda ödometre deneyleri ile yerçekimi şartlarında (1g) gerçekleştirilmekle birlikte, bu süreç uzun zaman almaktadır. Her ne kadar bu süreyi azaltmak için statik yaklaşıma alternatif olarak daha yüksek ivmeli dinamik yaklaşımlar geliştirilmiş olsa da bu yöntemler pahalı ve çok büyük santrifüjlere gereksinim duymaktadır. Dahası, bu santrifüjler, uygulamadan ziyade araştırma odaklıdır. Bu nedenlerle Balcı vd. (2018), çok küçük boyutlu (minyatür) bir santrifüj cihazının konsolidasyon deneylerine uygulanabilirliğini ele almıştır. Sonuç olarak bu düzeneğin, deney süresini birkaç saate düşürdüğü, kullanılan yeni bir parametre ile (Wce: Santrifüj yükü) örselenmemiş numuneler için geleneksel konsolidasyon deney sonuçları ile ilişkilendirmenin sağlandığı ve bakır sıkışma çizgisinin yüksek kesinlik, ön konsolidasyon basıncının ise orta kesinlik ile belirlenebildiği ve doğal numunelere uygulandığında da ümit vadettiği belirtilmiştir [25].

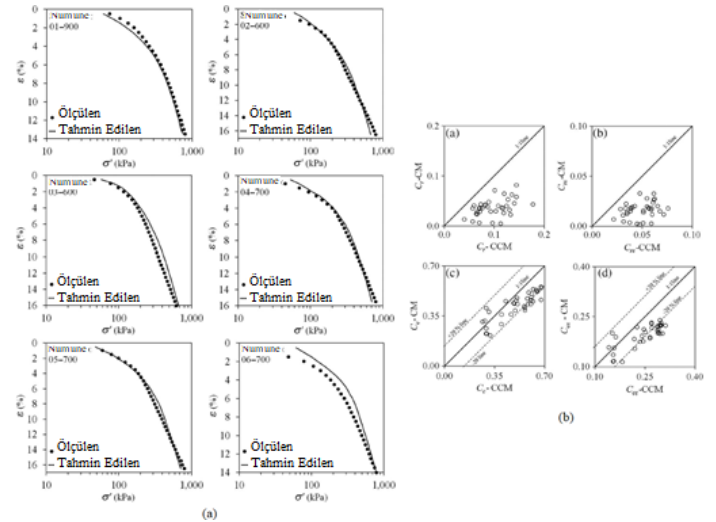


Şekil 17. Araştırmada Kullanılan Minyatür Santrifüj Cihazı (a) Enkesit (b) Genel Görünüm [25]

Mekanik stabilizasyonla zemin iyileştirme sıklıkla, çukurlardan alınan önemli miktarda zemin gerektiren standart Proctor deneyi kullanılarak uygulanmaktadır. Statik kompaksiyon ise alternatif bir laboratuvar deneyidir. Araştırmacılar minyatür boyutlardaki statik kompaksiyon deneylerinin azami kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası yönünden standart Proctor deneyi ile kıyaslanabileceğini göstermiş olsalar da drenajsız kayma mukavemeti ve hidrolik iletkenlik gibi sıkışmış zeminin iki esas özelliği konusunda çalışılmamıştır. Kayabalı vd. (2020), (1) standart Proctor deneyindeki benzer sıkışma eğrilerini elde etmek, (2) optimum su muhtevasında standart Proctor ve statik kompaksiyon deneyleri ile sıkışmış zeminleri yeniden oluşturmak ve (3) sıkışmış zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti ve hidrolik iletkenliklerini kıyaslamak için gerekli statik kompaksiyon enerjisi seviyesini tahmin edebilmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak statik kompaksiyon ile, standart Proctor için gereken enerjinin yaklaşık %40'ı, gereken zemin hacminin ise sadece yaklaşık %10'u kullanılarak kıyaslanabilir hidrolik iletkenlik ve drenajsız kayma mukavemeti değerleri elde edildiği belirtilmiştir [26].



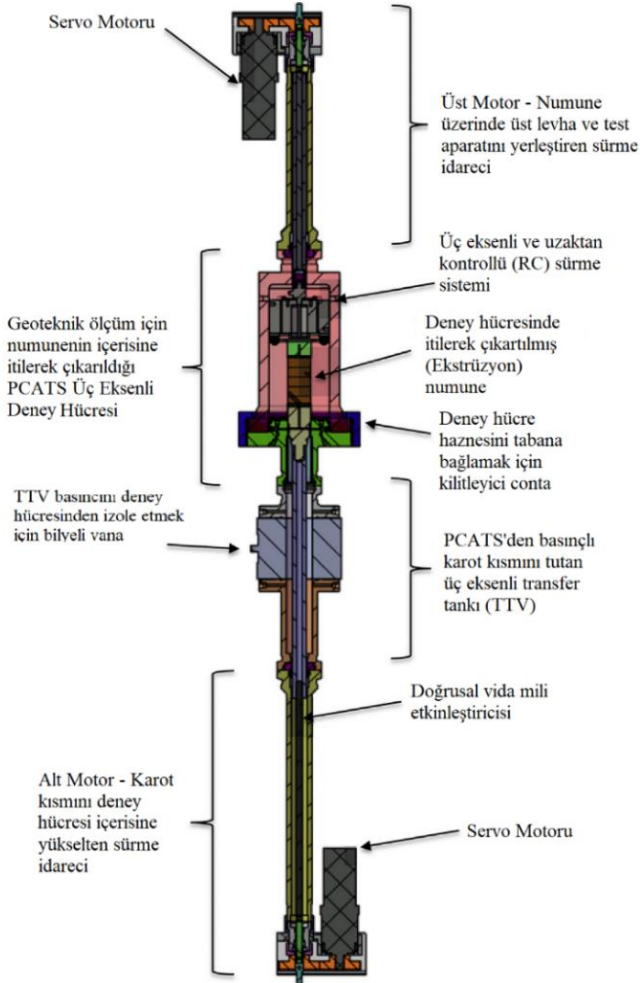
Şekil 18. a) Standart Proctor ve 2.5, 5 ve 10 mm/dk Gerinim Hızı ile Elde Edilmiş Statik Kompaksiyon Eğrileri, (b) Standart Proctor ve Standart Proctor Enerjisinin %15'i, %20'si, %25'i, %30'u ve %40'ı için Elde Edilmiş Statik Kompaksiyon Eğrileri [26]



Şekil 19. (a) Ölçülen ve Tahmin Edilen Efektif Gerilmeler, (b) Laboratuvarda Hazırlanan Numunelerde Santrifüj Konsolidasyonu (CCM) ve Geleneksel Konsolidasyon (CM) Yöntemleriyle Elde Edilmiş Sıkışma İndisleri Karşılaştırması [26]

Hidrat içeren sedimentlerin fiziksel doğası ve mekanik davranışlarının anlaşılması, metan gaz hidrat kaynaklarının potansiyellerinin belirlenebilmesi için büyük önem arz etmektedir. Basıncılı karot alma teknikleri ve işleme ekipmanları, bozulmamış (örselenmemiş) numunelerin, yerinde maruz

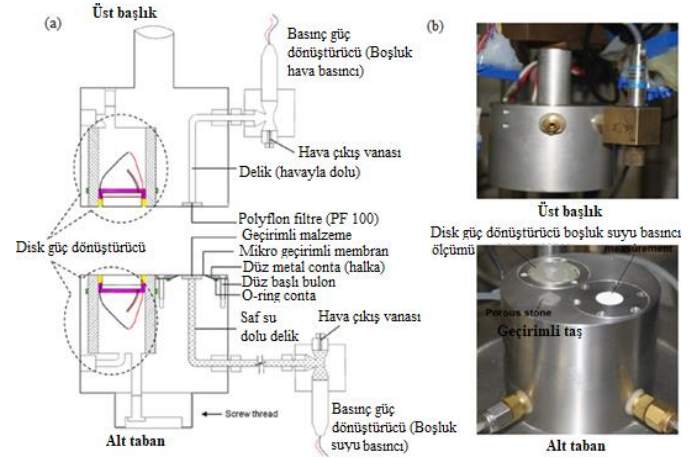
kaldıkları basınçlar altında alınabilmesine olanak sağlamış olsa da bu numunelerin arazi basınç şartları altında testleri mümkün olmamıştır. Priest vd. (2014), bu sorunun üstesinden gelebilmek için, söz konusu bu numunelerin fiziksel ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için PCATS Üç Eksenli Aparatı'nı geliştirmiş, bu aparatla belirli sayıda basınçlı karot alt numunesi elde ederek başarılı bir şekilde test etmiş, rezonans deneylerinden küçük gerinim rijitliği, üç eksenli kayma testlerinden gerilme-gerinim özellikleri ve permeabilite gibi birtakım geomekanik özellikleri belirlemiştir. Deneyler sonucunda, rijitlik ve drenajsız kayma mukavemetinin, artan dane büyüklüğü, hidrat doygunluğu ve uygulanan efektif gerilme ile arttığı, hidrat içeren kumlarda, hidratsız killere kıyasla permeabilitenin önemli ölçüde azaldığı sonuçlarına ulaşılmıştır [27].



Şekil 20. PCATS Üç Eksenli Aparatı Bütün Görünümü [27]

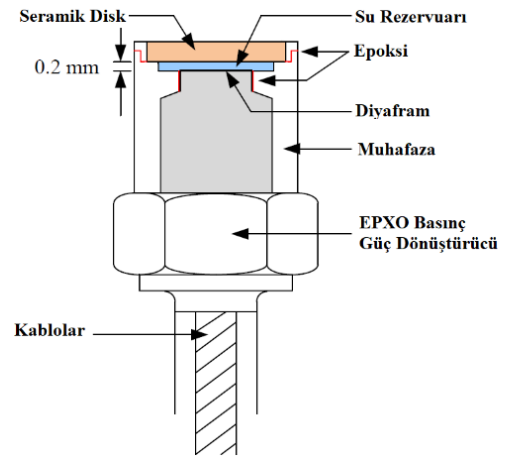
Suwal ve Kuwano (2018), elastik dalga ölçümü için yeni geliştirilen bir teknik ile bir disk güç dönüştürücü yöntem ve emme ölçümü için bir basınçlı membran tekniğini, silindirik bir numunenin hem matrik emmesi hem de elastik dalgalarının teminini sağlayan modifiye edilmiş bir üç eksenli aparatında birleştirmiştir. Aparat, kumlu zeminde 100 kPa'dan az düşük emme aralığında emme değişimini değerlendirmek için oluşturulmuştur. Hem sıkışma hem de kayma dalgaları, ilgili matrik emme ile birlikte ölçülmüştür. Matrik emme, numunelere su enjeksiyonu ile çeşitlendirilmiş ve ilgili elastik dalga hızları disk güç dönüştürücü ile bulunmuştur. Bu çalışma, disk güç dönüştürücü yönteminin doymayan zemin numunelerine uygulanabilirliğini ve düşük aralıkta emme gösteren kumlu zeminlerin mekanik davranışı üzerine matrik emmenin etkilerini desteklemektedir [28].

e-ISSN: 2148-2683

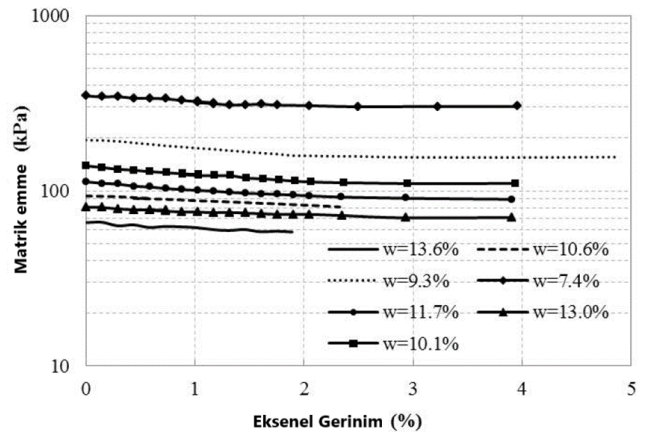


Şekil 21. (a) Matrik Emme ve Elastik Dalga Ölçüm Düzenegi Gösterimi, (b) Üst Başlık ve Alt Taban Fotoğrafı [28]

Li ve Zhang (2014), doymayan zeminlerde matrik emmenin laboratuvarında tespiti amacıyla ticari basınç güç dönüştürücüler için iki yeni yüksek emmeli gerilimölçer (tansiyometre) tasarlamış ve üretmiştir. Yapılan serbest buharlaşma deneyleri sonucu azami ulaşılabilir emmenin yaklaşık 1100 kPa olduğu görülmüştür. Mevcut yüksek emmeli tansiyometrelere kıyasla, yeni geliştirilen cihazların sağlam ve doymayan zeminlerde matrik emme ölçümü için güvenilir olduğu görülmüştür [29].



Şekil 22. Geliştirilen Tansiyometrenin Şematik Gösterimi [29]



Şekil 23. Serbest Basınç Deneyi Esnasında Farklı Su Muhtevalarına Sahip Zemin Örneklerinde Matrik Emme Ölçüm Sonuçları [29]

3. Tartışma

Son yıllarda, zemin özellikleri ve zemin davranışı tahmin modelleri oluşturulmasında makine öğrenmesi veya yapay zekâ yöntemleri gibi uzman sistemler kullanımı yaygınlaşmıştır. Uzman sistemler kullanarak zemin özellikleri başarılı bir şekilde tahmin edildiği literatürde görülmektedir. Zemin özellikleri ve zemin davranışının belirlenmesi için geleneksel deney aletlerinin çeşitli modifikasyonlarda geliştirilerek kullanımı veya yeni üretilen deney sistemleri tasarımına günümüzde sıkça rastlanılmaktadır. Bu yeni nesil deney sistemleri ile başarılı çalışmalar yapıldığı literatürde yer bulmaya başlamıştır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada geoteknik mühendisliğinde zemin özelliklerinin belirlenmesi ve zemin davranışının açıklanmasına yönelik yeni nesil yöntemlerin tanıtılması amaçlanmıştır. Zemin özelliklerinin belirlenmesi ve zemin davranışının açıklanması için günümüzde yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi uzman sistemler sıkça kullanılmaktadır. Yapay sinir ağlarının geleneksel regresyon yöntemlerine göre avantajlı bir yöntem olduğu vurgulanmalıdır, yani model bir kez eğitilip test edildikten sonra, belirlenen koşullar altında yerleşimlerin tahmini için doğru ve hızlı bir araç olarak kullanılabilir. Diğer yandan mevcut deneysel ekipmanların modifikasyonu ve geleneksel deney metodolojilerinin geliştirilmesi de çalışmalarda artış göstermiştir. Bu aletler ile deney sürelerinin kısalması ve daha doğru sonuçlar elde edilmesi mümkün hale gelmiştir. Geoteknik mühendisliğinde yeni nesil trendlerin kullanımı ile yeni bir safhaya geçildiği düşünülmektedir.

5. Teşekkür

Yazar Asena KARSLIOĞLU Tübitak Bideb 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Bursu ve YÖK 100/2000 Doktora Bursu ile desteklenmesinden dolayı ilgililere teşekkür eder.

Kaynaklar

[1] Venkatramaiah, C. (1995). Geotechnical engineering. New Age International.

[2] Erol, A. O., & Çekinmez, Z. (2014). Geoteknik mühendisliğinde saha deneyleri. Yüksel Proje Yayınları.

[3] Isik, F., & Ozden, G. (2013). Estimating compaction parameters of fine-and coarse-grained soils by means of artificial neural networks. Environmental earth sciences, 69(7), 2287-2297.

[4] Momeni, E., Nazir, R., Armaghani, D. J., & Maizir, H. (2014). Prediction of pile bearing capacity using a hybrid genetic algorithm-based ANN. Measurement, 57, 122-131.

[5] Díaz, E., Brotons, V., & Tomás, R. (2018). Use of artificial neural networks to predict 3-D elastic settlement of foundations on soils with inclined bedrock. Soils and Foundations, 58(6), 1414-1422.

[6] Tran, T. T., Han, S. R., & Kim, D. (2018). Effect of probabilistic variation in soil properties and profile of site response. Soils and Foundations, 58(6), 1339-1349.

[7] Oztoprak, S., Sargin, S., Uyar, H. K., & Bozbey, I. (2018). Modeling of pressuremeter tests to characterize the sands. Geomechanics and Engineering, 14(6), 509-517.

[8] Pham, B. T., Hoang, T. A., Nguyen, D. M., & Bui, D. T. (2018). Prediction of shear strength of soft soil using machine learning methods. Catena, 166, 181-191.

[9] Reale, C., Gavin, K., Librić, L., & Jurić-Kačunić, D. (2018). Automatic classification of fine-grained soils using CPT measurements and Artificial Neural Networks. Advanced Engineering Informatics, 36, 207-215.

[10] Sihag, P. (2018). Prediction of unsaturated hydraulic conductivity using fuzzy logic and artificial neural network. Modeling Earth Systems and Environment, 4(1), 189-198.

[11] Azadmard, B., Mosaddeghi, M. R., Ayoubi, S., Chavoshi, E., & Raof, M. (2020). Estimation of near-saturated soil hydraulic properties using hybrid genetic algorithm-artificial neural network. Ecohydrology & Hydrobiology, 20(3), 437-449.

[12] Ingale, R., Patel, A., & Mandal, A. (2020). Numerical modelling of bender element test in soils. Measurement, 152, 107310.

[13] Adab, H., Morbidelli, R., Saltalippi, C., Moradian, M., & Ghalhari, G. A. F. (2020). Machine learning to estimate surface soil moisture from remote sensing data. Water, 12(11), 3223.

[14] Straž, G., & Borowiec, A. (2020). Estimating the Unit Weight of Local Organic Soils from Laboratory Tests Using Artificial Neural Networks. Applied Sciences, 10(7), 2261.

[15] Pham, B. T., Qi, C., Ho, L. S., Nguyen-Thoi, T., Al-Ansari, N., Nguyen, M. D., ... & Prakash, I. (2020). A novel hybrid soft computing model using random forest and particle swarm optimization for estimation of undrained shear strength of soil. Sustainability, 12(6), 2218.

[16] Kayabali, K., Akturk, O., Fener, M., Ozkeser, A., Ustun, A. B., Dikmen, O., ... & Asadi, R. (2016). Determination of Atterberg limits using newly devised mud press machine. Journal of African Earth Sciences, 116, 127-133.

[17] Dantas, G. H. S., Furlan, A. P., Fabbri, G. T. P., & Suárez, D. A. A. (2016). On gyrotory compaction of a clayey soil. EJGE, 21(17), 5725-5733.

[18] Zhao, C., Koseki, J., & Sasaki, T. (2018). Image based local deformation measurement of saturated sand specimen in undrained cyclic triaxial tests. Soils and Foundations, 58(6), 1313-1325.

[19] Lu, C., Lu, J., Zhang, Y., & Puckett, M. H. (2019). A convenient method to estimate soil hydraulic conductivity using electrical conductivity and soil compaction degree. Journal of Hydrology, 575, 211-220.

[20] Alkayış M.H., Laboratuvar Ölçekli Santrifüj Deney Sistemi ile Zemin Parametrelerinin Tayini. (2019) Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi.

[21] Kučerík, J., Svatoň, K., Malý, S., Brtnický, M., Doležalová-Weismannová, H., Demyan, M. S., ... & Tokarski, D. (2020). Determination of soil properties using thermogravimetry under laboratory conditions. European Journal of Soil Science, 71(3), 415-419.

[22] Lozovsky, I. N., Zhostkov, R. A., & Churkin, A. A. (2020). Numerical Simulation of Ultrasonic Pile Integrity Testing. Russian Journal of Nondestructive Testing, 56(1), 1-11.

[23] Yildiz, A., Graf, F., Rickli, C., & Springman, S. M. (2018). Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus. Catena, 166, 98-113.

- [24] Beyaz, T., KAYABALI, K., & SÖNMEZER, Y. B. (2021). Kumların sıvılaşmasında rölatif sıklık ve kesme birim deformasyonu etkisinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(3), 431-440.
- [25] Balci, M. C., Kayabali, K., & Asadi, R. (2018). Miniature Centrifuge Modeling for Conventional Consolidation Test. Geotechnical Testing Journal, 41(3), 590-600.
- [26] Kayabali, K., Asadi, R., Fener, M., Dikmen, O., Habibzadeh, F., & Aktürk, Ö. (2020). Estimation of the compaction characteristics of soils using the static compaction method. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 162(162), 75-82.
- [27] Priest, J. A., Druce, M., Roberts, J., Schultheiss, P., Nakatsuka, Y., & Suzuki, K. (2015). PCATS Triaxial: A new geotechnical apparatus for characterizing pressure cores from the Nankai Trough, Japan. Marine and Petroleum Geology, 66, 460-470.
- [28] Suwal, L. P., & Kuwano, R. (2018). Triaxial apparatus equipped with elastic waves and matric suction measurement techniques. Soils and Foundations, 58(6), 1553-1562.
- [29] Li, L., & Zhang, X. (2014). Development of a new high-suction tensiometer. In Soil behavior and Geomechanics (pp. 416-425).