KÜÇÜK VE BÜYÜK DEFORMASYONLARDA İNCE DANELİ ZEMİN RİJİTLİĞİ İÇİN MODİFİYE HİPERBOL DENKLEMİ

A MODIFIED HYPERBOLIC MODELING OF FINE-GRAINED SOIL STIFFNESS ACROSS SMALL AND LARGE STRAINS

Sinan SARĞIN[1], Sadık ÖZTOPRAK[2]

ÖZET

Bu çalışma, ince daneli zeminlerin başlangıç rijitliğini (G_0) ve modül azalma eğrisini (G/G_0) değerlendirmek için birleştirilmiş çok değişkenli ampirik bir yaklaşım sunmaktadır. Literatürdeki yaklaşık 60 çalışmadan derlenen 838 adet sayısallaştırılmış kayma modülü azalma eğrisi kullanılarak; boşluk oranı, plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ve ortalama efektif gerilme parametreleri modele entegre edilmiştir.Yeni çok değişkenli regresyon modeli G_0 değerini hassasiyetle tahmin ederken (R^2=0.81), çalışmanın asıl katkısı; elastik eşik (γ_e), referans ($\gamma_{0.5}$) ve eğrilik (a) birim şekil değiştirme parametreleriyle yönetilen modifiye hiperbolik model aracılığıyla deformasyona bağlı rijitlik azalmasının etkili şekilde modellenmesidir. Önerilen formülasyon, $\gamma_{0.5}$ (R^2=0.82) ve a (R^2=0.72) için yüksek determinasyon katsayıları üreterek doğrusal olmayan (non-lineer) zemin davranışını modellemede üstün başarı göstermiştir. Kalıntı (rezidüel) analizleri, hataların ±2σ limitlerinde kaldığını ve ortalama sapmanın sıfıra yakınsadığını doğrulamaktadır. Sonuç olarak önerilen bu çerçeve, literatürdeki geniş indeks ve durum parametresi aralıklarında ince daneli zeminlerin G/G_0 eğrilerini doğru bir şekilde yakalamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Başlangıç Rijitliği, Modül Azalım Eğrisi, İnce Daneli Zeminler, Laboratuvar Veri Tabanı, Modifiye Hiperbolik Model*

ABSTRACT

This study presents a unified multivariable empirical framework using an extensive laboratory database to evaluate the initial stiffness (G_0) and modulus reduction curve (G/G_0) of fine-grained soils. To establish a robust predictive framework, a comprehensive laboratory database comprising 838 digitized shear modulus degradation curves from nearly 60 published studies was compiled. A unified multivariable empirical approach is developed by explicitly incorporating key geotechnical parameters—void ratio, plasticity index, overconsolidation ratio, and mean effective stress. While a new multivariable regression model accurately predicts G_0 (calibrated using 324 data points with $R^2 = 0.81$), the core contribution lies in effectively capturing strain-dependent stiffness degradation through a modified hyperbolic model governed by three key parameters: the elastic threshold strain (γ_e), reference strain ($\gamma_{0.5}$), and curvature parameter (a). The proposed formulation demonstrates superior capability in modeling non-linear soil behavior, yielding strong coefficients of determination of $R^2 = 0.82$ for $\gamma_{0.5}$ and $R^2 = 0.72$ for a. Rigorous residual analyses confirm near-zero mean biases with error bounds tightly confined within ±2σ limits. Ultimately, the proposed framework demonstrates exceptional success in accurately capturing the G/G_0 degradation curves of fine-grained soils across the remarkably diverse range of index and state parameters documented in the literature.

Keywords: *Initial Stiffness, Modulus Reduction Curve, Fine Grained Soils, Laboratory database , Modified hyperbolic model*

[1] Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, ssargin@iuc.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Prof.Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, oztoprak@iuc.edu.tr

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği ve özellikle geoteknik deprem mühendisliği problemlerinin çözümünde, zeminlerin rijitlik-birim şekil değiştirme ilişkilerinin doğru bir şekilde tanımlanması temel bir gerekliliktir. Depremler sırasında ana kayadan yüzeye doğru yayılan sismik dalgaların frekans ve genlik özellikleri, yüzeye yakın zemin tabakalarının yerel koşullarından doğrudan etkilenmektedir. 1989 Loma Prieta, 1999 Kocaeli ve 2011 Tohoku gibi yıkıcı depremlerde elde edilen aletsel veriler, yumuşak zemin profillerinin zemin büyütmesi (soil amplification) yaratarak sarsıntı genliğini artırdığını ve ivme süresini uzattığını açıkça göstermiştir. Bu bağlamda, kuvvetli yer hareketi altında sahanın sismik tepki (site response) davranışının gerçeğe yakın hesaplanabilmesi; zemin profiline ait başlangıç kayma modülünün (G_0), çok küçükten büyük deformasyon seviyelerine doğru gelişen rijitlik azalımı (degradation) ve sönüm (D) karakteristiklerinin uygun yapısal bünye modelleriyle (constitutive models) doğru bir şekilde ifade edilmesine bağlıdır.

İnce daneli zeminlerin doğrusal olmayan rijitlik azalmasının temel referans noktasını oluşturan G_0, zeminin maksimum elastik rijitliğini temsil etmekte ve genellikle yenilmenin henüz başlamadığı çok küçük birim şekil değiştirme düzeylerinde ($\gamma \leq 10^{-5}$ %) sabit ve elastik kabul edilmektedir. Son 50 yılı aşkın sürede rezonans kolon, tekrarlı üç eksenli, burulmalı kesme, bender eleman ve tekrarlı basit kesme gibi laboratuvar deneyleriyle yürütülen araştırmalar (Hardin ve Black, 1968; Seed ve Idriss, 1970; Kokusho vd., 1982; Vucetic ve Dobry, 1991; Santamarina vd., 2001; Clayton, 2011); kayma dalgası hızı (V_S), dinamik kayma modülü (G) ve sönüm oranı (D) gibi temel dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesini sağlamış, G_0'ın ise temel olarak zemin bileşimi (plastisite), durum parametreleri (boşluk oranı), gerilme seviyesi (ortalama efektif gerilme) ve gerilme geçmişi (aşırı konsolidasyon oranı) tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. Elde edilen deneysel verilerle literatürde birçok ampirik ifade (Iwasaki vd., 1978; Sun vd., 1988; Ni, 1987; Isao & Zhang, 1993; Vucetic & Dobry, 1991; Seed vd., 1986) ve yerel veri tabanı geliştirilmiş olsa da, söz konusu klasik bağıntıların kısıtlı veri setleriyle ve belirli zemin türleri için kalibre edilmiş olması, bunların farklı zemin ve gerilme koşullarındaki genellenebilirliğini sınırlandırmaktadır.

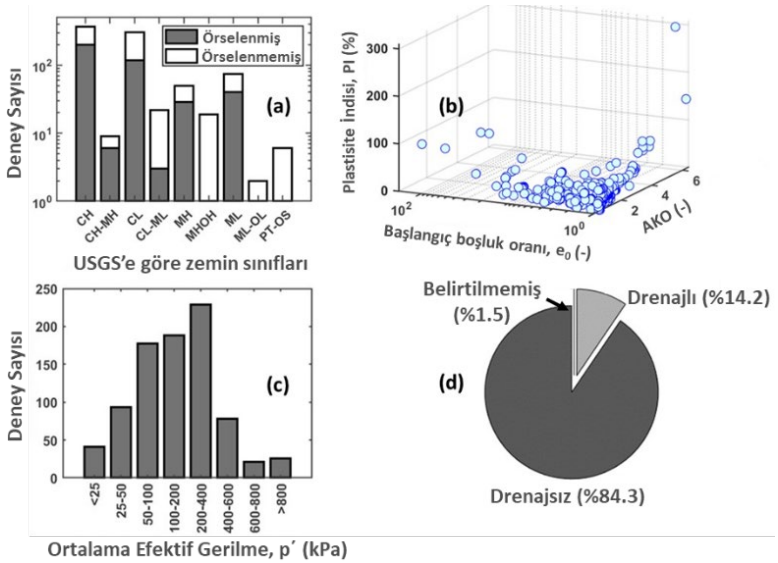
Saha tepki analizlerinde sıklıkla kullanılan mevcut modeller, genellikle geniş zemin sınıflamalarına sabit ampirik katsayılar atamakta; başlangıç boşluk oranını (e_0), plastisite özelliklerini, ortalama efektif gerilmeyi (p') ve gerilme geçmişini (AKO) gerilmeye bağlı tek bir tahminsel çerçevede bütünleştirmekte yetersiz kalmaktadır. Sunulan bu çalışma, söz konusu eksiklikleri gidererek literatüre ve uygulamaya belirgin yenilikler getirmektedir. Çalışma kapsamında öncelikle geniş parametre sınıfları yerine net tanımlanmış indeks sınırları oluşturularak zemine özgü davranış hassas biçimde yansıtılmış, ardından yerindeki (in-situ) gerilme durumunun doğrusal olmayan dinamik tepki üzerindeki karmaşık etkisi gerilmeye bağlı modellerle mekanik bir temele oturtulmuştur. Ayrıca, tekil cihaz sapmalarını önlemek amacıyla farklı laboratuvar yöntemlerini (rezonans kolon, tekrarlı üç eksenli ve kesme deneyleri) birleştiren kapsayıcı bir veri tabanı sentezlenmiştir. Geleneksel eğri uydurma yaklaşımlarının ötesine geçen bu bütüncül ve çok değişkenli ampirik model; geoteknik mühendislerinin killi zeminlerin dinamik deformasyon karakteristiklerini yalnızca rutin olarak belirlenen temel indeks ve durum parametreleri üzerinden değerlendirmelerine imkan tanıyan, birim şekil değiştirme ile uyumlu ve güvenilir bir tahmin aracı sunmaktadır.

2. OLUŞTURULAN VERİ TABANI

1960'lı yıllardan günümüze, zeminlerin dinamik özelliklerini ve bu özelliklerin deformasyon seviyesine bağlı değişimini belirlemek amacıyla rezonans kolon / burulmalı kesme (RC-RCTS), tekrarlı üç eksenli (CTX), monotonik üç eksenli (TX) ve tekrarlı doğrudan basit kesme (CDSS) gibi çeşitli laboratuvar deneylerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, ince daneli zeminlerin başlangıç kayma modülünü (G_0) geniş gerilme ve plastisite koşullarında tanımlamak amacıyla literatürde yer alan 60 farklı yayından 257 adet grafik taranarak kapsayıcı bir veri tabanı oluşturulmuştur.

Orijinal modül-birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrilerinin sayısallaştırılmasında GetData Graph Digitizer V.26 (Federov,2013) yazılımı kullanılmış; eksen ölçekleri ve veri çözünürlüğü hassasiyetle kalibre edilerek her bir eğri üzerinden küçük deformasyon seviyelerindeki G_0 değerlerini temsil eden noktalar elde edilmiştir. Sayısallaştırılan veriler, metin içerisinde mevcut olan tablo değerleriyle çapraz kontrole tabi tutularak doğrulanmıştır. Toplamda 417 RC-RCTS, 182 CTX, 192 TX ve 42 CDSS deneyini kapsayan bu standardize edilmiş veri tabanı, doğrudan sayısal olarak ulaşılamayan yüksek çözünürlüklü deneysel verilerin kazanılmasını sağlamış ve G_0 için geliştirilecek regresyon modelleri adına güvenilir ve bütüncül bir alt yapı sunmuştur. Veri tabanını oluşturan deneysel çalışmaların detaylı nitelikleri ve ilgili literatür kaynakçası Sarğın (2019) çalışmasında yer almaktadır. Verilerin farklı araştırma grupları tarafından, çeşitli deney cihazları ve test yöntemleri (ör. numune hazırlama koşulları, cihaz kalibrasyonları, yükleme frekansları veya gerilme yolları) kullanılarak elde edilmiş olması doğal bir belirsizlik (uncertainty) ve saçılım (scatter) yaratmaktadır. Cihaz ve yöntem farklılıklarından kaynaklanabilecek bu sapmalar veri setinin kendi içindeki varyasyonunu artırsa da, bu çapta geniş bir derleme yapılması zeminin genel dinamik davranış eğilimlerini ve istatistiksel sınırlarını yakalamak açısından kritiktir. Yöntemsel farklılıkların getirdiği bu belirsizlikler, analiz sonuçlarında güven aralıkları (veya standart sapma sınırları) ile temsil edilerek değerlendirmeye alınmıştır

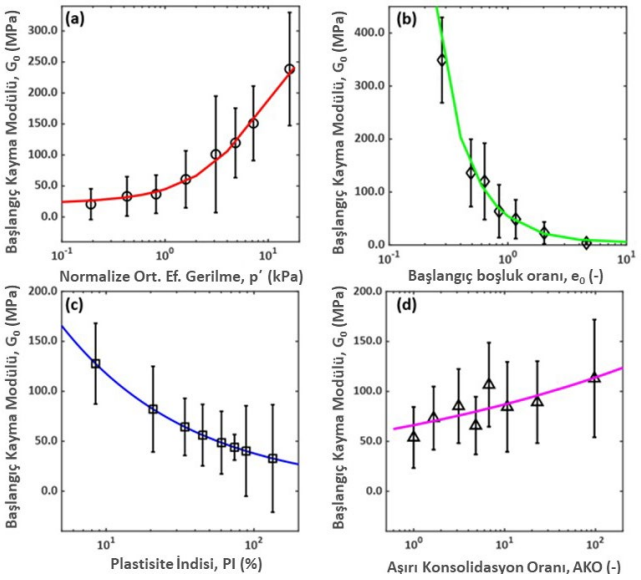
Oluşturulan veri tabanı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre ağırlıklı olarak yüksek ve düşük plastisiteli killerden (CH ve CL) oluşmakta; yaklaşık üçte biri örselenmemiş numunelerden meydana gelen geniş bir plastisite inidisi aralığı (PI = %5-300), başlangıç boşluk oranı (e_0= 0.5-4.0) ve aşırı konsolidasyon oranı (AKO = 1-6) aralığını kapsamaktadır (Şekil 1a, b). Deneyler çoğunlukla 50–400 kPa ortalama efektif gerilme (p') altında yürütülmüş olup, K_0 değerinin belirtilmediği durumlarda izotropik koşullar (K_0 = 1.0) kabul edilmiştir (Şekil 1c). Drenaj koşulları açısından ise veri setini oluşturan deneylerin yaklaşık %84'ünün drenajsız, %14'ünün ise drenajlı testlerden meydana geldiği görülmektedir (Şekil 1d).



Şekil 1. Veri tabanının içeriği (Sarğın, 2019)

2.1. G_0 Tahminine Yönelik Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi

Zeminlerin indeks özellikleri ile başlangıç kayma modülü (G_0) arasındaki ilişkiyi matematiksel bir formüle dönüştürebilmek amacıyla, oluşturulan veri tabanı öncelikle istatistiksel güvenilirliği artırmak üzere MATLAB R2019b (Mathworks,2019) ortamında filtrelenerek ön işlemden geçirilmiştir. Değişkenleri kısıtlı bir alt gruba hapsetmek yerine, her bir zemin parametresi ile G_0 arasındaki ilişki mevcut tüm nitelikli veriler üzerinden değerlendirilmiştir.Farklı laboratuvar yöntemlerinden (RC-RCTS, CTX, CDSS) elde edilen 324 adet veri; G_0'ın normalize edilmiş ortalama efektif gerilme (p'/p_a, p_a = 100kPa) ve OCR arttıkça yükseldiğini, başlangıç boşluk oranı (e_0 = 0.28-6.20) ve plastisite indisi (PI) arttıkça azaldığını göstermektedir. Yarı logaritmik ölçekte belirgin doğrusal eğilimler sunan bu değişimler (Şekil 2), parametrelerin Eşitlik (1)'de verilen genelleştirilmiş kuvvet fonkisyonu (power-law) ile ifade edilebileceğini doğrulamaktadır. Grafiklerdeki simgeler grup ortalamalarını, hata çubukları ise grup içi standart sapmayı temsil etmektedir.



Şekil 2. Filtrelenmiş 324 laboratuvar verisiyle başlangıç kayma modülünün (G_0) zemin parametreleri ile değişimi

$$G_0 = a \cdot x^b \quad (1)$$

Söz konusu kuvvet fonksiyonunun tüm değişkenlerin etkisini yansıtmada uygun bir yapı sunduğu görüldüğünden, literatürde kohezyonlu zeminler için benzer formda önerilmiş olan ampirik bağıntılar taranmıştır. Bu kapsamda, Hardin ve Drnevich (1972) tarafından killi zeminler için türetilen eşitlik güncellenerek Eşitlik (2)'de sunulan forma dönüştürülmüştür.

$$G_0 = \frac{A}{e_0^B} \cdot OCR^k \cdot (\frac{p'}{p_a})^m \quad (2)$$

Denklemedeki Ave B regresyonla elde edilen kalibrasyon parametrelerini, k ve m üsleri ise sırasıyla OCR ve ortalama efektif gerilmenin (p') etkisini simgelemektedir. Aşırı parametrelendirmeden (over-parameterization) kaçınılarak küçük deformasyon rijitliğini yönlendiren temel zemin özelliklerine olan hassasiyet korunmuş ve modelin genellenebilirliği gözetilmiştir. Plastisite etkisi ilk aşamada Eşitlik (2) ile modele dahil edilmiş; yapılan analizlerde m ve k üslerinin plastisite indisi (PI) ile sistematik bir değişim gösterdiği tespit edilmiştir (Tablo 1). Bu bağımlılığın doğrudan üs terimlerine entegre edilmesiyle nihai ampirik model olan Eşitlik (3) elde edilmiştir.

$$G_0 = \frac{50}{e_0^{0.82}} \cdot OCR^k \cdot (\frac{p'}{p_a})^m \quad (3)$$

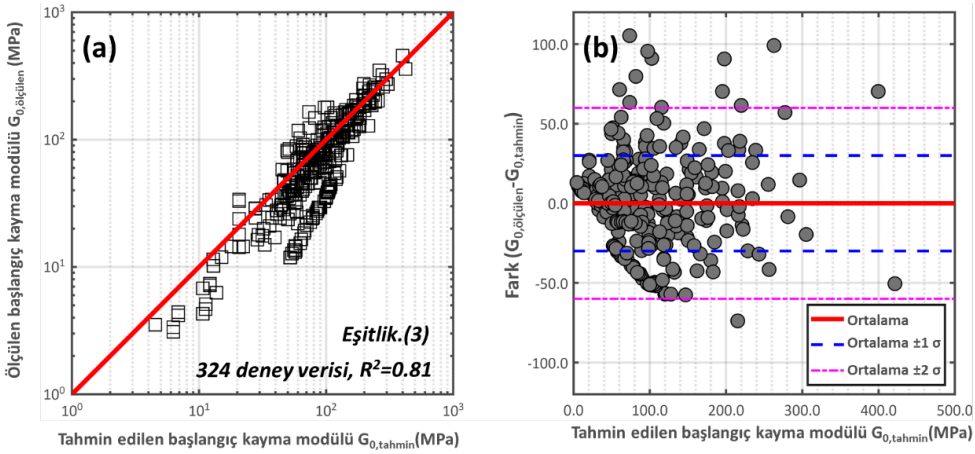
Tablo 1. PI (%) Aralıklarına Bağlı k ve m Değerleri

PI (%)	k	m
PI<15	0.07	0.53
PI=15-30	0.11	0.38
PI=30-50	0.21	0.34
PI=50-80	0.30	0.32
PI>80	0.40	0.28

Geliştirilen G_0 bağıntısının tahmin başarısı, ölçülen ve hesaplanan değerlerin karşılaştırıldığı Şekil 3'te sunulmaktadır. 324 veri noktası üzerinden yapılan değerlendirmede, model tahminlerinin deneysel verilerle yüksek bir korelasyon sunduğu ($R^2 = 0.81$) ve 1:1 doğrusu etrafındaki saçılmanın veri tabanının doğal değişkenliğini yansıttığı görülmektedir (Şekil 3a). Şekil 3b'deki kalıntı (residual) analizi ise hataların ağırlıklı olarak sıfır etrafında toplandığını ve tahmin edilen rijitlik değerlerine bağlı sistematik bir sapma göstermediğini doğrulamaktadır. Verilerin büyük çoğunluğunun 1*σ ila 2*σ standart sapma sınırları içerisinde kalması, önerilen bağıntının kararlılığını ve kısıtlı model karmaşıklığına rağmen küçük deformasyon kayma modülünü yüksek güvenilirlikle temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

2.2. Kayma Modülü Azalımının (G/G_0) Modellenmesi ve Değerlendirilmesi

İnce daneli zeminlerde kayma modülünün kayma deformasyonuna bağlı azalımını modellemek için orijinal olarak kumlu zeminler için Öztoprak ve Bolton (2013) tarafından önerilen ve Eşitlik (4)'te verilen bağıntıda yer alan 3 değişken zemin indeks ve gerilme özellikleri ile ilişkilendirilmiştir.

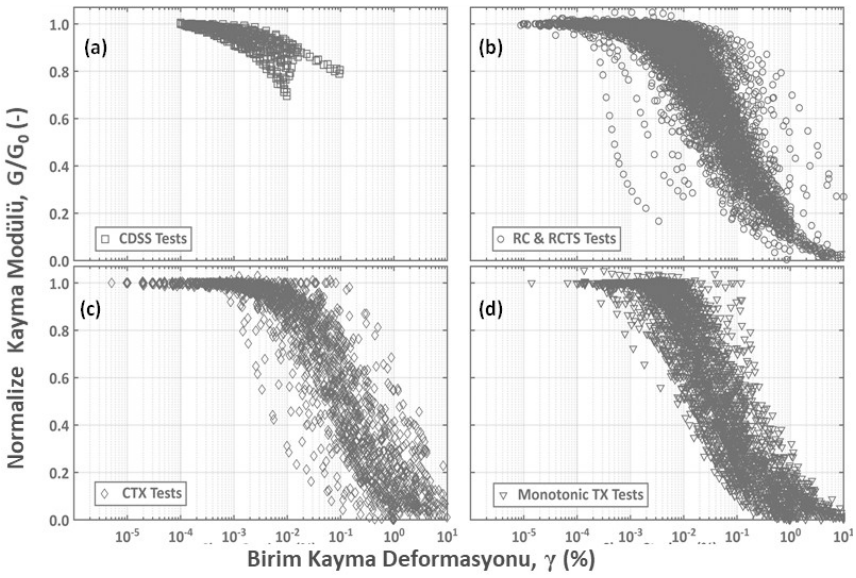


Şekil 3. (a) Ölçülen ve Eşitlik (3) ile tahmin edilen G_0 değerlerinin karşılaştırılması, (b) modele ait kalıntı dağılımı.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma - \gamma_e}{\gamma_{0.5}}\right)^a} \tag{4}$$

Bu denklemde; γ_e elastik davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş olan eşik birim şekil değiştirmeyi, $\gamma_{0.5}$ başlangıç kayma modülünü yarıya düşüren (G/G_0=0.5) referans birim şekil değiştirmeyi ve a ise eğrilik parametresini ifade etmektedir.

Başlangıç kayma modülünün (G_0) belirlenmesinin ardından, killi zeminlerin birim şekil değiştirmeye bağlı rijitlik azalımını karakterize etmek üzere kayma modülü azalım (G/G_0) davranışı modellenmiştir. Bu kapsamda; rezonant kolon / burulmalı kesme (RC-RCTS, 440 adet), tekrarlı üç eksenli (CTX, 180 adet), monotonik üç eksenli (TX, 193 adet) ve tekrarlı basit kesme (CDSS, 40 adet) deneylerinden derlenen toplam 838 adet modül azalım eğrisi verisi bir araya getirilmiş ve deney türlerine göre sınıflandırılarak sunulmuştur (Şekil 4a–d).



Şekil 4. Farklı laboratuvar deneylerinden elde edilen modül azalım eğrileri: (a) Tekrarlı basit kesme, (b) Rezonant kolonu ve burulmalı kesme, (c) Tekrarlı üç eksenli, (d) Monotonik üç eksenli deneyleri

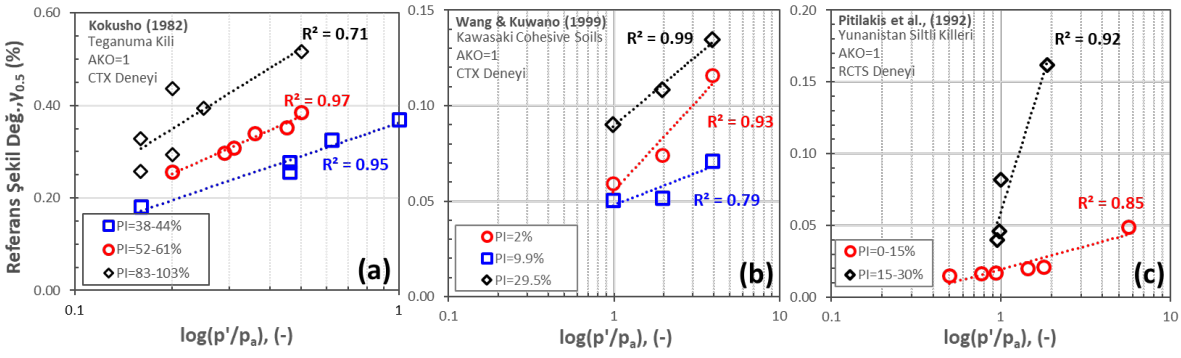
Bu çalışmada, ince taneli zeminlerde rijitlik azalmasını kontrol eden referans kayma birim şekil değiştirmesi) ile temel zemin parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Literatürdeki çeşitli kil verileriyle desteklenen analizler, 'in normalize edilmiş ortalama efektif gerilme (p'/p_a) ile log-doğrusal (log-lineer) bir ilişki sergilediğini göstermektedir (Eşitlik 5).

$$\gamma_{0.5}(\%) = c \log\left[\left(\frac{p'}{p_a}\right)\right] + d \tag{5}$$

Çalışmada esas olarak fektif gerilme temel bağımsız değişken olarak ele alınmıştır. Zemin türünü ifade eden plastisite indisi ise denklemin katsayılarına (c ve d) entegre edilmiştir. Bu yaklaşım, hem gerilme seviyesinin hem de plastisitenin doğrusal olmayan rijitlik azalmasına olan bileşik etkisini çok daha gerçekçi ve belirsizlikten uzak bir çerçevede modellemektedir.

Önerilen formülasyonun bir diğer önemli ayağı, başlangıç boşluk oranının (e_0) referans şekil değiştirme üzerindeki etkisinin tanımlanmasıdır. Deneysel veriler (Kokusho vd., 1982; Wang & Kuwano, 1999; Pitilakis vd., 1992; Santagata,1998) üzerinden yapılan incelemeler, $\gamma_{0.5}$ ile başlangıç boşluk oranı arasında ters orantılı bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek boşluk oranına sahip numuneler sistematik olarak daha düşük referans birim şekil değiştirme değerleri sergilemekte, bu durum $\gamma_{0.5}$–log(p'/p_a) eğrisinde yatay eksende sola doğru bir kayma yaratmaktadır. Gözlemlenen bu tutarlı yatay kayma, boşluk oranının etkisinin log-doğrusal denklemin kesme (intercept) noktası olan "d" parametresi içerisine dahil edilmesi gerektiğini doğrulamaktadır. Sonuç olarak geliştirilen bu bağıntı; efektif gerilme, plastisite indisi ve başlangıç boşluk oranının $\gamma_{0.5}$ üzerindeki etkilerini birleşik bir sistematik yaklaşımla sunmaktadır. Eşitlik 5'te genel formu verilen denklemi doğrulama çalışmaları için literatürdeki deneysel veriler derlenerek Şekil 5 ve 6'daki ilişkiler tespit edilmiştir. Sonuç olarak, MATLAB ortamında hem `fminsearch` hem de `lsqcurvefit` optimizasyon algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilen regresyon analizlerine dayanarak, referans birim şekil değiştirme ($\gamma_{0.5}$) için Eşitlik (6)'de verilen genel tahmin bağıntısı önerilmiştir.

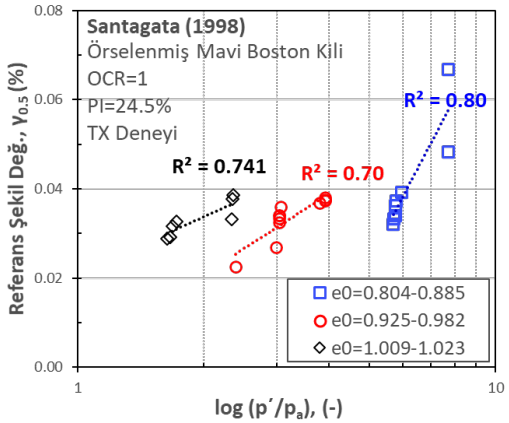
$$\gamma_{0.5}(\%) = 0.53\frac{PI^{2.6}}{AKO^{8}} \cdot \log\left(\frac{p'}{p_a}\right)^{AKO} + 0.29(e_o \cdot PI) \tag{6}$$



Şekil 5. Referans şekil değiştirme ile gerilme-plastisite ilişkisi

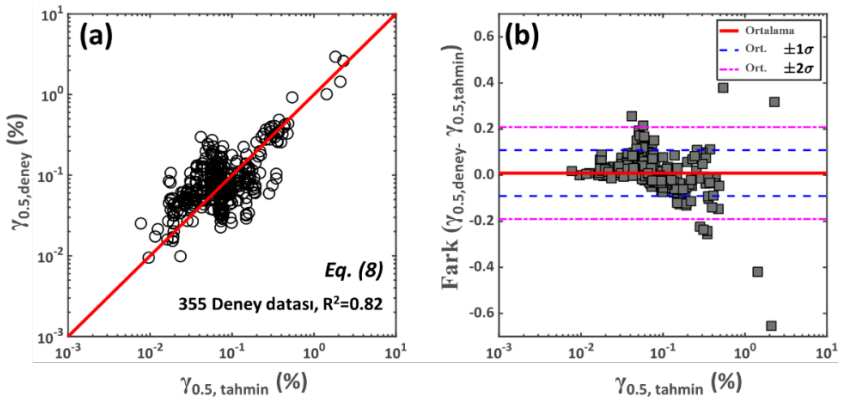
Şekil 7a'da gösterildiği üzere, tahmin edilen referans birim şekil değiştirme değerleri, geniş bir şekil değiştirme seviyesi aralığında deneysel verilerle güçlü bir istatistiksel korelasyon

sunmaktadır. 355 veri noktası üzerinden elde edilen yüksek belirtme katsayısı (R^2 = 0.82), önerilen bağıntının gözlenen varyasyonun büyük bir bölümünü açıkladığını göstermektedir.



Şekil 6. Referans şekil değiştirme ile gerilme-boşluk oranı ilişkisi

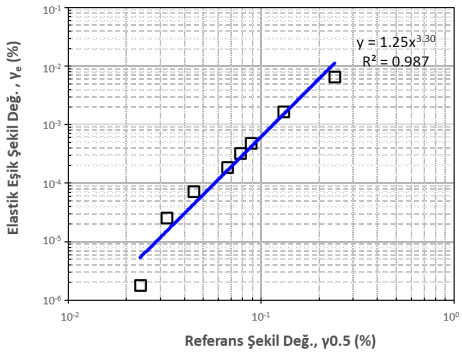
Veri noktalarının 1:1 doğrusu etrafında yoğun bir dağılım sergilemesi; heterojen zemin türlerini ve zemin durumlarını kapsayan veri tabanının doğal değişkenliğine rağmen modelin kararlılığını ve yüksek tahmin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Şekil 7b'de verilen kalıntı (residual) dağılımının sıfır etrafında sıkı bir şekilde merkezlenmesi ve istikrarlı olarak ±1σ ile ±2σ sınırları içerisinde kalması, tahminlerin güvenilirliğini ve modelde herhangi bir sistematik sapmanın bulunmadığını teyit etmektedir.



Şekil 7. Referans birim şekil değiştirme ($\gamma_{0.5}$) için regresyon sonuçları

Öztoprak ve Bolton (2013) tarafından kumlar için bildirilen ile arasındaki yaklaşık doğrusal ilişkinin aksine, bu çalışmanın bulguları killerin belirgin biçimde doğrusal olmayan, kuvvet yasası (power-law) tipi bir bağımlılık sergilediğini ortaya koymaktadır. Şekil 8'da görüldüğü üzere, γ_e, Eşitlik (7)'teki bağıntıya uygun olarak $\gamma_{0.5}$,ile birlikte artmakta ve üstün bir uyum düzeyi (R^2 = 0.987) sunmaktadır. Elde edilen bu belirgin eğrilik; γ_e 'nin $\gamma_{0.5}$ ile orantılı olarak değiştiği kumların aksine, killi zeminlerin davranışının çok küçük deformasyon seviyelerinde yüksek bir birim şekil değiştirme duyarlılığı ile karakterize edildiğini göstermektedir.

$$\gamma_e(\%) = 1.25 \cdot \gamma_{0.5}(\%)^{3.30} \qquad (7)$$



Şekil 8. Kil veri tabanı için γ_e ile $\gamma_{0.5}$ arasındaki ilişki

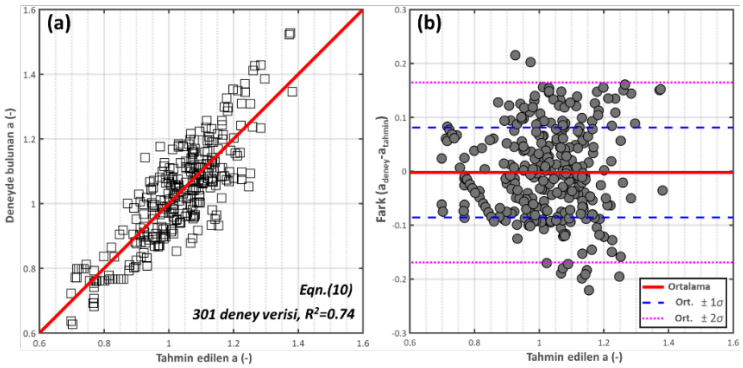
Bu çalışma kapsamında son olarak, zemin özelliklerine bağlanan hiperbol parametresi; eğriliği yöneren "a" olmuştur. Bu doğrultuda, eğrilik parametresi (a), derlenen veri tabanında gözlemlenen eğilimlere dayanarak gerilme seviyesi ve zemin durum değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Normalize edilmiş ortalama efektif gerilme ile başlangıç boşluk oranının eğrilik parametresi üzerindeki birleşik etkisini nicelleştirmek amacıyla MATLAB (Mathworks Inc., 2019) ortamında regresyon analizleri yürütülmüştür. MATLAB Curve Fitting Tool modülü aracılığıyla polinom, eksponansiyel ve kuvvet yasası gibi farklı "aday fonksiyonlar" sistematik olarak değerlendirilmiştir. Üstün istatistiksel uyum başarısı, gözlenen eğilimleri temsil etme kapasitesi ve boyut tutarlılığını koruma yeteneği nedeniyle nihai olarak kuvvet yasası (power-law) formu seçilmiştir. Buna göre, eğrilik parametresi Eşitlik (8)'deki şekilde ifade edilmiştir:

$$a(-) = c_1 \left(\frac{p'}{p_a}\right)^{c_2} \cdot {e_o}^{c_3} \tag{8}$$

Burada c_1, c_2 ve c_3 veri tabanından belirlenen regresyon katsayılarını temsil etmekte olup, değerlendirilen heterojen veri setinde eğrilik parametresi ile tutarlı bir eğilim saptanmadığı için plastisite indisi bağıntıya açıkça dâhil edilmemiştir. Tablo 2'de PI sınıfına göre a'değerini tahmin etmede kullanılacak parametreler sunulmuştur. Şekil 9(a) ve (b)'de önerilen deklemin performansı sunulmuştur. Buna göre, 321 veri noktası kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda tahmin edilen değerler, gözlenen değerlerle güçlü bir korelasyon sergilemekte olup bu durum $R^2 = 0.74$ katsayısı ile doğrulanmaktadır; zemin davranışını modellemenin doğasında bulunan zorluklar dikkate alındığında bu performans, geoteknik amaçlar için kabul edilebilir düzeydedir. Şekil 10b'de sunulan kalıntı (residual) dağılımı, tahmin edilen değerlere kıyasla belirgin bir eğilim/örüntü sergilememekte ve ağırlıklı olarak kabul edilen istatistiki sınırlar içerisinde kalmaktadır.

Tablo 2. Plastisite İndisi sınıfına göre Eşitlik (8)'deki katsayılar

PI (-)	c_1	c_2	c_3
PI<0.15	0.76	0.13	-0.42
0.15<PI<0.3	0.94	0.11	-0.18
0.3<PI<0.5	0.96	0.11	-0.16
0.5<PI<1.0	1.00	0.05	-0.11
PI>1.0	1.04	0.05	-0.11



Şekil 9. Eğrilik parametresine (a) ait regresyon analizi sonuçları (b) hata değerleri

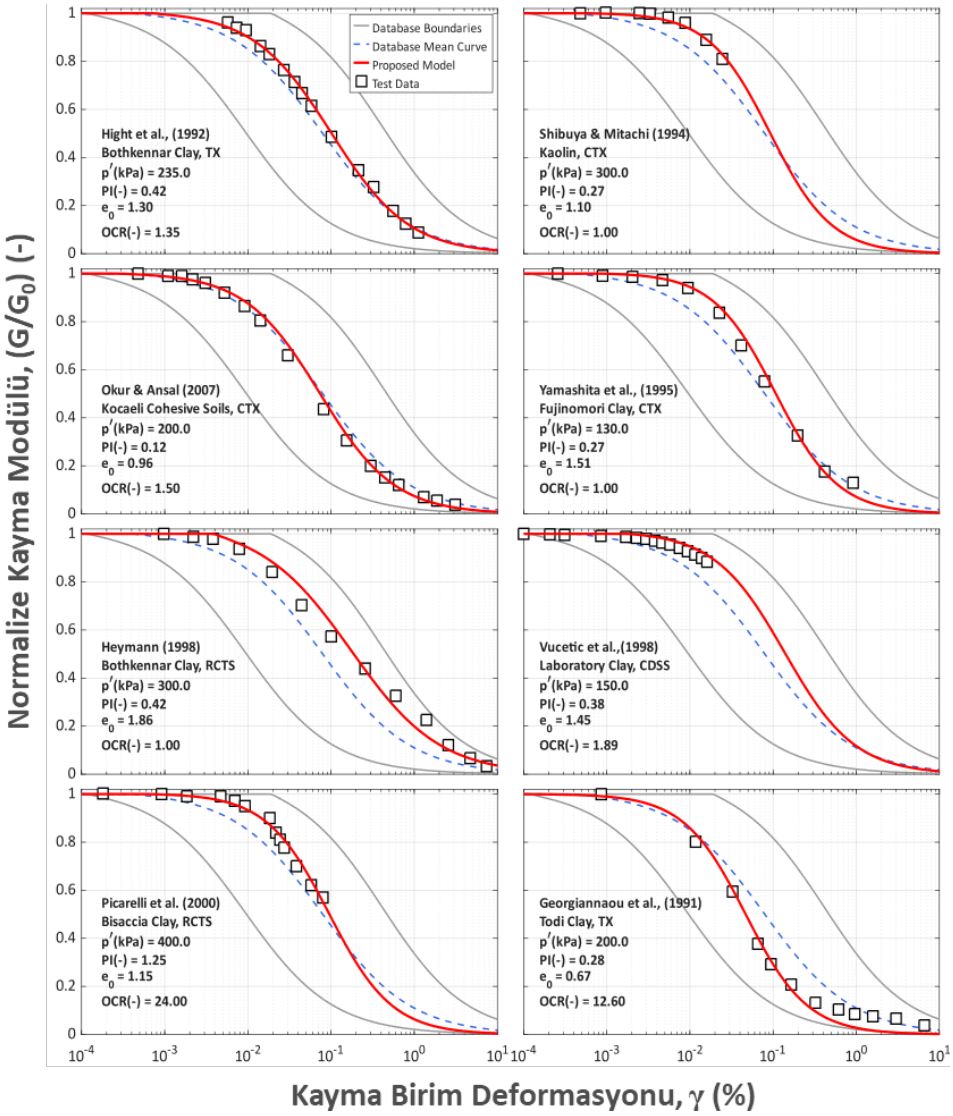
Şekil 10'de , seçilen killi zeminler için önerilen bağıntı ile tahmin edilen kayma modülü azalım eğrilerini ilgili deneysel deney verileriyle (Okur ve Ansal, 2007; Hight vd., 1992; Shibuya ve Mitachi, 1994; Yamashita vd., 1995; Heymann, 1998; Vucetic vd., 1998; Picarelli vd., 2003; Georgiannou vd., 1991) birlikte sunmakta ve böylece önerilen rijitlik azalım modelini doğrulamaktadır. Önerilen yaklaşım, yalnızca rutin indeks ve durum parametrelerini kullanarak karmaşık yinelemeli süreçlere ihtiyaç duymadan killi zeminlerin rijitlik azalımını yüksek doğrulukla tahmin etmektedir. Elde edilen bu performans, geliştirilen modelin mühendislik tasarımı ve geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında kullanılabilirliğini ispatlamaktadır.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ince taneli zeminlerin çok küçük birim şekil değiştirme kayma modülü (G_0) ve modül azalım (G/G_0) davranışını tahmin etmek amacıyla ampirik bir çerçeve geliştirilmiştir. Yaklaşık 60 makaleden derlenen 838 adet modül azalım eğrisiyle oluşturulan veritabanı kullanılarak; γ_e, $\gamma_{0.5}$ ve a zemin plastisitesi, gerilme durumu sistematik değişimi nicelleştirilmiştir. Temel indeks ve durum parametreleri (PI, e_0, p', AKO) aracılığıyla doğrudan hesaplanabilen bu bağıntılar, rezonant kolon ve tekrarlı deneylerde yüksek başarı göstererek dinamik deprem analizleri için pratik bir girdi altyapısı sunmaktadır. Belirlenen geniş parametre sınırları dâhilinde geçerli olan bu yaklaşım, yapay zekâ modellerinin "kara kutu" niteliğinin aksine geoteknik prensiplere dayalı şeffaf ve mekanik temelli bir araç sağlarken, oluşturulan veri tabanı da gelecek araştırmalar için değerli bir referans niteliği taşımaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında birinci yazar Sinan SARĞIN, TÜBİTAK BİDEB 2211-A Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir. Katkılarından ötürü Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz.



Şekil 10. Önerilen modelin laboratuvar deneyleri ile karşılaştırılması

KAYNAKLAR

Clayton, C. I., (2011) Stiffness at small strain: research and practice. Geotechnique, 61(1), 5-37

Fedorov, S., (2013) *GetData Graph Digitizer*. Moscow

Georgiannou, V. N., Rampello, S., Silvestri, F., (1991). Static and dynamic measurements of undrained stiffness on natural overconsolidated. *10th ECSMFE, Rotterdam*

Hardin, B. O., Black, W. L., (1968) "Vibration modulus of normally consolidated clay". *Journal of the Soil Mech. and Found. Division*, 94(2), 353-369.

Hardin, B. O., Drnevich, P. D., (1972) "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves". *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Div.*, 98, 667-692.

Heymann, G.,(1998) *The Stiffness of Soils and Weak Rocks* (Doktora Tezi). University of Surrey, Guildford.

Hight, D. W., Bond, A. J., Legge, J. D., (1992) "Characterization of the Bothkennaar clay: an overview". *Geotechnique*, 42(2), 303-347.

Isao, I., Zhang, X., (1993) "Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay" *Soils and Foundations*, 33(1), 182-191

Iwasaki, T., Tatsuaoka, F., Takagi, Y., (1978) "Shear Moduli of Sands under Cyclic Torsional Shear Loading". *Soils and Foundations*, 18(1), 39-56

Kokusho, T., Yashida, Y. & Esashi, Y., (1982), "Dynamic properties of soft clay for wide strain range". *Soils and Foundations,* 22(4), pp. 1-18.

MathWorks Inc., (2019) "*MATLAB R2019b*. Natick.

Ni, S. H., (1987) Dynamic Properties of Sand Under True Triaxial Stress States from Resonant Column/Torsional Shear Tests. University of Texas at Austin, Texas

Okur, D. V., Ansal, A., (2007) "Stiffness degradation of natural fine-grained soils during cyclic loading". *Soil Dyn. and Earth. Engineering*, 27, 843-854

Oztoprak, S., Bolton, M. D., (2013)."Stiffness of sands through a laboratory test database". Geotechnique, 63(1), 54-70.

Picarelli, L., Olivares, L., Di Maio, C., Silvestri, F., Di Nocera, S., Urciuoli, G. (2003) "Structure properties and mechanical behaviour of the highly plastic intensely fissured Bisaccia clay shale". *Characterisation and engineering properties of natural soils*.

Pitilakis, K., Anastasiadis, A., Raptakis, D., (1992) "Field and laboratory determination of dynamic properties of natural soil deposits". *Proc. 10th WCEE*

Santagata, M. C., (1998) "*Factors Affecting the Inıtial Stiffness and Stiffness Degradation of Cohesive Soils"* (Doktora Tezi). MIT, Cambridge, Massachusetts.

Santamarina, J. C., Klein, A., Moheb, A. F., (2001) Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring. New York: John Wiley Sons.

Sarğın, S.,(2019) "Zeminlerin Rijitlik ve Sönümleme Davranışının Tanımlanması ve Nümerik Modellemede Kullaılması" (Doktora Tezi). Istanbul University, Istanbul

Seed , H. & Idriss, I., (1970), "*Soil modulus and damping factors for dynamic response analyses",*Berkeley: EERC, University of California

Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., Tokimatsu, K., (1986) " Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soil". *Journal of Geotech. Eng., ASCE*, 112(GT11), 1016-1034.

Shibuya, S., Mitachi, T., (1994) "Small Strain Shear Modulus of Clay Sedimentation in a State of Normal Consolidation". *Soils and Foundations*, 34(4), 67-77

Sun, J. I., Golesorkhi, R., Seed, H. B., (1988) "*Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils*.", Univ. of California at Berkeley, Berkeley, California.

Vucetic , M. & Dobry, R., (1991), "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response". *Journal of Geotechnical Engineering,* Ocak, 117(1), pp. 89-117.

Vucetic, M., Lanzo, G., Doroudian, M., (1998) Effect of The Shape of Cyclic Loading on Damping Ratio at Small Strains. *Soils and Foundations*, 38(1), 111-120

Wang, G. X., Kuwano, J., (1999) "Modeling of strain dependency of shear modulus and damping of clayey sand". Soil Dyn. and Earthquake Eng., 18(6), 463-471

Yamashita, S., Toki, S., Shibuya, S., (1995) "Standardization of laboratory test methods to determine the cyclic deformation properties in Japan". Pre-failure Deformation of Geomaterials, Sappora.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
a	Modül azalım eğrisi eğrilik parametresi
CDSS	Tekrarlı direkt kesme deneyi
CTX	Tekrarlı üç eksenli deneyi
e_0	Başlangıç boşluk oranı
γ	Kayma birim deformasyonu (%)
γ_e	Elastik eşik kayma birim def. (%)
$\gamma_{0.5}$	Referans deformasyon (at G/G_0=0.5)
γ_r	Ref. Kayma def. (Matasovic & Vucetic, 1995)
σ	Standart sapma
τ	Kayma gerilmesi (kPa)
F	İstatistiksel F parametresi
G/G_0	Normalize kayma modülü

Sembol	Açıklama
G_0 ($G_{0,lab}$)	Başlangıç kayma modülü (MPa)
G_{sec}	Sekant kayma modülü (MPa)
K_0	Sükunette toprak basıncı katsayısı
AKO	Aşırı konsolidasyon oranı
PI	Plastisite İndisi
p´	Ortalama efektif gerilme
p_a	Atmosfer basıncı (100 kPa)
R^2	Regresyon katsayısı
RC/RCTS	Rezonant Kolon/ Burulmalı Kesme
TX	Statik üç eksenli deney
USCS	Birleştirilmiş Zemin sınıfı