

DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERİN BAĞLAŞIK HİDROMEKANİK DAVRANIŞLARINI HİDROLİK HİSTEREZİSİ KATARAK AÇIKLAYAN BİR BÜNYE MODELİ: UNSATURK 1.0

A CONSTITUTIVE MODEL EXPLAINING THE COUPLED HYDROMECHANICAL BEHAVIOR OF UNSATURATED SOILS INCLUDING HYDRAULIC HYSTERESIS: UNSATURK 1.0

M.Mert EYÜPGİLLER¹, Melih B. KENANOĞLU²,
M. B. Can ÜLKER³, N. Kartal TOKER⁴

ÖZET

Bu çalışmada doygun olmayan zeminler (DOZ) için mekanik ve hidrolik etkilerin birlikte ele alındığı bağlaşıklık bir teorik bünye modeli geliştirilmiştir. Model, DOZ su tutma davranışıyla birlikte, izotopik sıkışmayla oluşan boşluk oranı değişimlerine bağlı su tutma eğrilerini de aynı anda dikkate almaktadır. Gerilme durumu değişkenleri olarak bağımsız gerilme bileşenleri, net gerilme ve matrik emmeyi kullanan modelde, mekanik açıdan zemin iskeletinin sahip olduğu elasto-plastik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için klasik plastisite teorisi formülasyonu baz alınmıştır. Bu sayede modelde histeretik ıslanma-kuruma çevrimleri sırasında DOZ'da meydana gelen kalıcı hacimsel şekil değiştirmeler ve eş zamanlı değişen matrik emme üzerinden de elasto-plastik net gerilme-şekil değiştirme ilişkisi modellenabilmektedir. Ayrıca modelde bağlaşıklık için tek bir model parametresi ile toplam şekil değiştirme, doygunluk derecesi ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmada ayrıca deneysel olarak doğrudan DOZ hidrolik histerezis davranışı ölçülmüş ve teorik modele dahil edilmiştir. Bununla birlikte DOZ silt numuneleri üzerinde sabit su muhtevasında ve sabit emmede üç eksenli deneyler yapılmıştır. Bu kapsamda bir üç eksenli düzeneği, eksen öteleme tekniğiyle emme kontrolü yapacak şekilde dönüştürülmüştür. Bünye modeli sonuçları, bu çalışmada ve literatürde doygun olmayan zeminde yapılmış farklı üç eksenli deney sonuçlarıyla kalibre edilerek doğrulanmıştır. Sonuçta ülkemizde bir ilk olarak DOZ için hidromekanik bağlaşıklığı ve hidrolik histerezisi birlikte dikkate alan öncü bir bünye modeli başarıyla geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bağlaşıklık hidromekanik davranış, doygun olmayan zeminler, elasto-plastisite, hidrolik histerezis, su tutma davranışı

¹ Araş. Gör., İTÜ Afet Yönetimi Enstitüsü, eyupgillerm@itu.edu.tr

² Yük. Müh., ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, melihbirhankenoglu@gmail.com

³ Doç. Dr., İTÜ Afet Yönetimi Enstitüsü, mbulker@itu.edu.tr (sorumlu yazar)

⁴ Doç. Dr., ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, toker@metu.edu.tr

ABSTRACT

In this study, a coupled theoretical model was developed for unsaturated soils, where mechanical and hydraulic effects are considered together. The model simultaneously handles the water retention behavior of unsaturated soils and the change in retention curves due to void ratio changes during isotopic compression. The model uses independent stress variables, namely the net stress and matrix suction as stress state variables. It is based on the classical plasticity formulation via the elasto-plastic stress-strain relationship of the soil skeleton. This way, net stress-strain relationship can be modeled through the plastic volumetric deformations that occur during hysteretic wetting-drying cycles and the simultaneous change in matric suction. Additionally, total strain is associated with the degree of saturation with a single model parameter. The hydraulic hysteresis behavior is experimentally measured and included in the theoretical model. Moreover, triaxial tests are carried out on unsaturated silt samples at constant water content and suction, where, a triaxial assembly is converted to control suction via the axis translation technique. Finally, the constitutive model results are verified with experiments on unsaturated silt samples. As a result, a pioneering constitutive model, that considers hydromechanical coupling and hydraulic hysteresis, has been successfully developed for the first time in our country.

Keywords: *Coupled hydromechanical behavior, unsaturated soils, elasto-plasticity, hydraulic hysteresis, water retention behavior*

1. GİRİŞ

Üç fazlı geçirgen ortam olarak çalışılması gereken doymun olmayan zeminlerin (DOZ) hidromekanik davranışlarının anlaşılabilmesi amacıyla geliştirilen bünye modelleri, bütünleşik çerçevede yaklaşık son otuz yıldır geliştirilmektedir. Bu modellerin bazıları mekanik ve hidrolik etkenlerin beraber dikkate alındığı iki yönlü bağışık davranış modellerken, bazıları da yalnızca DOZ su tutma davranışında gözlenen hidrolik histerezisi dikkate almaktadır. Ancak her iki durumu da birlikte modelleyebilen bünye modelleri oldukça az sayıdadır.

Literatürdeki deneysel çalışmalardan çıkan ortak sonuç, emmenin zeminlerde gerilme-şekil değıştirme üzerinden rijitliği ve ayrıca mukavemeti artırıcı yönde rol oynadığıdır (Li, 2018; Patil, 2018; Nyunt, 2011; Sivakumar vd., 2010; Kayadelen, 2007; Thu vd., 2006; Miao, 2002; Cui ve Delage, 1996; Wheeler, 1995). Dolayısıyla emme arttıkça zeminlerde aynı miktarda, eksenel şekil-değıştirmeye karşı gelen gerilme de artmaktadır. Suya doymun zeminlerdeki gerilme-şekil değıştirme davranışının modellenmesinde kullanılan teoriler (örn. Klasik Plastisite Teorisi (KPT), Genelleştirilmiş Plastisite, Hipoplastisite, Sınır Yüzeyi Plastisite Teorileri v.b.) DOZ'da gerilme durumu seçimine göre emmenin etkisini katan parametrelerin eklenmesiyle kullanılabilir (Sheng, 2011). Barcelona Basic Modeli (BBM) Alonso vd. (1990)'da, suya doymun zeminlerin akma yüzeyini tanımlayan Modified Cam Clay (MCC) modeli ile, zeminin yenildiği durumdaki mekanizmayı tarifleyen Kritik Durum Teorisi'ne emme etkisini katarak başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu çalışmaya göre p' - q düzleminde akma yüzeyi, emme arttıkça hem $+p'$ hem de $-p'$ doğrultularında genişlemektedir.

DOZ gerilme durumu olarak bağımsız gerilme değişkenleri (net gerilme ve emme) yaklaşımını kabul eden çalışmalarda (Thu vd., 2007; Georgiadis vd., 2005; Chiu ve Ng, 2003; Wheeler ve Sivakumar; 1995; Alonso vd., 1990) hacimsel deformasyon ilişkisi şu şekilde alınmaktadır:

$$v = N - \lambda_{vp} \ln(p) - \lambda_{vs} \ln\left(\frac{s-u_{at}}{u_{at}}\right) \quad (1)$$

Burada λ_{vp} net gerilme etkisiyle meydana gelen sıkışabilirliği, λ_{vs} ise emme etkisiyle sıkışabilirliği ifade etmektedir. u_{at} ise doymuş durumda ($s = 0$ durumu) denklemin sonuç vermesi için eklenmiş atmosfer basıncıdır. Bu yaklaşımda net gerilme ve emmenin spesifik hacime etkileri birbirinden farklı katsayılarla etkiltilerek ayrılmaktadır. Bu özelliğiyle de modellemede esneklik sağlamaktadır. Ancak bazı modellerde doymuş durumdan doymuş olmayan duruma geçişte süreksizliği sebep olduğu için eleştiri almaktadır (Sheng, 2011).

DOZ için boşluk oranı ve net gerilmenin değişimi cinsinden ifade eden mekanik özellikler ile matrik emme ve hacimsel su muhtevası cinsinden ifade edilen hidrolik özelliklerin birbirlerini eş zamanlı etkilemesine *hidromekanik bağlaşıklık* (hydromechanical coupling) adı verilir. Literatürde mekanik ve hidrolik bileşenlerin birbirlerine bağlı değişimleri birçok araştırmacı tarafından farklı zemin tipleri için teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Barbour (1998), Romero (1999), Vaunat vd. (2000), zemin boşluk suyunun, biri büyük boşluklardaki serbest akabilen su, diğeri danelerarası tutunan su ile ilişkili iki mekanizma tarafından kontrol edildiğini anlatmışlardır. Bu iki mekanizma birbirlerinden bağımsızdırlar. İkinci durum, bağıl nemin kontrol edildiği deneysel yöntemlerde kendini gösterirken, birinci mekanizma matrik emmeyle ilişkili olduğu kadar zeminin statik tepkisi ile de ilişkilidir (Vaunat vd., 2000). Buna ek olarak, hidromekanik bağlaşıklık üzerine çalışan Wheeler vd. (2003) ile Sheng ve Zhou (2011) DOZ'da mevcut su muhtevasının mekanik davranış üzerinde etkili olduğunun altını çizmektedirler.

DOZ'un hidromekanik bağlaşıklık davranışını açıklamak üzere geliştirilen ilk modellerden biri Vaunat vd. (2000)'dir. Bu model BBM'de (Alonso vd., 1990) ilk kez kullanılan bağımsız gerilme bileşenleri cinsinden zemin iskeletinin şekil değiştirmesini tanımlamak için yeterli bulunmaktadır. Raveendiraraj (2009) ve Wheeler vd. (2003), modelde akma yüzeyi şekline bağlı olarak çevrelenen elastik bölgenin doğrulanması gerekliliğini vurgular. Varsayılan gerilme durumunun ise modelin kullanımı sırasında akma yüzeyleri (mekanik ve hidrolik) arasında eş zamanlı hareket sorununa sebep olabileceği iddia edilmektedir (Sheng, 2011). Sheng ve Fredlund (2008) bağlaşıklığın mekanik bileşeni için Klasik Plastisite Teorisini kullanırken hidrolik bileşeni, hacimsel su muhtevası-yapısal faz ilişkisi üzerinden (*intrinsic phase relationship*) zincir kuralı ile şu şekilde yazar:

$$d\theta = -\lambda_{ws} n \frac{ds}{s} + S_r d\varepsilon_v \quad (2)$$

Burada θ hacimsel su muhtevasını, λ_{ws} STE'nin eğimini temsil etmektedir. Bu çalışmada DOZ için mekanik ve hidrolik etkilerin birlikte ele alındığı bağlaşıklık bir teorik bünye modeli geliştirilmiştir. Modelde gerilme durumu değişkenleri olarak net gerilme ve matrik emme, bağımsız gerilme bileşenleri olarak alınmıştır. Model simülasyonlarında izotropik sıkışma davranışına öncelik verilirken, DOZ için elzem olan hidrolik histeresis davranışı modelin formülasyonuna dahil edilmiştir. Histeretik ıslanma-kuruma çevrimleri sırasında DOZ'da

meydana gelen kalıcı hacimsel şekil değiştirmeler ve eş zamanlı değişen matris emmeye bağlı net gerilme-şekil değiştirme ilişkisi modellenenbilmektedir. Çalışmanın deneysel kısmında DOZ su tutma davranışı ve izotropik sıkışma davranışı ölçülmüş, hem yapılan üç eksenli deneylerle hem de literatürden alınan deney verileriyle geliştirilen model tahminleri doğrulanmıştır.

2. GELİŞTİRİLEN MODELİN FORMÜLASYONU

Modelin elasto-plastik bileşeni için kullanılan ifadelerde ‘e’ üst indisi elastik, ‘p’ üst indisi plastik, ayrıca hidro-mekanik bileşenler için de ‘m’ alt indisi mekanik ve ‘h’ alt indisi hidrolik bileşenleri belirtmektedir. Buna göre şekil değiştirme bileşenleri şu şekilde yazılır:

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_h = \varepsilon_m^e + \varepsilon_m^p + \varepsilon_h^e + \varepsilon_h^p \quad (3)$$

Süreklilik koşulu net gerilmelerin, emmenin ve net gerilmelerden kaynaklı plastik şekil-değiştirmelerin (ε_m^p) türevleri ile yazılırsa:

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}}\right)^T d\bar{\sigma} + \frac{\partial f}{\partial h} \left(\frac{\partial h}{\partial \varepsilon_m^p}\right)^T d\varepsilon_m^p + \frac{\partial f}{\partial h} \left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)^T ds = 0 \quad (4)$$

elde edilir. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi toplam elastik şekil-değiştirme, net gerilme ve emme cinsinden bağıntı (4)’teki gibi yazılır:

$$d\varepsilon^e = (D^e)^{-1} d\bar{\sigma} + (\widehat{D}_h^e)^{-1} ds \quad (5)$$

Burada D^e elastik bünye matrisi, $(\widehat{D}_h^e)$ emme-şekil değiştirme için elastik matris, $(\widehat{D}_h^p)$ emme-şekil değiştirme için plastik matrisi ifade etmektedir. Bağıntı (3)’teki ikinci terim, κ_{vs} indeksiyle şu şekilde hesaplanır:

$$(\widehat{D}_h^e)^{-1} = \frac{\kappa_{vs}}{v} \frac{1}{(s+p_{atm})} \quad (6)$$

(5) ifadesinde şekil-değiştirme, kaynaklarına göre bileşenlerine ayrılır ve (6)’da yerine yazılırsa aşağıdaki ilişki elde edilir:

$$d\bar{\sigma} = D^e (d\varepsilon - d\varepsilon_m^p - d\varepsilon_h^p) + D_h^e ds = D^e (d\varepsilon - d\varepsilon_m^p) + D_h^{ep} ds \quad (7)$$

Bağıntı (7)’de D_h^e terimi nihai hidrolik elastik matristir ve ifadede hidrolik terimler birleştirilerek D_h^{ep} ’nin içerisine alınmıştır. Emme doğrultusundaki akma yüzeyi BBM’de olduğu gibi emme yüzeyine dik bir yüzey ($s=s_0$) olarak kabul edilir ve hidrolik şekil-değiştirmenin plastik bileşeni aşağıdaki gibi yazılır:

$$d\varepsilon_h^p = (\widehat{D}_h^p)^{-1} ds_0 \quad (8)$$

(6)’da emme kaynaklı plastik şekil-değiştirme emme doğrultusundaki akma yüzeyi ile bir plastik modül aracılığıyla ilişkilendirilmektedir. Burada kullanılan modül bağıntı (5)’e benzer yolla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$(\widehat{D}_h^p)^{-1} = \frac{\lambda_{vs} - \kappa_{vs}}{v} \frac{1}{(s_0 + p_{at})} \quad (9)$$

Bağıntı (4)'teki süreklilik koşulu klasik plastisite teorisine göre yazıldığında (7) denklemini aşağıdaki hali alır:

$$d\bar{\sigma} = D^e \left[I - \frac{\frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} \right)^T D^e}{\left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} \right)^T D^e \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} - \frac{\partial f}{\partial h} \left(\frac{\partial h}{\partial \varepsilon_m^p} \right)^T \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}}} \right] d\varepsilon + \left[\frac{-D^e \left(\left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} \right)^T D_h^{ep} + \frac{\partial f}{\partial h} \left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)^T \right) \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}}}{\left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} \right)^T D^e \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} - \frac{\partial f}{\partial h} \left(\frac{\partial h}{\partial \varepsilon_m^p} \right)^T \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}}} + D_h^{ep} \right] ds \quad (10)$$

Denklemin (10)'un, hidrolik tarafta yapılan gerilme ve şekil değiştirme değişkenleri kabulleri ile yeniden integrali alınır ve akma yüzeyi ($f=0$) ve plastik potansiyel fonksiyonu ($g=0$) olarak da Barcelona Basic Model (BBM) fonksiyonları kullanılırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} dv_{i+1} \\ dS_{r,i+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{\bar{p}_i} & -\frac{\lambda_{vs}}{(s_i + p_{atm})} \\ \frac{S_{r,i}}{n_i} \left(1 - \frac{B}{n S_r} \right)_i \frac{\lambda}{\bar{p}_i} & \left(\frac{\partial S_r}{\partial s} \right)_{STE_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\bar{p}_i \\ ds_i \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Burada ortalama net gerilme ($\bar{p}$) ve emme (s) gerilme tarafını, spesifik hacim (v) ve doygunluk derecesi (S_r) artımları da deformasyon tarafını temsil ederken ifade gerilme-kontrollü yapılan deneylerin simülasyonu düşünülerek şekil değiştirme-gerilme şeklinde yazılmıştır. Ayrıca i ve $i+1$ integrasyon adımlarıdır. Burada λ , v -ln $\bar{p}$ düzleminde sıkışma indeksi, λ_{vs} v -ln s düzleminde yazılan emme kaynaklı sıkışma indeksi, p_{atm} atmosfer basıncı, STE , DOZ su tutma eğrisi, B ise geliştirilen modelin su tutma ile ilişkili parametresidir. Bu B parametresi, aynı zamanda modelimizin klasik plastisite teorisine ek olarak ihtiyaç duyduğu tek yeni parametre olup, hidromekanik bağımlılığı sağlamaktadır.

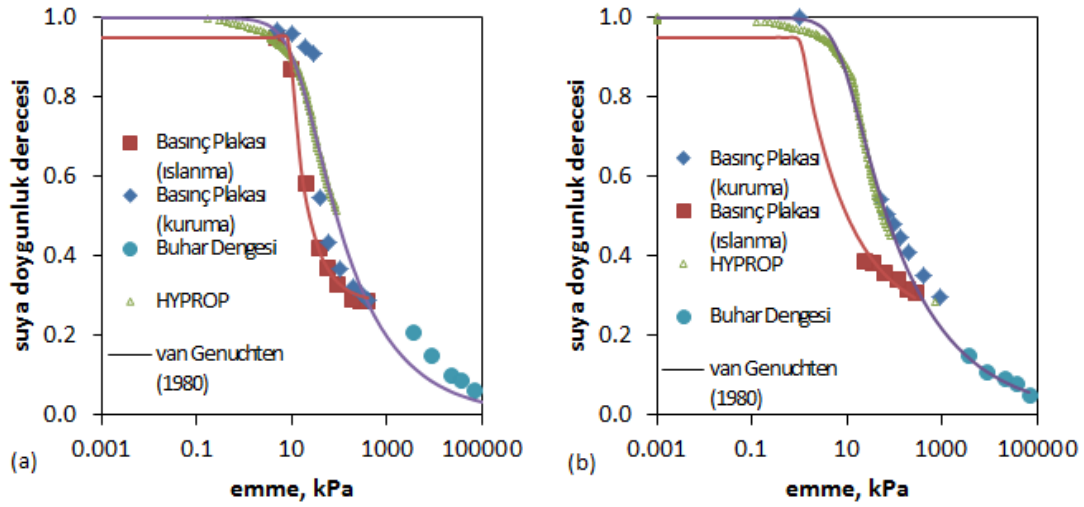
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Geliştirilen DOZ hidromekanik modelinde kullanmak üzere ıslanma-kuruma su tutma eğrileri ve DOZ üç eksenli deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında biri Mersin ilinden temin edilen, diğeri Elazığ depremi ardından bölgede yapılan incelemeler kapsamında örnek olarak alınan iki farklı düşük plastisiteli silt (ML) numunesi kullanılmıştır. Dane özgül yoğunluğu Mersin ve Elazığ siltleri için sırasıyla 2.725 ve 2.809 olarak ölçülmüştür. Bu siltlerle üç eksenli deney numuneleri hazırlanırken Ladd (1977) tarafından önerilen alt sıkıştırma yöntemi kullanılmıştır. Mersin silti numuneleri 0.102 başlangıç su muhtevasında (w_0), 0.72 başlangıç boşluk oranında (e_0) ve alt sıkıştırma yüzdesi 0.06 alınarak 10 tabakada hazırlanmıştır. Elazığ silti numuneleri ise $w_0=0.221$ ve $e_0=0.845$ olacak şekilde, aynı alt sıkıştırma yüzdesiyle 7 tabakada hazırlanmıştır.

3.1. Su Tutma Eğrisi Ölçümleri

Silt numuneleri için hem ıslanma hem de kuruma yönünde su tutma eğrileri çıkarılmıştır. Düşük emme değerlerinde (0-1000 kPa) basınç plakası yöntemi ve 1000 kPa'dan daha yüksek emmelerde buhar dengesi yöntemi kullanılmıştır. Basınç plakası yönteminde

Mersin silti numuneleri sıkıştırılarak 1 cm yüksekliğinde ve 3.6 cm çapında numuneler hazırlanmıştır. Islanma eğrilerinin tayini için numune önce 1000 kPa emme değerinde kurutulup ardından emme değeri istenilen değere düşürülmüştür. Numuneye su girişi yeterince yavaşlayınca, numune çıkarılıp su muhtevası ve kuru yoğunluğu ölçülmüştür. Kuruma eğrilerinin tayini için yine aynı şekilde sıkıştırılarak hazırlanmış numuneler basınç plakası üzerinde sıfır emme değerinde bekletilerek doyurulmuştur. Ardından kurutulmuş numuneden su çıkışı yeterince yavaşlayınca çıkarılıp su muhtevası ve kuru yoğunluk değeri ölçülmüştür. 1000 kPa'dan fazla emme değerleri için ise aynı şekilde hazırlanan numuneler doygün kimyasal çözeltileri konulmuş kavanozlarda kapalı olarak 2 hafta bekletilmiştir. Buhar dengesine ulaşıncı su muhtevası ve kuru yoğunluklar ölçülmüştür.



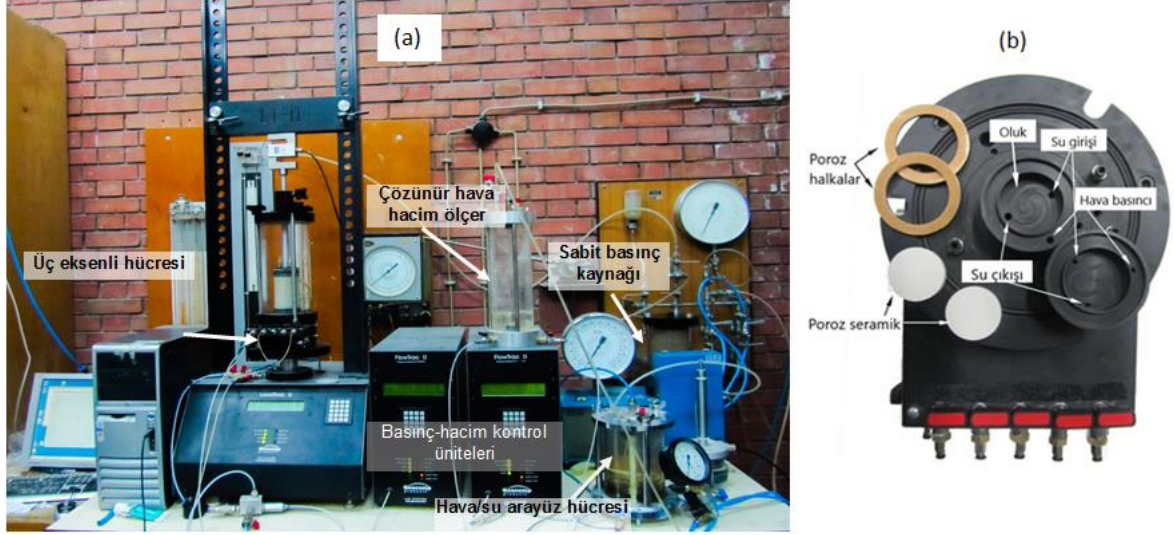
Şekil 1. (a) 0.72 Başlangıç boşluk oranındaki Mersin silti numunesi su tutma eğrileri, (b) 0.845 başlangıç boşluk oranında Elazığ silti numunesi su tutma eğrileri

Bu çalışmalarla beraber Mersin silti ve Elazığ silti numuneleri ile HyProp cihazında su tutma eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu tayini yapılmıştır. Bu cihazla yapılan ölçümlerden, 1966'da Wind'in önerdiği, 1980'de Schindler'in geliştirdiği "buharlaşıma yöntemi" ile zemine ait kuruma eğrisi çıkartılabilir. Yöntemde silindirik numunenin su muhtevası değişimi atmosfere açık olan üst yüzeyinden buharlaşmayla gerçekleşirken, iki farklı yükseklikteki tansiyometreler yardımıyla numune içindeki emmeler ölçülür ve bu sayede, kuruma yönündeki su tutma eğrisi (STE) çıkartılır. Her iki zemin türü için belirlenen su tutma eğrisi verisi Şekil 1'de gösterilmiştir.

3.2. DOZ Üç Eksenli Deneyleri

Silt numuneleri üzerinde sabit su muhtevasında ve sabit emmede DOZ üç eksenli deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda bir üç eksenli düzeneği, eksen öteleme tekniğiyle, emme kontrolü amacıyla dönüştürülmüştür (Şekil 2a). Su basıncı kontrolü için üç eksenli hücresinin başlık ve kaidesine 5 bar kapasiteli nano seramik yerleştirilmiş, hava basıncı için ise seramik çevresine gözenekli metal yerleştirilerek, hava basınç regülatörüyle kontrol edilmiştir (Şekil 2b). DOZ üç eksenli deneylerde ilk aşamada hedeflenen emme değerinde hava ve su basınçları arasında fark oluşturularak numune, emme dengesine getirilmiştir. İkinci aşamada izotropik sıkışmaya geçilmiş ve sabit hava basıncında hücre basıncı artırılarak net gerilme artışı sağlanmıştır. Sıkışmanın ardından kesme aşamasına geçilmiş

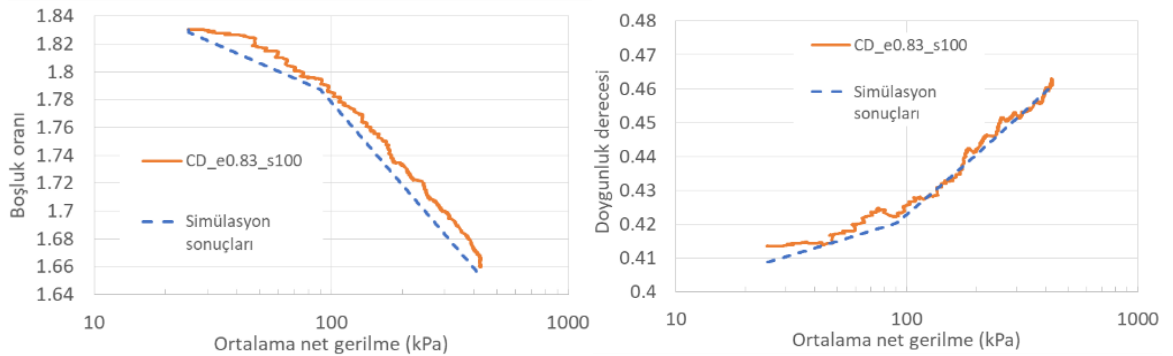
ve numuneye etkiyen deviatorik gerilme arttırılmıştır. Sıkışma ve kesme aşamaları sabit emme altında yapıldığında, hava ve su basıncı farkı sabit tutulmuştur. Bu aşamalar sabit su muhtevasında yapılmak istendiğinde ise hava basıncı drenajlı olarak sabit değerde kontrol edilirken, numune drenajsız tutulup su basıncı ölçülmüştür. DOZ deneylerinde izotropik yükleme ve kesme hızları deneme-yanılma yöntemi ile 0.02 kPa/dk ve 0.002 %/dk olarak seçilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, sonuçlar bölümünde anlatıldığı üzere geliştirilen hidromekanik model kapsamında kullanılmıştır.



Şekil 2. (a) Geliştirilen DOZ üç eksenli düzeneği, (b) DOZ üç eksenli hücre kaidesi detayı

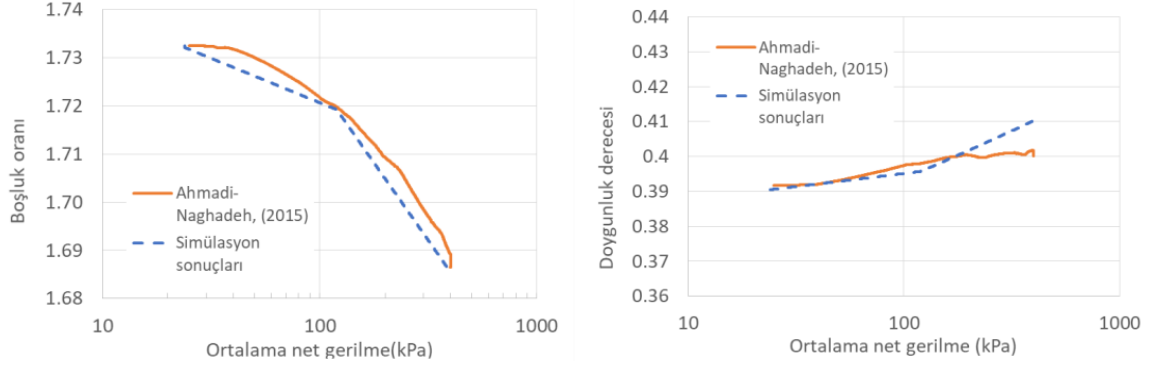
4. SONUÇLAR

Bu bölümde, yukarıda sunulan bağlaşıklık formülasyonu ile farklı emme ve başlangıç boşluk oranlarında izotropik sıkışma deneyleri modellenmiştir. Simülasyonlarda, geliştirilen modelin ve matematiksel formülasyonunun DOZ hidromekanik davranışını ne ölçüde doğrulukla modelleyebildiği araştırılmıştır. Şekil 3'te Mersin silti izotropik sıkışma davranışı modellenmiş, burada Şekil 2'de gösterilen deney düzeneği ile yapılan izotropik sıkışma deneylerinden (Ahmadi-Naghadeh, 2015) e_0 değerine karşı gelen bir tanesinin model parametreleriyle kalibre edilmiştir. Ardından simüle edilen sıkışma davranışında doygunluk derecesindeki değişim en fazla %2,5 hata ile yakalanmıştır (Şekil 4).

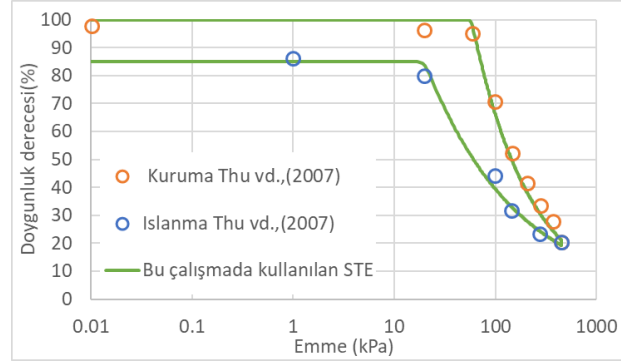


Şekil 3. Kalibre edilen Mersin silti üç eksenli sıkışma simülasyonu sonuçları, $e_0=0.83$, $s=100$ kPa

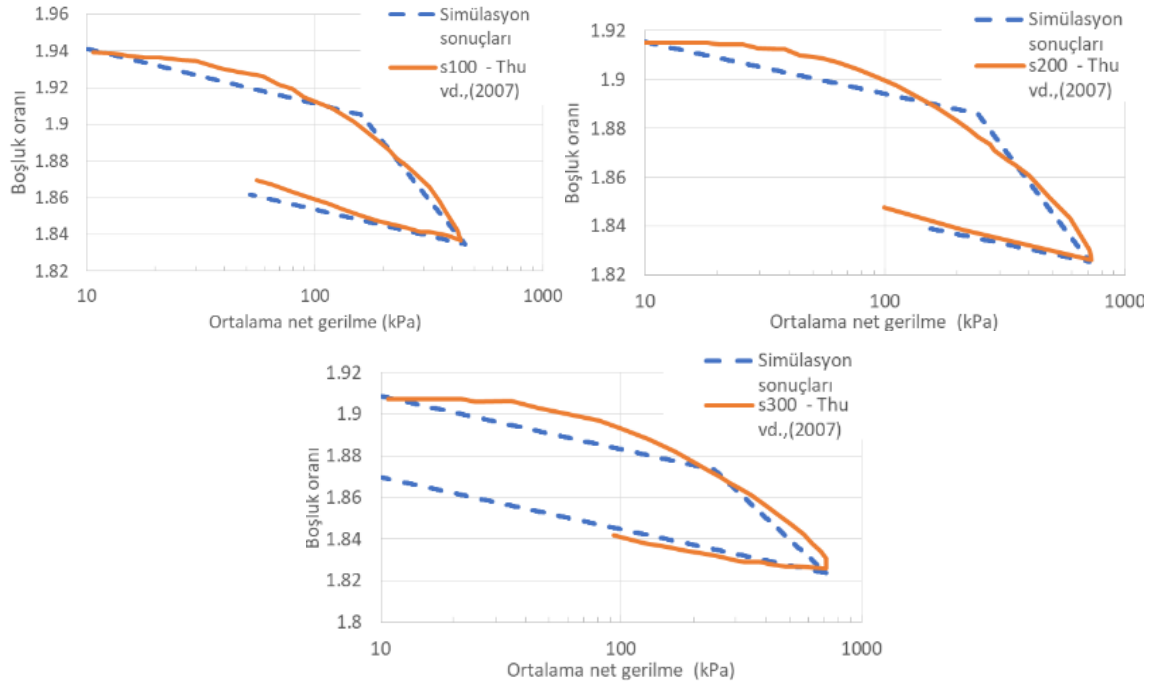
Bir diğer simülasyonda Thu vd. (2007) deneyleri kullanılmıştır. Sunulan deney setinden öncelikle farklı emmelerde (100, 200, 300 kPa) yapılan izotropik sıkışma deneylerinde kullanılan STE'ler kalibre edilmiştir (Şekil 5). Ardından deney sonuçları ile geliştirilen bünye modelinin tahminleri Şekil 6 ve 7'de karşılaştırılmıştır. Burada modelin boşaltmada oluşan doygunluk derecesi değişim trendini belli doğrulukta tahmin edebildiği görülebilir.



Şekil 4. Mersin silti simülasyonlarının deneylerle karşılaştırılması

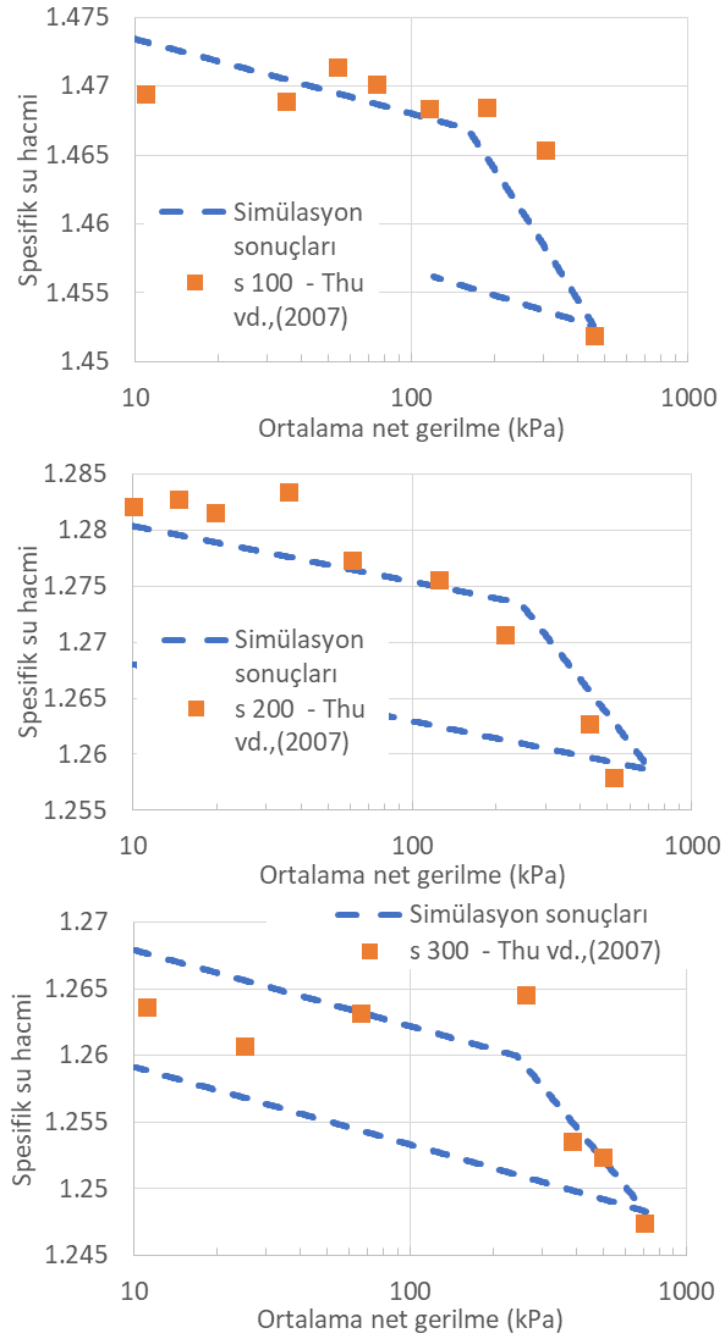


Şekil 5. Thu vd. (2007) ile kalibre edilen su tutma eğrileri

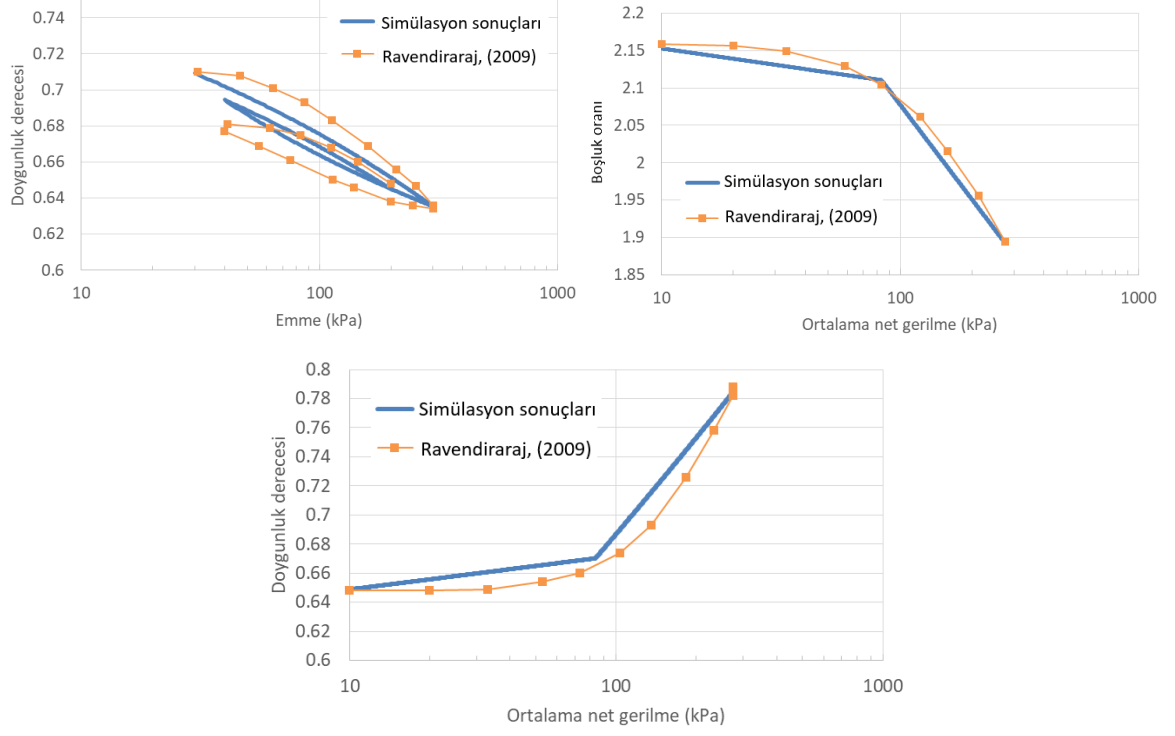


Şekil 6. Model sonuçları ile Thu vd. (2007) deneylerinin üç farklı emmede (s, kPa) karşılaştırılması

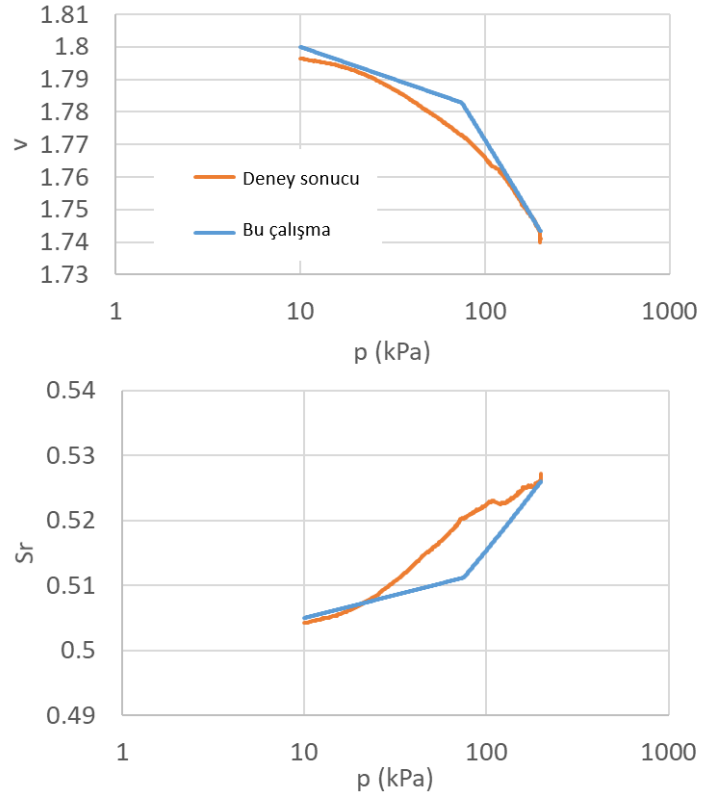
Diğer bir simülasyonda, Ravendiraraj (2009) deneyleri kullanılmıştır. Burada numune öncelikle emme çevrimine maruz bırakılmış, ardından ortalama net gerilme artırılarak izotropik sıkıştırılmıştır (Şekil 8). Bu simülasyon serisinde özellikle emme çevrimi yüklemelerinde ana eğrileri tahmin etmek, genel davranışı yakalamak açısından tek başına yeterli olmadığı için, geçiş eğrilerini doğru şekilde belirlemek de bu noktada büyük önem kazanmıştır. O nedenle Kenanoğlu ve Toker (2018) tarafından geliştirilen geçiş eğrileri kullanılmış, emme çevrimindeki hidrolik davranış daha hassas biçimde yakalanabilmiştir. Burada hidrolik yükleme çevrimi paralelinde gerçekleşen sıkışma fazında önemli ölçüde yakınlık sağlanmıştır (Şekil 8).



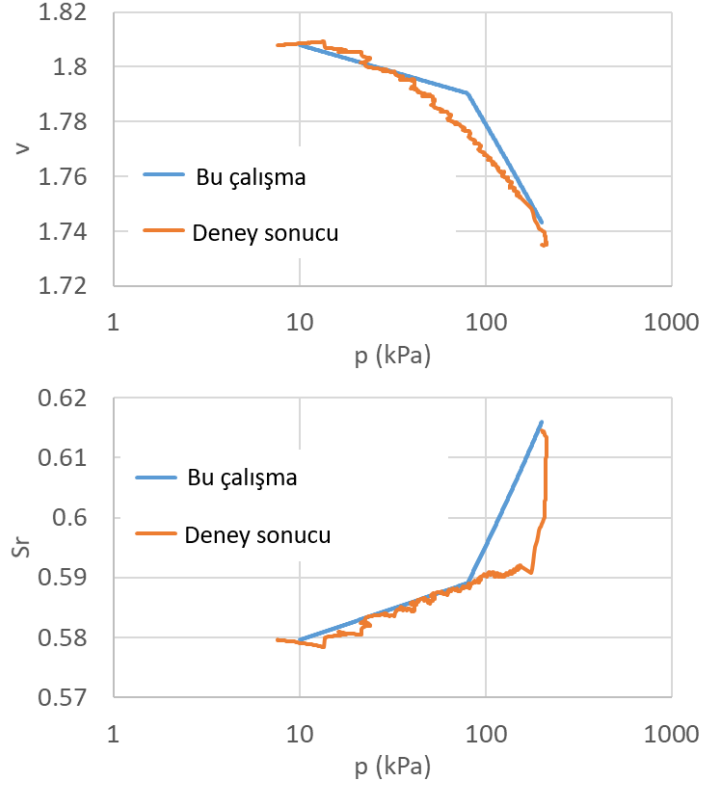
Şekil 7. Spesifik su hacminin net gerilmeye göre değişimlerinin üç emme değerinde modellenmesi



Şekil 8. İzotropik sıkışma ve karşı gelen doygunluk derecesi davranışlarının Ravendiraraj, (2009) deneyleri ile simülasyonu



Şekil 9. Elazığ siltiyle sabit 80 kPa emme altında yapılan izotropik sıkışma deneyi ve bünye modeli sonuçları



Şekil 10. Elazığ siltiyle 40 kPa sabit emmede yapılan izotropik sıkıştırma deneyi ve bünye modeli sonuçları

Yukarıda sunulan bünye modeli sonuçları, hem bu çalışmada yapılan, hem de literatürden alınmış doymun olmayan zeminlere ait üç eksenli deney sonuçlarıyla kalibre edilerek doğrulanmıştır. Sonuçta ülkemizde bir ilk olarak DOZ için hidromekanik bağışıklığı ve hidrolik histerezisi birlikte dikkate alan öncü bir bünye modeli başarıyla geliştirilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar 117M330 no'lu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında yapılan bu çalışma için TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR

- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405-430.
- Barbour, S. L. (1998). Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(5), 873-894.
- Chiu, C. F., & Ng, C. W. W. (2003). A state-dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils. *Géotechnique*, 53(9), 809-829.
- Cui, Y. J., & Delage, P. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46(2), 291-311.
- Georgiadis, K., Potts, D. M., & Zdravkovic, L. (2005). Three-dimensional constitutive model for partially and fully saturated soils. *International Journal of Geomechanics*, 5(3), 244-255.

- Kayadelen, C., Tekinsoy, M. A., & Taşkıran, T. (2007). Influence of matric suction on shear strength behavior of a residual clayey soil. *Environmental geology*, 53(4), 891-901.
- Kenanoğlu, M. B., & Toker, N. K. (2018). A formulation for scanning soil-water characteristic curves. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 901-906.
- Ladd, R. S. (1977). Specimen preparation and cyclic stability of sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(6), 535-547.
- Miao, L., Liu, S., & Lai, Y. (2002). Research of soil–water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil. *Engineering Geology*, 65(4), 261-267.
- Naghadeh, R.A. (2015). Hydro-mechanical behavior of unsaturated isotropically reconstituted specimens from slurry and compacted specimens. Doctoral dissertation, Middle East Technical University.
- Nyunt, T. T., Leong, E. C., and Rahardjo, H. (2011). “Strength and small-strain stiffness characteristics of unsaturated sand”. *Geotechnical Testing Journal*, 34(5), pp. 551-561, DOI: 10.1520/ GTJ103589, ISSN 0149-6115
- Patil, U. D., Puppala, A. J., Hoyos, L. R., & Banerjee, A. (2018). Strength, stiffness and radial anisotropy of compacted silty sand under suction-controlled axisymmetric shearing. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(6), 3945-3960.
- Raveendraraj, A. (2009). Coupling of mechanical behaviour and water retention behaviour in unsaturated soils (Doctoral dissertation, University of Glasgow).
- Romero Morales, E. E. (1999). Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Schindler, U., & Müller, L. (2006). Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *Journal of plant nutrition and soil science*, 169(5), 623-629.
- Sheng, D. (2011). Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour. *Computers and Geotechnics*, 38(6), 757-776.
- Sheng, D., & Zhou, A. N. (2011). Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(5), 826-840.
- Sivakumar, V., Murray, E. J., & Tripathy, S. General report: Fundamental soil behaviour (Part II)—a wider perspective of hydro-mechanical and thermal behaviour of unsaturated soils.
- Thu, T. M., Rahardjo, H., & Leong, E. C. (2006). Effects of hysteresis on shear strength envelopes from constant water content and consolidated drained triaxial tests. In *Unsaturated soils 2006* (pp. 1212-1222).
- Thu, T. M., Rahardjo, H., & Leong, E. C. (2007). Soil-water characteristic curve and consolidation behavior for a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 266-275.
- Vaunat, J., Romero, E., & Jommi, C. (2000). An elastoplastic hydromechanical model for unsaturated soils. *Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils*, Balkema, Rotterdam, 121–138.
- Wheeler, S. J., & Sivakumar, V. (1995). An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Géotechnique*, 45(1), 35-53.
- Wheeler, S. J., Sharma, R. S., & Buisson, M. S. R. (2003). Coupling of hydraulic hysteresis and stress–strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, 53(1), 41-54.
- Wind, G. P. (1966). Capillary conductivity data estimated by a simple method (No. 80).