



A hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils considering hydraulic hysteresis based on coupled elasto-plastic formulation

Mustafa Mert Eyüpgiller^{ID}, Mehmet Barış Can Ülker^{ID}

Earthquake Engineering Department, Disaster Management Institute, Istanbul Technical University, 34469, Maslak, Istanbul, Türkiye

Highlights:

- Constitutive modeling of unsaturated soils
- Coupled hydromechanical behavior
- Powerful yet simple mathematical formulation
- Hydraulic hysteresis

Keywords:

- Constitutive modeling
- Elasto-plasticity
- Hydro-mechanical behavior
- Unsaturated soils
- Triaxial testing

Article Info:

Research Article

Received: 01.02.2022

Accepted: 02.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1066034

Acknowledgement:

This study was carried out with the support of TÜBİTAK 1001 research project numbered 117M330 titled "Constitutive Modeling of Static Behaviors of Unsaturated Soils and Their Use in Engineering Applications". The authors would like to thank TÜBİTAK.

Correspondence:

Author: Mehmet Barış Can Ülker
e-mail: mbulker@itu.edu.tr
phone: +90 533 620 7563

Graphical/Tabular Abstract

Successful prediction of unsaturated soil behavior is a complicated task as the simultaneous effect of net stress and matric suction on degree of saturation and void ratio needs to be considered. Although, numerous constitutive models are developed to capture the hydro-mechanical behavior, these models either lack sufficient accuracy in simulating the fundamental behavior of unsaturated soils or rely on a formulation that is too complex to yield accurate results. Therefore, there still need coherent theoretical models backed by efficient algorithms for understanding the hydro-mechanics of unsaturated soils. This study introduces such a sound hydro-mechanical model based upon elasto-plasticity including hydraulic hysteresis.

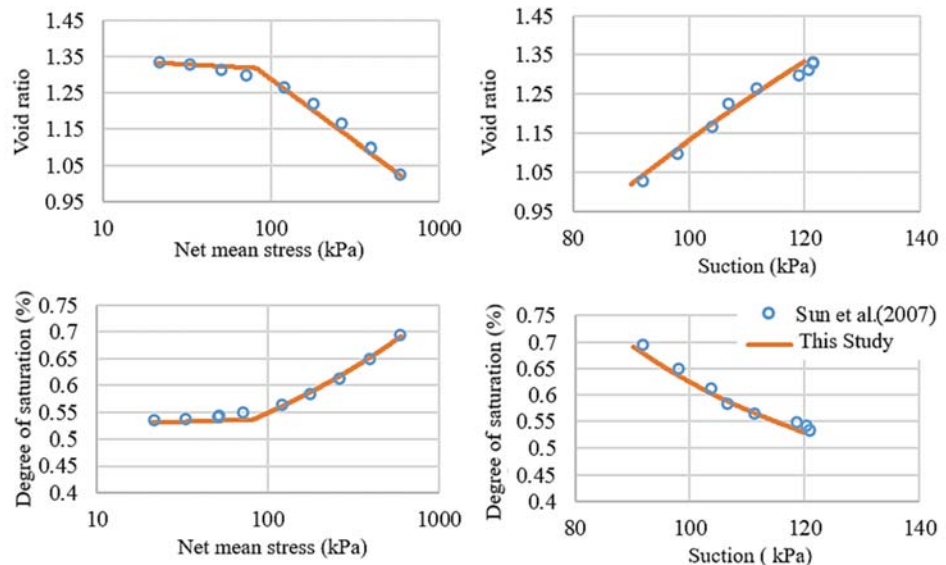


Figure A. Comparison of simulation and the CW test results of Sun et al (2007)

The proposed model relies on a relatively straight forward yet powerful formulation compared to similar models of its kind. The model needs material parameters that require only a handful of triaxial tests to obtain. Particular attention is given to the effect of change in void ratio on the water retention behavior. An efficient explicit scheme is utilized in integrating the model, where a number of unsaturated triaxial tests at constant suction and constant water content are simulated under various net stress and suction paths. Verification analyses result in good accuracy showing the capability of the proposed model for unsaturated soils.

Purpose: The aim of this study is to capture the hydromechanically coupled behavior of unsaturated soils in a numerically practical way.

Theory and Methods: A model that is governed by the independent stress variables is formed within the Classical Plasticity Theory framework. A series of constant suction and constant water content triaxial tests are simulated in order to verify the model.

Results: The model accurately estimated the behavior of the simulated triaxial tests on clays and silts. With no additional parameters, it also captured the constant water content triaxial tests.

Conclusion: An alternative constitutive model that can be used in engineering applications is obtained.



Doygun olmayan zeminler için bağlaşıklık elasto-plastik formülasyona dayalı hidrolik histerezisi dikkate alan hidro-mekanik bir bünye modeli

Mustafa Mert Eyüpgiller^{ID}, Mehmet Barış Can Ülker^{ID}

İstanbul Teknik Üniversitesi, Afet Yönetimi Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Doygun olmayan zeminlerin bünyesel modellemesi
- Hidrolik histerezis içeren bağlaşıklık hidromekanik davranış
- Güçlü ancak basit matematiksel formülasyon

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.02.2022

Kabul: 02.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1066034

Anahtar Kelimeler:

Bünye modellemesi,
doygun olmayan zeminler,
elasto-plastisite,
hidromekanik davranış,
üç eksenli deney

ÖZ

Doygun olmayan zemin davranışının başarılı bir şekilde tahmini, net gerilme ve matrik emmenin doygunluk derecesi ve boşluk oranı üzerindeki eşzamanlı etkisinin dikkate alınması gerektiğinden oldukça karmaşıktır. Hidromekanik davranışı yakalayabilmek için çok sayıda bünye modeli geliştirilmiş olmasına rağmen, bu modeller ya doymayan zeminlerin temel davranışını simüle etmede yeterli doğruluktan yoksundur ya da sonuçların doğruluğunu etkileyecek seviyede karmaşık bir formülasyona dayanmaktadır. Bu nedenle, doymayan zeminlerin hidromekanik davranışını anlamak için verimli algoritmalarla desteklenen tutarlı teorik modellere hala ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, hidrolik histerezis de dahil olmak üzere elasto-plastisiteye dayalı hidro-mekanik bir model geliştirilmiştir. Önerilen model, kendi türündeki benzer modellere kıyasla daha basit ancak güçlü bir matematiksel formülasyona dayanmaktadır. Model, elde etmek için az sayıda üç eksenli deney gerektiren malzeme parametrelerine ihtiyaç duyar. Çalışmada özellikle boşluk oranındaki değişimin su tutma davranışları üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Modelin integrasyonunda, çeşitli net gerilme ve emme izleri altında sabit emme ve sabit su muhtevasında yapılmış bir dizi doymayan üç eksenli deneyin simüle edildiği verimli bir açık integrasyon algoritması geliştirilmiştir. Doğrulama analizleri, doymayan zeminler için önerilen modelin kapasitesini gösterecek şekilde iyi sonuçlar vermiştir.

A hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils considering hydraulic hysteresis based on coupled elasto-plastic formulation

H I G H L I G H T S

- Constitutive modeling of unsaturated soils
- Coupled hydromechanical behavior with hydraulic hysteresis
- Powerful yet simple mathematical formulation

Article Info

Research Article

Received: 01.02.2022

Accepted: 02.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1066034

Keywords:

Constitutive modeling,
elasto-plasticity,
hydro-mechanical behavior,
unsaturated soils,
triaxial testing

ABSTRACT

Successful prediction of unsaturated soil behavior is a complicated task as the simultaneous effect of net stress and matric suction on degree of saturation and void ratio needs to be considered. Although, numerous constitutive models are developed to capture the hydro-mechanical behavior, these models either lack sufficient accuracy in simulating the fundamental behavior of unsaturated soils or rely on a formulation that is too complex to yield accurate results. Therefore, there still need coherent theoretical models backed by efficient algorithms for understanding the hydro-mechanics of unsaturated soils. This study introduces such a sound hydro-mechanical model based upon elasto-plasticity including hydraulic hysteresis. The proposed model relies on a relatively straight forward yet powerful formulation compared to similar models of its kind. The model needs material parameters that require only a handful of triaxial tests to obtain. Particular attention is given to the effect of change in void ratio on the water retention behavior. An efficient explicit scheme is utilized in integrating the model, where a number of unsaturated triaxial tests at constant suction and constant water content are simulated under various net stress and suction paths. Verification analyses result in good accuracy showing the capability of the proposed model for unsaturated soils.

1. Giriş (Introduction)

Doygun olmayan zeminlerin (DOZ) davranışı, geoteknik mühendisliğindeki birçok problem için önemli bir yer tutar. Doygun olmayan zemin mekanik özelliklerini, suya doygun zemine atmış gibi modelleyen mevcut geoteknik uygulamaları, bu tür zeminlerin su muhtevastındaki potansiyel artış nedeniyle ekonomik olmayan tasarımı sonuçlanmaktadır. Bu durum da artan risklere neden olur. Öte yandan, normal durumda doğal su muhtevastında kısmen doygun durumda olan doğal zemin, laboratuvarda doyurulduğunda esasen fazlaca yumuşayarak istenmeyen aşırı tasarıma yol açabilmektedir. Zira sahada bu doymamış zeminlerin alındıkları tabakaların, mevsimsel değişiklikler nedeniyle tam olarak doyması beklenmemektedir. Bu tür zeminlerin hidro-mekanik davranışlarını kontrol eden faktörler, DOZ'un daneli, çok fazlı, heterojen ve doğrusal olmayan doğası nedeniyle oldukça karmaşıktır. Özellikle, hacim değişimi-doygunluk derecesi ilişkisi, boşluk hava basıncı ve boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanan matrik emmenin bir fonksiyonu olarak DOZ'un önemli özellikleri arasındadır.

'Doygun olmayan zemin mekaniği' alanındaki gelişmeler, 'klasik zemin mekaniği'nin gerisinde kalmıştır ve DOZ üzerine olan çalışmalar ancak son birkaç on yılda önem kazanmıştır. 1990'ların başından beri DOZ ile ilgili birçok araştırma çalışması olmasına rağmen, hidromekanik davranışı anlamak için yapılacak birçok deneysel ve teorik çalışmaya halen ihtiyaç vardır. 1950'lerin başlarından başlayarak, yarım yüzyılı aşkın bir süre önce, özellikle yeraltı suyu seviyesinin üzerindeki zemin tabakaları için geniş bir uygulama alanı bulan DOZ'un bünye modellemesine dikkat çekilmiştir [1–4]. İyi bilinen Barcelona Basic Model (BBM) [5], o dönemde ilk kez mevcut dağılık teorileri sağlam bir elasto-plastik çerçeve içinde birleştiren bu alandaki öncü çalışma olarak kabul edilir. Buna takip eden yıllarda, farklı teorik temellere dayanan ve farklı kapsamlarda birçok model geliştirilmiştir [6–9]. Bu modellerden ilk büyük ayrılma, gerilme durumlarına göre ayırt edilen iki ana çalışma grubu olmuştur. Bir grup, gerilme durumunun tek bir terimle (örn. efektif gerilme) ifade edilebileceğini varsayarken [10–13] efektif gerilme ilkesine [14] ve onun DOZ için genişletilmiş haline [2] dayanmaktadır. Diğer grup, net gerilme, $\bar{p}$ olarak adlandırılan modifiye toplam gerilmenin ve matrik emme, s , ile DOZ gerilme durumunun bağımsız olarak kontrol edildiğini öne sürmektedir [15–18]. İlk yaklaşım, “efektif gerilme yaklaşımı” olarak adlandırılırken, ikincisi “bağımsız gerilme değişkenleri yaklaşımı” olarak tanımlanır. Yıllarca süren tartışmalar ve her iki tarafa geliştirilen birçok başarılı modelden sonra, DOZ davranışının teorik modellemesi ve hesaplamalı analizi açısından her iki gerilme durumunun değerine göre kendi avantajları olduğu ortak kanısına varılmıştır [19–21].

Gerilme durumunun yanı sıra, DOZ'da önemli bir diğer konu, su tutma davranışında mekanik kısmı da etkileyen hidrolik histerezis olmasıdır. Hidrolik histerezis, ister emme ister zeminin net gerilme geçmişi açısından olsun, zeminin daneler sıkışmasını da kontrol eden mekanik kısmına doygunluk derecesinin bağımlılığını gösteren bir zemin-su özelliğidir. Geoteknik mühendisleri ve zemin bilimciler [16, 22–24] sıklıkla zemin-su karakteristik davranışına ihtiyaç duyarlar. Birçok araştırmacı, zemin gözenek suyunu iki mekanizma ile ilişkili olarak tanımlar. Bunlar; gözeneklerden serbestçe akabilen su ve zemin danelerine tutunan sudur [6, 25, 26]. Bu iki mekanizma bağımsızdır; ilki hem zeminin statik tepkisi hem de emme ile ilgilidir [6], ikincisi ise bağıl nemin kontrol edildiği deneysel yöntemlerde kendini gösterir. Deneysel çalışmalar, su tutma davranışının boşluk oranı ve ortalama net gerilme tarafından değiştirildiğini göstermektedir. Ek olarak, ortalama net gerilme değiştiğinde su muhtevastı ve doygunluk derecesi de değişir [16, 21, 27, 28]. Sonuç olarak, birçok modelin bu davranışlar için sabit adsorpsiyon/desorpsiyon oranları tanımlayarak

DOZ'un elastik ve elasto-plastik davranışı arasında bir ayrım yapması gerekir [10, 16, 29, 30]. Bu yaklaşımın avantajı basitliği olsa da, doygun duruma geçişte süreklilik sağlamaz [18]. Diğer araştırmacılar, Sınırlayan Yüzey Teorisi'nin kullanıldığı modellerdekine benzer şekilde, bu sorunun üstesinden gelmek için kendi su tutma modellerini geliştirmişlerdir [31–33].

DOZ bünye davranışını anlamak için bir hidrolik bileşenin dahil edilmesi gerekliliği, DOZ çalışmalarının başlangıcından bu yana birçok kişi tarafından iyi bilinmektedir [34, 35]. Daha sonra Vaunat vd. [6] tarafından önerilen model, hidro-mekanik açıdan ilk bağlaşıklık (coupled) modellerden biri olarak kabul edilebilir. Bu model, gözenek suyu hacmindeki değişiklik dikkate alındığında, genellikle "hacimsel su muhtevastı", $\square$ olarak da bilinen terime eşit olan ve 'hidrolik şekil değiştirme' adı verilen ek bir parametre ile, ϵ_w , zeminin iskelet yapısının şekil değiştirmesini tanımlar. Bu çalışmadan sonra, DOZ'un bağlaşıklık hidromekanik davranışını açıklamak için birçok girişimde bulunulmuştur [8, 19, 36, 37]. Wheeler vd. [10], bir su tutma işlevine ihtiyaç duymadan iki bağlantı parametresi kullanır ve gerilme değişkenleri olarak efektif gerilme ve değiştirilmiş emmeyi kullanır. Khalili vd. [38], DOZ üzerindeki döngüsel yüklemenin etkisini modellemek için bir Sınırlayan Yüzey Plastisitesi çerçevesi ile efektif gerilme yaklaşımını kullanır. Li vd. [39] ayrıca Wheeler vd.'e [10] dayalı Sınırlayan Yüzey Plastisitesi çerçevesinde efektif gerilmeyi benimser. Zemin-su tutma davranışının logaritmik ölçekte doğrusal kaldığını varsayarak basitlik sağlarlar. Zhou [40], gerilme ve doygunluk derecesi, S_r 'ye bağlı bir hacim değişim ilişkisi önerirken S_r 'yi ayrı bir değişken olarak kullanarak DOZ davranışına alternatif bir yaklaşım izler. Liu vd. [41], hidromekanik bağlaşıklık davranışını modellerine termal değişiklik etkilerini dahil ederek çalışmıştır. Çalışmaları, hidrolik ve mekanik bileşenler açısından Wheeler vd.'e [10] dayanmaktadır. En yeni hidro-mekanik modellerden biri, DOZ mekaniksel gerilme-şekil değiştirme ilişkisini laboratuvar deneylerini başarılı bir şekilde simüle eden BBM'ye dayandıran Kodikara vd. [8] tarafından sunulmaktadır. Bu modeller DOZ'un hidromekanikliği için bağlaşıklık formülasyonlar sağlarken, kontrollü emme ve net gerilme değerleri altında hidrolik veya mekanik yüklem döngüleri olduğunda gereklidir. Bu yüklem yollarını içeren daha pratik durumlar için, su tutma davranışı üzerindeki net gerilme veya boşluk oranı değişikliklerini hesaba katan sahada daha basit formülasyonlara da ihtiyaç vardır.

Gallipoli vd. [42] zemin hacmindeki değişimin doygunluk derecesi üzerindeki etkisini su tutma fonksiyonunu değiştirme yoluna giderek uygulamak üzere yeni bir yöntem sunar. Bu yöntem daha sonra hidrolik histerezis eklenerek geliştirilmiştir [29]. Ayrıca Gallipoli vd. [32] ise histeretik su tutma eğrisini elde etmek için Gallipoli vd. [42] ve Gallipoli [29] adımlarını takip eder. Bununla birlikte, bu modeller, matematiksel formülasyonlarında nispeten yüksek hesaplama maliyetlerinden muzdariptirler. Ayrıca, Bruno ve Gallipoli [43], Gallipoli vd. [32] ile aynı hidrolik fonksiyonu, DOZ hidro-mekanikliğinin modellenmesine izin veren yinelemeli bir prosedürde kullanır. Bu da potansiyel olarak hesaplama maliyetini artırır. Sheng ve Zhou [17] hidrolik bileşeni mekanik girdi ile birleştiren ve bünyesel ilişkilerden türetilen gerekli denklemleri sağlayan bağımsız gerilme değişkenleri yaklaşımını kullanarak nispeten basit bir model sunmuştur. Bununla birlikte, bu modellerin doğruluğu, bu çalışmada önerilen modele kıyasla net gerilme döngüleri sırasında bir miktar azalmaktadır. D'onza vd. [20] DOZ'un hidro-mekanik davranışını deneysel çalışmak üzere “Mechanics of Unsaturated Soils for Engineering (MUSE)” grubunu bir araya getirmiştir. Gupta, 'UGLAS-1' (Glasgow Üniversitesi) ekibi, 'mekanik olarak ayrıştırılmış' bir formülasyon olarak BBM'yi benimsemiştir. UGLAS-1, gruptaki diğer 'bağlaşıklık modelleri' kıyasla doğruluğu ile öne çıkmaktadır. Maşin [44] hacimsel deformasyonun doygunluk derecesi üzerindeki etkisini tek yönlü bir bağlaşıklık ile sağlamıştır. Ancak

hidrolik histerezis eksikliğinden dolayı hidrolik yüklem-boşaltma çevrimlerini yakalayamamıştır. Bu çalışmada önerdiğimiz model ile hidrolik histerezis etkisi açık bir şekilde dahil edilmiştir. Ng vd. [18] bağımsız gerilme değişkenleri yaklaşımını benimseyen bağlaşıklık davranışı yakalamak için teorik bir model önermiştir. Çalışmanın hidrolik bileşeni, net ortalama gerilmenin neden olduğu doyunluk derecesi değişikliklerini hesaplar. Sundukları model, Zhou ve Ng'de [45] olduğu gibi sadece gerilmeye bağlı bir su tutma eğrisi (STE) sunarken, net gerilme yüklemesi sırasında zemini terk eden boşluk suyu miktarı hariç, doyunluk derecesinin STE üzerinde kaldığını varsaymaktadır. Bu şekilde yalnızca tek bir STE güncellenebilmektedir. Bu çalışmada önerdiğimiz model ise, boşluk suyu için bu özelliği de kapsayarak, net ortalama gerilme nedeniyle değişmiş doyunluk derecesi üzerinden hidrolik histerezisin gözlenmesine izin verir. Bu sayede de DOZ hidrolik bileşeninde STE'ye bağlı doğru hesaplamalar yapabilmektedir. Burada sunduğumuz formülasyonun avantajı budur.

Bu çalışmada, hidrolik histerezis dikkate alınarak hidromekanik DOZ davranışı için formülasyonu mevcut yöntemlere göre basitleştirilmiş bir bünye modeli geliştirilmiştir. Önerilen modelde, net gerilme ve emmenin neden olduğu doyunluk derecesi değişimlerini tahmin edebilen elasto-plastisite teorisi kullanılmıştır. Önerilen model, bağımsız gerilme değişkenleri kullanan mevcut benzer modellere kıyasla doğruluğu yüksek bir teori sunmaktadır. Net gerilme ve doyunluk derecesi arasındaki ilişki, doyun olmayan üç eksenli deneyler yoluyla elde edilebilen tek bir model parametresi ile sağlanmaktadır. Model, kullanılan zemin-su tutma eğrisine bağlı olarak mekanik kısım için toplam onbir parametre ve hidrolik kısım için de kullanılacak STE'ye bağlı olarak en az üç parametre gerektirir. Klasik zemin laboratuvar deneylerinden drenajlı üç eksenli basınç ve su tutma deneyleri ile tüm parametreler elde edilebilir. Çalışmada, boşluk oranındaki değişimin su tutma davranışı üzerindeki etkisine özellikle dikkat edilmiş, çeşitli net gerilme ve emme izleri için sabit emme ve sabit su muhtevası koşullarında bir dizi doyun olmayan üç eksenli deney simüle edilmiştir.

2. Doyun Olmayan Zeminlerin Hidro-Mekanik Davranışları (Hydro-Mechanical Behavior of Unsaturated Soils)

DOZ, heterojen, üç fazlı ve daneli yapıları nedeniyle gerilme-şekil değiştirme ilişkisi açısından bağlaşıklık sergiler. Hacimsel su muhtevasının (veya doyunluk derecesinin) mekanik davranışı yöneten net gerilme-toplam şekil değiştirme ilişkisi üzerindeki etkisi ve ayrıca toplam şekil değiştirmenin (veya net gerilmenin) hidrolik bileşeni yöneten STE üzerindeki etkisi eş zamanlı olarak modellenmelidir. Bu nedenle, bu bağlı davranış, fiziksel özelliklerine göre mekanik kısım ve hidrolik kısım olarak iki ana bileşene ayrılmalıdır. Bu davranışlar, net gerilme ve matrik emme gibi gerilme alanı değişkenleri ve katı iskelet deformasyonu ve zeminin doyunluk derecesi gibi şekil-değiştirme değişkenleri ile doğrudan ilişkilidir. Böyle karmaşık bir davranış, temel düzeyde çalışan fenomenolojik bir bünye modeli ile yakalanması gereken DOZ davranışına karşı gelir.

2.1. Bağlaşıklık Davranışın Mekanik Bileşeninin Modellenmesi (Modeling the Mechanical Component of Coupled Behavior)

Bu çalışmada, gerilme durumu için bağımsız gerilme değişkenleri yaklaşımını kullanıyoruz. Bu nedenle, DOZ'un mekanik davranışı, katı iskeletin toplam deformasyonu (hacimsel ve deviatorik) ve ilişkili net gerilme ve emme cinsinden gerilmedeki artan değişim tarafından yönetilir. Toplam deformasyon iki kısım halinde yazılmıştır. Mekanik kısım olarak da adlandırılan ('m' alt simgeli) toplam gerilmedeki değişim ve hidrolik kısım olarak adlandırılan ('h' alt simgeli) emmedeki değişim. Bu nedenle, elastik ve plastik bileşenlerden oluşan deformasyon ayrışmasını sırasıyla 'e' ve 'p' üst simgeleriyle yazarak başlanırsa Eş. 1 elde edilir.

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_h = \varepsilon_m^e + \varepsilon_m^p + \varepsilon_h^e + \varepsilon_h^p \quad (1)$$

Toplam şekil değiştirmenin elastik bileşeni Eş. 2'deki gibi hesaplanır.

$$d\varepsilon^e = d\varepsilon_m^e + d\varepsilon_h^e = (D^e)^{-1} d\bar{\sigma} + (\widehat{D}_h^e)^{-1} ds \quad (2)$$

Burada, D^e mekanik bileşenin gerilme-deformasyon ilişkisi için elastik bünye matrisidir ve $\widehat{D}_h^e$ Eş. 3'teki gibi hesaplanır.

$$\widehat{D}_h^e = -\frac{\kappa_s}{v(s+p_{atm})} \quad (3)$$

Burada v spesifik hacim, s , matrik emme, κ_s DOZ için sıkışma eğrisinin elastik eğimi ve p_{atm} referans atmosfer basıncıdır. Hidrolik kısmın emme-deformasyon ilişkisi için elastik modülü D_h^e Eş. 4'teki gibi tanımlanır.

$$D_h^e = -D^e (\widehat{D}_h^e)^{-1} \quad (4)$$

Eş. 2'yi yeniden düzenledikten sonra, gerilme-deformasyon ilişkisi, net gerilme artışı $d\bar{\sigma}$ ve toplam şekil değiştirme vektörü, $d\varepsilon$, cinsinden Eş. 5'teki formu alır.

$$d\bar{\sigma} = D^e (d\varepsilon - d\varepsilon^p) + D_h^e ds \quad (5)$$

Alonso vd. [5] emme artışı akma yüzeyini (SI- suction increase) $s=s_0$ 'da emme eksenine dik bir düzlem olarak tanımlar ve bu, emme değişiminin neden olduğu plastik deformasyon artışını hesaplamamıza yardımcı olur. Bu nedenle, plastik deformasyonun hidrolik bileşeni için Eş. 6'daki ifadeyi yazabiliriz.

$$d\varepsilon_h^p = (\widehat{D}_h^p)^{-1} ds \quad (6)$$

Burada $\widehat{D}_h^p$ terimi katı kısmın şekil değiştirmesi ile emmeyi birbirine bağlar. Eş. 2'de, plastik toplam deformasyon artışı, $d\varepsilon^p$, bileşenlerine ayrılıp Eş. 3'te yerine yazılarak Eş. 3'ü genişletilmiş forma getirir. Bu genişletilmiş ifadede Eş. 5 yerine yazılır ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi şekil değiştirme bileşenlerine göre yeniden yazılırsa, son ifade Eş. 7'deki hali alır:

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

Burada hidrolik bileşenin plastik rijitliği olarak tanımlanabilir.

$$D_h^p = -D^e (\widehat{D}_h^p)^{-1} \quad (8)$$

Nihai durumda elastik ve plastik bileşenlerin süperpozisyonuyla hidrolik elasto-plastik rijitlik Eş. 9'daki hali alır.

$$D_h^{ep} = D_h^e + D_h^p \quad (9)$$

Bu noktada önerdiğimiz model, Modifiye Cam-Clay (MCC) teorisine dayanan Barcelona Basic Model'in (BBM) [5] bazı temel özelliklerini kullanmakla birlikte, model teorisinin avantajı, formülasyonu için özellikle yararlı bulduğumuz net gerilme ve matrik emme cinsinden bağımsız gerilme değişkenlerinin benimsenmesinde yatmaktadır. Bu nedenle, boşluk oranındaki değişiklik, net ortalama gerilme ve emme artışlarına ayrı ayrı Eş. 10 ve Eş. 11'deki gibi bağlıdır.

$$dv_m = -\kappa \frac{dp}{p} \quad (10)$$

$$dv_s = -\kappa_s \frac{ds}{(s+p_{atm})} \quad (11)$$

Eş. 11'de artımsal olarak yazılan spesifik hacim, dv , net ortalama gerilme, dp ve emme, ds , ana değişkenlerdir. Elastik sabitler, κ , κ_s önerilen modelin temel elastik yapısal ilişkilerini tanımlamak için kullanılır. Modelin akma yüzeyi, doymuş MCC zemininden genişletilerek DOZ için kullanılan haliyle Şekil 1'de verilmiştir. Akma yüzeyi matrik emme pekleşmesi nedeniyle emme eksenini boyunca gelişir. İzotropik sıkışma (p_0) ve uzama (p_s) için akma gerilmesi değerleri, akma yüzeyinin boyutunu belirleyen mevcut emme değerine bağlıdır. Bu nedenle, akma kriteri, net gerilme ve pekleşme parametresi üzerinden emmeye bağlıdır. Akma fonksiyonu ve pekleşme kuralı Eş. 12 ve Eş. 13'teki gibi yazılır.

$$f(\bar{\sigma}, h) = q^2 - M^2(\bar{p} + p_s)(p_0 - \bar{p}) = 0 \quad (12)$$

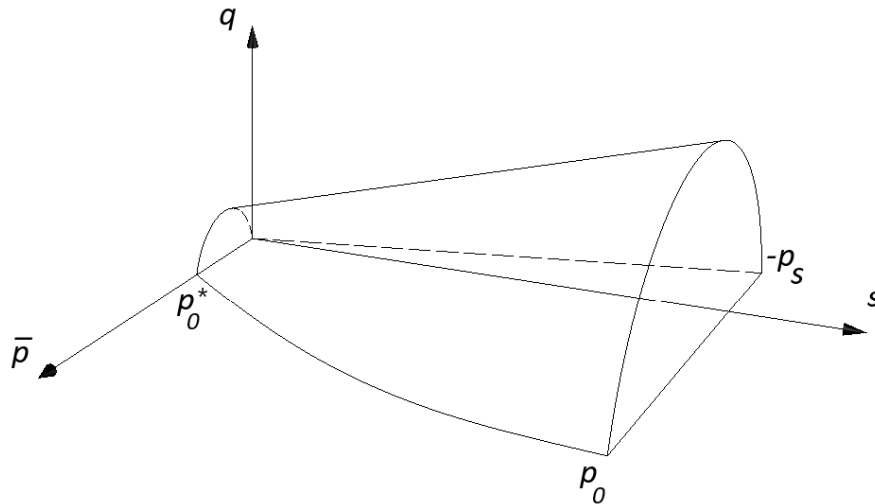
$$h = h(\varepsilon^p, s) \quad (13)$$

Burada h , 'genelleştirilmiş pekleşme parametresi' ve p_0 ön konsolidasyon basıncıdır (doymuş durum için projeksiyonu üssel yıldızla ifade edilir, p_0^*). Pekleşme parametresi $h=p_0$, plastik hacimsel deformasyon ve emme kullanılarak Eş. 14 ve Eş. 15'teki gibi hesaplanır.

$$\frac{dp_0}{p_0} = \frac{v}{\lambda(s)-\kappa} d\varepsilon_v^p \quad (14)$$

$$\left(\frac{p_0}{p^c}\right) = \left(\frac{p_0^*}{p^c}\right) [\lambda(0)-\kappa]/[\lambda(s)-\kappa] \quad (15)$$

Klasik plastisite teorisini takiben akma fonksiyonu kullanılarak (Eş. 12), önce kısmi türevler cinsinden tutarlılık koşulu yazılır. Tutarlılık koşuluna 'ilişkili olmayan akma kuralına' göre tanımlanan plastik şekil değiştirme artımının yerleştirilmesiyle plastik çarpma (pozitif plastik akma miktarı) bağlı bir ifade elde edilir. Derivasyonun detayı Eyyüpgiller ve Ülker [46]'de görülebilir. Plastik çarpmanın bulunmasının devamında elasto-plastik matris de çıkarılarak aşağıdaki gerilme - şekil değiştirme ilişkisinin son haline ulaşılır (Eş. 16).



Şekil 1. Model akma yüzeyleri ve bunların emmeye bağımlılığı (Model yield surfaces and their dependence on suction)

$$d\bar{\sigma} = D^e \left[I - \frac{\frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} \frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}}^T D^e}{\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}}^T D^e \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} - \frac{\partial f}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \varepsilon_m^p} \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}}} \right] d\varepsilon + \left[\frac{-D^e \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}}^T D_h^{ep} + \frac{\partial f}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial s} + \frac{\partial f}{\partial p_s} \frac{\partial p_s}{\partial s} \right) \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}}}{\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}}^T D^e \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}} - \frac{\partial f}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \varepsilon_m^p} \frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}}} + D_h^{ep} \right] ds \quad (16)$$

2.2. Bağlaşık Davranışın Hidrolik Bileşeninin Modellenmesi (Modeling the Hydraulic Component of Coupled Behavior)

Buraya kadar sunulan matematiksel formülasyon, bağlaşık davranışın mekanik kısmını kapsamaktadır. Hidrolik bileşeni tanımlamak için, aşağıdaki bünye bağıntısı kullanılacaktır. İfade sonra zincir kuralı ile genişletilir (Eş. 17, Eş. 18, Eş. 19).

$$\theta = S_r n \quad (17)$$

$$d\theta = d(S_r n) = S_r * dn + n dS_r \quad (18)$$

$$d\theta = S_r \left(\frac{\partial n}{\partial \varepsilon_{vm}} d\varepsilon_{vm} + \frac{\partial n}{\partial s} ds \right) + n \left(\frac{\partial S_r}{\partial \varepsilon_{vm}} d\varepsilon_{vm} + \frac{\partial S_r}{\partial s} ds \right) \quad (19)$$

Eş. 19 birleşik toplam gerilme, $d\varepsilon_{vm}$ ve emme, ds 'nin neden olduğu hacimsel deformasyon artışlarından hacimsel su muhtevası artışının ($d\theta$) hesaplanmasını sağlar. Burada S_r doymuşluk derecesi ve n porozitedir. Hidrolik bileşen, Eş. 18'den doymuşluk derecesi artımı (dS_r) çekilerek hacimsel su muhtevası yerine doymuşluk derecesi elde edilecek şekilde de yazılabilir (Eş. 20).

$$dS_r = \left(\frac{1}{n} \frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon_{vm}} - \frac{\theta}{n^2} \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_{vm}} \right) d\varepsilon_{vm} + \left(\frac{1}{n} \frac{\partial \theta}{\partial s} - \frac{\theta}{n^2} \frac{\partial n}{\partial s} \right) ds \quad (20)$$

Burada, $d\varepsilon_{vm}$ katsayısının ikinci teriminin Eş. 21'deki gibi hesabı açıkça yapılabilir:

$$\frac{\partial n}{\partial \varepsilon_{vm}} = \frac{\partial n}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \varepsilon_{vm}} = \left[\frac{1}{(e+1)^2} \right] (-e-1) = -\frac{1}{(e+1)} \quad (21)$$

Eş. 20 emme artışının katsayıları, doygunluk derecesini emmeye bağlar. Eş 20'ye göre, $(\partial\theta/\partial s)$ ve $(\partial n/\partial s)$ 'nin kısmi türevleri ayrı olarak değerlendirilmemektedir. Su tutma davranışını elde etmek için gerekli deneyler, hem iskeletin hem de gözenek sıvılarının hacim değişimini içerir. Bu nedenle, d_s katsayısının belirli bir zemin STE'sinden çıkarılması gerekir. Bu katsayısı, belirli bir doygunluk derecesi için STE'nin eğimidir. Hidrolik tarafta, formülasyonu tamamlamak için kullanılacak STE modeli, Gallipoli [42] modelinde olduğu gibi, ana kuruma ve ıslanma STE'lerinin boşluk oranı artışlarına bağımlılığını içermelidir. Burada belirtilmelidir ki, mevcut birçok deneysel veriye dayanarak, kısmi türev, $d\theta/d\varepsilon_{vm}$ 'nin hesaplanması analitik olarak oldukça zordur. Bu nedenle, bu çalışmada, hidromekanik davranış için doğru sonuçlar veren ek bir malzeme parametresi olan B 'yi kullanan ampirik bir ifade halinde geliştirdik (Eş. 22).

$$\partial\theta/\partial\varepsilon_{vm} = -B/S_r \quad (22)$$

Burada B , drenaj sırasında drene olan boşluk suyu hacminin ölçüldüğü izotropik sıkışma deneylerinden elde edilebilir. Bu ifadenin kullanılmasıyla doygunluk derecesi açısından hidrolik bileşenin son hali Eş. 23'tedir.

$$dS_r = \left[S_r/e (1 - B/nS_r) \right] d\varepsilon_{vm} + \left(\partial S_r / \partial s \right)_{STE} ds \quad (23)$$

3. Önerilen Modelin Tahminleri (Predictions of the Proposed Model)

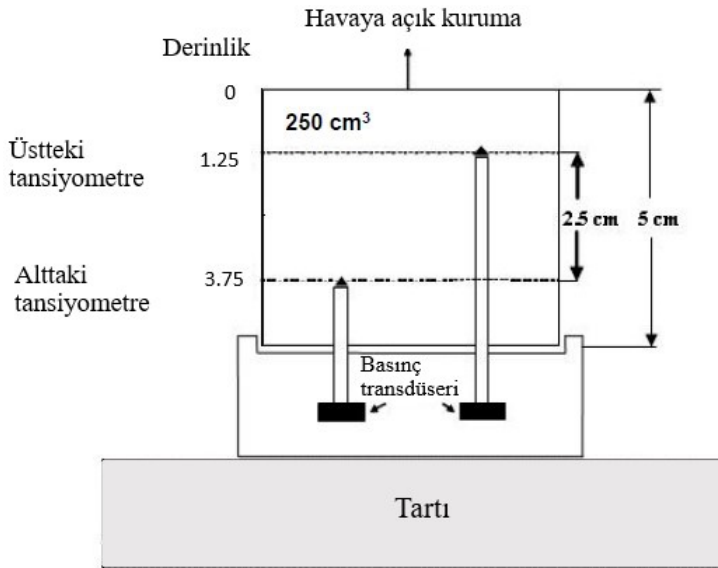
Önerdiğimiz hidro-mekanik model ile bir dizi drenajlı ve drenajsız izotropik üç eksenli sıkışma deneyi simüle edilmiştir. Bu deneylerde, sabit emme ve sabit su muhtevası koşulları uygulanmıştır. Bu çalışmanın odak noktası hidrolik histerezisi dahil ederek DOZ izotropik sıkışma davranışının modellenilebilmesidir. STE fonksiyonu için van Genuchten [47] ifadesi drenajlı üç eksenli deney simülasyonları için yeterli bulunmuş ve drenajsız üç eksenli deney için log-doğrusal bir eğri kullanılmıştır. Eş. 16 izotropik üç eksenli sıkışmayı modellemek için Eş. 24'teki formu alır.

$$d\bar{p} = D^e \left[I - \frac{\partial g / \partial \bar{p} \partial f / \partial \bar{p}^T D^e}{\partial f / \partial \bar{p}^T D^e \partial g / \partial \bar{p} - \partial f / \partial p_0 \partial p_0 / \partial \varepsilon_m^T \parallel \partial g / \partial \bar{p}} \right] d\varepsilon + \left[\frac{-D^e (\partial f / \partial \bar{p}^T D_h^{ep} + \partial f / \partial p_0 \partial p_0 / \partial s^T + \partial f / \partial p_s \partial p_s / \partial s^T) \partial g / \partial \bar{p}}{\partial f / \partial \bar{p}^T D^e \partial g / \partial \bar{p} - \partial f / \partial p_0 \partial p_0 / \partial \varepsilon_m^T \parallel \partial g / \partial \bar{p}} + D_h^{ep} \right] ds \quad (24)$$

Bilindiği üzere zeminlerde elastik matris, gerilmenin (bu durumda net ortalama gerilme) bir fonksiyonudur. Eş. 24'te elastik davranış, net ortalama gerilmeyle güncellenen λ ve κ indisleri tarafından kontrol edildiğinden, bu formda kullanılmamıştır. Geliştirdiğimiz formülasyon, açık integrasyon ile yazdığımız bir bilgisayar programıyla entegre edilmiştir. Üç eksenli gerilme durumu için Eş. 25'teki ifade yazılabilir. Burada 'i' ilgili yük adımı (şekil-değiştirme, emme veya net gerilme) numarasıdır.

$$d\bar{p}_{i+1} = D^e_i \left[I - \frac{\partial g / \partial \bar{p} \partial f / \partial \bar{p}^T D^e}{\partial f / \partial \bar{p}^T D^e \partial g / \partial \bar{p} - \partial f / \partial p_0 \partial p_0 / \partial \varepsilon_m^T \parallel \partial g / \partial \bar{p}} \right] d\varepsilon_i + \left[\frac{-D^e_i (\partial f / \partial \bar{p}^T D_h^{ep} + \partial f / \partial p_0 \partial p_0 / \partial s^T + \partial f / \partial p_s \partial p_s / \partial s^T) \partial g / \partial \bar{p}}{\partial f / \partial \bar{p}^T D^e \partial g / \partial \bar{p} - \partial f / \partial p_0 \partial p_0 / \partial \varepsilon_m^T \parallel \partial g / \partial \bar{p}} + D_h^{ep} \right] ds_i \quad (25)$$

Üç eksenli deney simüle edilirken, mekanik bileşen için ilgili formülasyonun değiştirilmesi gerekir. İzotropik yükleme için ortalama net gerilme ile spesifik hacim arasındaki log-lineer λ ve κ indisleri ile belirtilmektedir. Benzer ilişki emme ile spesifik hacim arasında da tanımlanır ve λ_{vs} ve κ_{vs} indisleri kullanılır. Hidrolik kısım için ise Eş. 23'ün doygunluk derecesi ve spesifik hacim artımına (dv) göre modifiye edilmesiyle mekanik ve hidrolik kısmın denklemlerini Eş. 26'daki matris ile göstermek mümkün olur.



Şekil 2. Test cihazının enkesiti (Cross section of the test device) [50]

$$\begin{Bmatrix} dv_{i+1} \\ dS_{r,i+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{p_i} & -\frac{\lambda_{vs}}{(s_i + p_{atm})} \\ \frac{s_{ri}}{n_i} \left(1 - \frac{B}{n s_r}\right)_i \frac{\lambda}{p_i} & \left(\frac{\partial S_r}{\partial s}\right)_{STE_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\bar{p}_i \\ ds_i \end{Bmatrix} \quad (26)$$

Bu gösterimde net ortalama gerilme ve emmenin, bağılıklık nedeniyle her iki denklemden de yer aldığına dikkat edilmelidir. Burada, λ , κ parametreleri bir emme yükleme-boşaltma yolu sırasında hacim değişikliğinin ölçülmesiyle elde edilir. λ_{vs} ve κ_{vs} ise sabit emme altında izotropik sıkışma deneylerinden elde edilir. Ayrıca önerilen modelin doğruluk ve yakınsama durumu, van Genuchten [47], Fredlund ve Xing [48] veya Gallipoli [29] gibi uygun bir STE fonksiyonunun türevine bağlı olarak kontrol edilir.

3.1. Su Tutma Deneyleri (Water Retention Tests)

Bu çalışmada, Mersin silti olarak adlandırılan siltli bir zeminin (Tablo 1) STE'sini elde etmek için HyProp cihazı [49] kullanılarak bir seri su tutma deneyleri yapılmıştır. Buradaki amaç, bir DOZ'un kuruma davranışına ilişkin doğru verileri ilk elden toplamaktır, böylece gerekli üç eksenli deneyleri simüle ettiğimizde, DOZ'un gerçek tutma davranışını kullanabiliriz. Bu deney, numune yüzeyinden boşluk suyunun buharlaşmasına izin verirken, zemin numunesinde periyodik olarak iki derinlikte ağırlık kaybı ve matrik emme miktarını ölçen klasik buharlaştırma yöntemine (classical evaporation method) dayanır [49]. Şekil 2, cihazın enkesitini göstermektedir. Ana kurutma eğrisi ile birlikte, numuneye gömülü yüksek hava girişli tansiyometreler arasındaki yükseklik farkı nedeniyle oluşan hidrolik gradyan kullanılarak aynı anda hidrolik iletkenlik fonksiyonu ölçülür. Ancak, bu çalışmanın kapsamı dışında olduğu için bu davranışı sunmuyoruz.

Şekil 3, hacimsel su muhtevası-emme ilişkisi açısından su tutma deneyi sonuçlarını göstermektedir. Ana kuruma eğrileri, farklı başlangıç boşluk oranlarında elde edilerek Ahmadi Naghadeh [51] tarafından aynı zemin üzerinde bulunan eğriler ile karşılaştırılmıştır. HyProp cihazı ile daha fazla veri noktası toplanabildiği için van Genuchten [47] gibi bir denklemin parametreleri daha doğru bulunabilmektedir. Su tutma deneylerimizden $e_0=0.725$, düşük emme davranışını oldukça iyi yakalıyor gibi görünse de, kurutma devam ettikçe ve emme arttıkça $e_0=0.809$ eğrisi Ahmadi Naghadeh'e [51] daha yakın sonuç vermiştir. Ancak, Ahmadi Naghadeh [51] çalışması

emme aralığının tamamını daha iyi kapsadığı ve aynı zamanda bir ana ıslanma eğrisi de sağladığı için bu çalışmadaki simülasyonlarda Ahmadi Naghadeh [51] eğrisi tercih edilmiştir. Bu veriler kullanılarak üretilen van Genuchten eğrileri [47] Şekil 4'te verilmiştir.

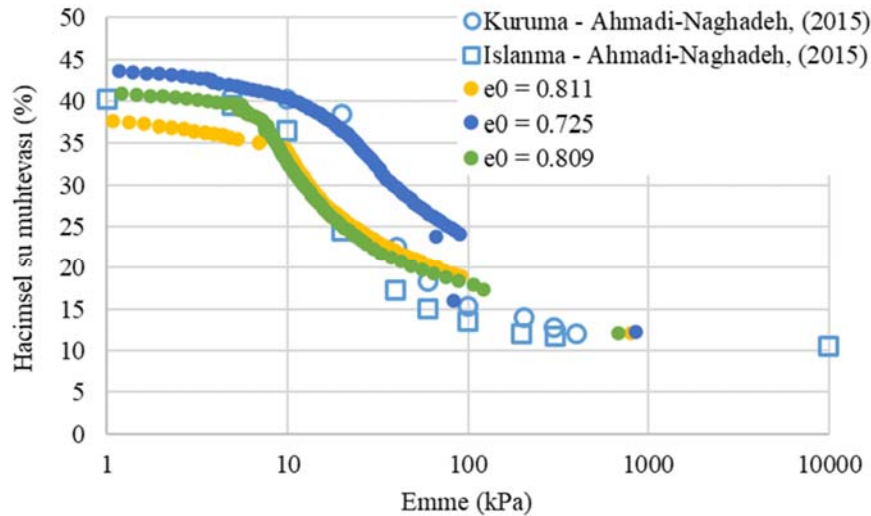
Tablo 1. Çalışmada kullanılan Mersin siltinin zemin özellikleri (Soil properties of Mersin silt used in the study)

Zemin özelliği	Değer
Özgül ağırlık (Gs)	2.72
Likit limit (%)	26
Plastik limit (%)	21
Plastisite endeksi (%)	5
USCS sınıfı	ML

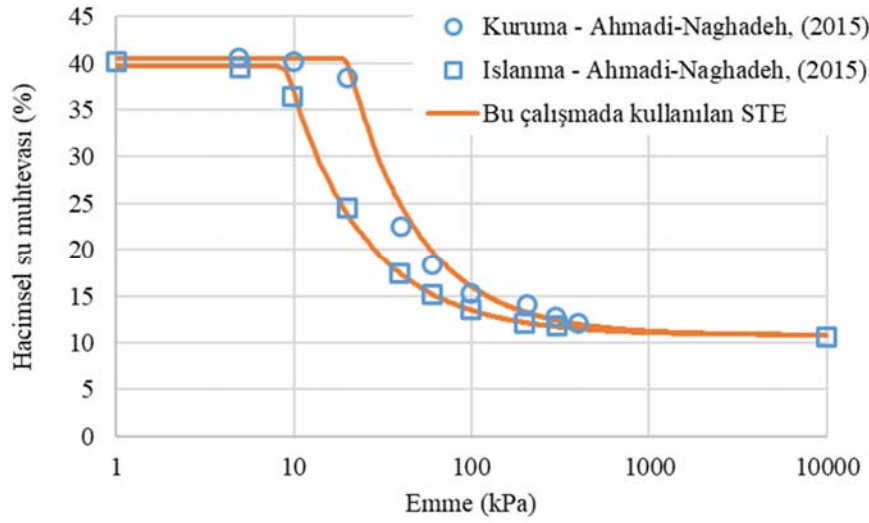
3.2. Doygun Olmayan Drenajlı Üç Eksenli (CD) Deney Simülasyonları (Simulations of Unsaturated Drained Triaxial (CD) Tests)

İzotropik sıkışma davranışını simüle etmek için ilk doymun olmayan drenajlı üç eksenli (CD) deneyler Mersin silti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyel veriler daha önceki çalışmalarımızdan Eyüpgiller vd. [52] ile birlikte Ahmadi Naghadeh'ten [51] elde edilmiştir. İlk model parametrelerini kalibre etmek için kullanılırken (Şekil 5), ikincisi bu parametreler ile simülasyonları yapmakta kullanılır (Şekil 6). Önerilen model, zeminin genel hidro-mekanik davranışını yakalamaktadır. Simülasyonun doymunluk derecesi ile test verileri arasında elde edilen en büyük fark yaklaşık %1.0'dir. Bu simülasyonlarda kullanılan parametreler Tablo 2'de ilgili deneylerin ilk boşluk oranı karşılıklarına göre listelenmektedir.

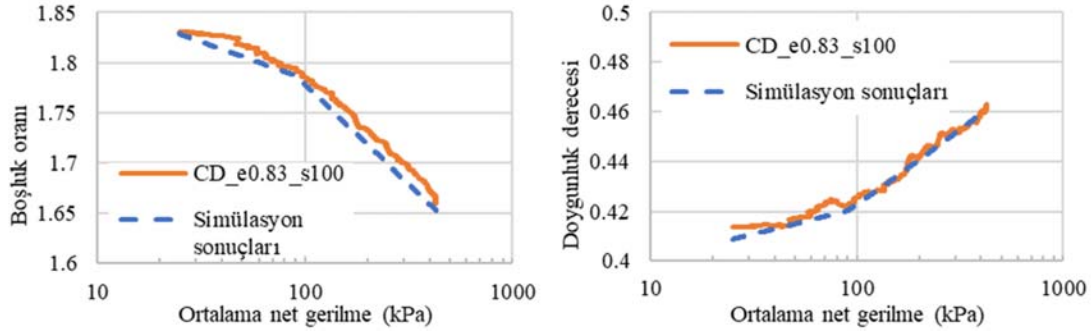
Sunulan formülasyon, net gerilmenin doymunluk derecesi ve matrik emme üzerindeki etkisini kapsar, ancak model emme döngülerini de simüle edebilir. Herhangi bir emme değişikliği, katı iskelet üzerinde hacimsel şekil değiştirmelere neden olan boşluk suyunu etkiler. Modelimizin bu özelliği yakalama kabiliyetini sunmak için, bentonit-kaolin karışımı üzerinde bir ıslanma-kuruma döngüsü de simüle edilmiştir (Şekil 7) [53]. 400 kPa çevre basıncına ve 300 kPa emmeye maruz numune, emme değeri 20 kPa'ya düşürülerek ıslatılır ve bu noktada emmenin dengelenmesi (suction equilibrium) sağlanana kadar beklenir. Daha sonra emme 300 kPa'ya çıkarılarak kurumaya neden olur. Bu noktada hem boşluk oranında hem de doymunluk derecesinde histeretik bir davranış gözlemlenebilir. Sharma [53]



Şekil 3. Elde edilen su tutma testi sonuçlarının aynı zemin üzerinde çalışan Ahmadi Naghadeh [63] ile karşılaştırılması (Comparison of water retention tests with Ahmadi Naghadeh [63])



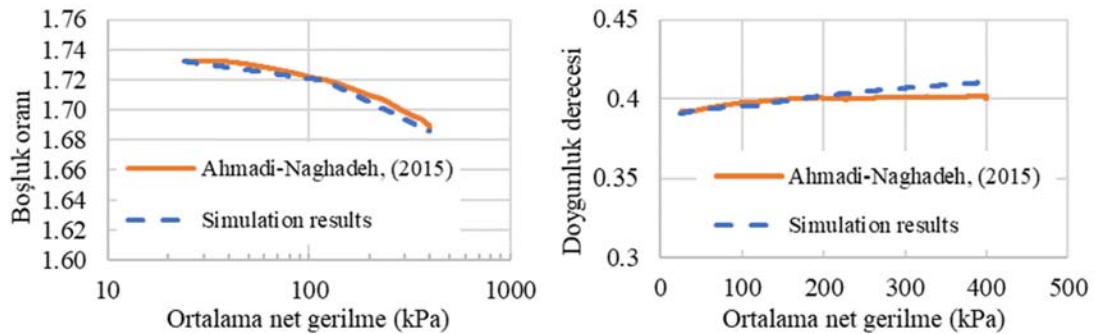
Şekil 4. Bu çalışmada kullanılan Mersin siltine ait STE ve Ahmadi Naghadeh'in [51] deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması
(The SWRC of the Mersin silt used in this study and its comparison to the experimental results of Ahmadi Naghadeh [51])



Şekil 5. Eyüpgiller vd. [52] tarafından yapılan drenajlı üç eksenli izotropik sıkışma deneyi ile model parametrelerinin kalibrasyonu
(Calibration of the model parameters with drained triaxial isotropic compression tests of [52])

Tablo 2. Mersin silti simülasyonlarında kullanılan parametreler (Parameters used in simulations of Mersin silt)

λ	κ	λ_s	k	e_0	p_0 (kPa)	B
0,086; 0,028	0,032; 0,008	0,008	0,4	1,83; 1,73	90; 120	0,0652
van Genuchten parameters	vG_m_d	vG_n_d	vG_a_d	vG_m_w	vG_n_w	vG_a_w
	0,018	60	20	0,022	45	9



Şekil 6. Ahmadi Naghadeh'in [51] drenajlı izotropik sıkışma deneyi ve simülasyonu
(Simulation of the drained isotropic compression test of Ahmadi Naghadeh [51])

tarafından da belirtildiği gibi, bu özel testte, ıslanma sırasında herhangi bir çökme sıkışması (collapse compression) gözlenmemiştir. Bu simülasyonda kullanılan STE fonksiyonu Gallipoli [29] tarafından önerilen fonksiyondur. Burada, bu analizin doğruluğunun başka bir

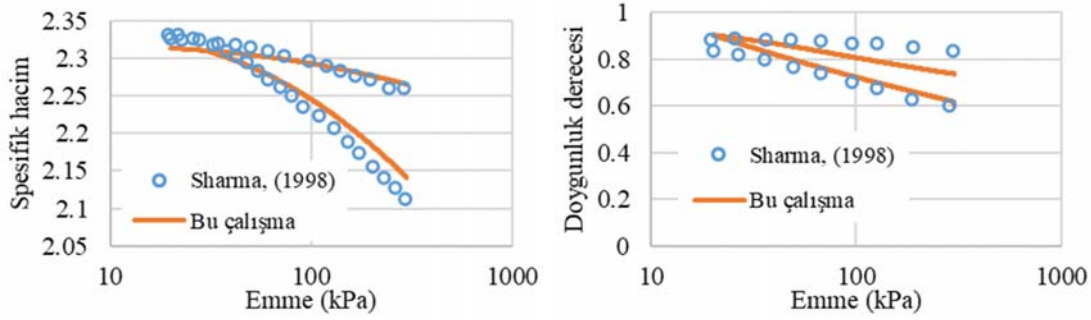
STE modeli kullanılarak geliştirilebileceğini de okuyucunun göz önüne alması gerekmektedir. Mekanik tarafta, SI (*suction increase - emme artması*) akma yüzeyinin 10 kPa marjla azalan emmeyi takip ettiği varsayılmaktadır. Model parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

İkinci deney grubu, çeşitli başlangıç boşluk oranları ve doygunluk derecelerine sahip üç izotropik sıkıştırma deneyinden oluşur (Sun vd. [54]). Deneylerde, Pearl kili numuneleri, 147 kPa'lık sabit emme altında 600 kPa ortalama net gerilmeye tabi tutulur (Şekil 8, Şekil 9) [54]. Kalibrasyon testi ile doğrulama testlerinin başlangıç boşluk oranları arasındaki fark arttıkça doygunluk derecesi değişimindeki hata miktarı artmaktadır. Tahmin edilen ve ölçülen değerler arasındaki en büyük fark %2 olarak elde edilmiştir. Davranışın elastikten elasto-plastiğe evrildiği değer kabul edilen akma noktası Sun vd.'de [54] kullanılan net gerilme değerleriyle biraz farklılık göstermektedir. Ancak, bu farkın nihai sonuçlarda önemsiz hale geldiği görülmüştür. Bu çalışmanın STE'sinin ana eğrileri, Pearl kilinin su tutma davranışını iyi yakalayan Gallipoli vd.'den [32] alınmıştır.

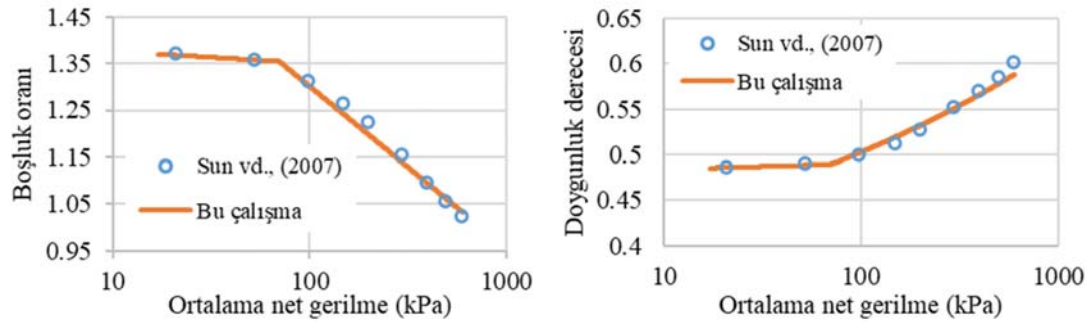
Modelin çeşitli emme seviyeleri için doğruluğunun sağlanmasını yapmak için 100-200-300 kPa'lık üç sabit emme değeri altında izotropik yükleme-boşaltma deneyleri simüle edilmiştir [53]. Bentonit-kaolin karışımı üzerinde yapılan bu deneylerde ve tüm numuneler benzer başlangıç boşluk oranlarına sahiptir. Önerilen modelin bir deney ile kalibre edilmesinin ardından (Şekil 10), spesifik hacim-ortalama net gerilme ve doygunluk derecesi ile ortalama net gerilme cinsinden elde edilen sonuçlar oldukça iyi eşleşmektedir (Şekil 11). Emme-su muhtevası ilişkisi açısından su tutma davranışı,

Sharma'daki [53] emme yüklemesinin simüle edildiği Gallipoli'den [29] uyarlanmıştır. Akma gerilmesi (p_0) olarak da değerlendirilebilen ön konsolidasyon gerilmesinin başlangıç değerleri, Sharma'nın [53] analizlerinden alınmıştır. Bu analizlerde kullanılan parametreler deneylerdeki sabit emme değerlerine göre sıralı olarak Tablo 4'te sunulurken, ilk satırda bu çalışmadaki modelin parametreleri, üçüncü satırda Gallipoli [29] su tutma modelinin parametreleri verilmiştir. Sharma [53] deneylerinin simülasyon sonuçları, modelin histeretik davranışı yakalama kapasitesini göstermektedir. Sunulan model, DOZ'un su muhtevası üzerindeki ortalama net gerilmenin etkisini boşaltma-yeniden yükleme doğrultularını da dahil ederek iyi derecede yakalayabilmektedir (Şekil 11).

Simülasyonun doygunluk-net gerilme cinsinden sunulan hidrolik kısmı, $s=100\text{kPa}$ deneyinde doygunluk derecesi arttıkça ölçümlerden sapmaktadır. Böyle bir davranış, modelde doygunluğun %100'e kadar ulaşması mümkünken, bu tür zeminlerde yapılan testler sırasında özellikle %95'in üzerindeki satürasyon değerlerinin elde edilmesinin çok daha zor olması nedeniyle oluşur. Bu nedenle, doygunluk derecesi arttıkça modelin doğruluğunun az da olsa düşebileceği söylenebilir. Model sonuçlarının Bruno ve Gallipoli [43] ile karşılaştırılmasıyla, sunulan modelin histeretik davranışı biraz daha iyi simüle ettiği görülmektedir (Şekil 11a, Şekil 11b). Tablo 4'te parametreler görülebilir.



Şekil 7. Kaolin-bentonit karışımı üzerinde emme çevrimi (Suction cycle on kaolin-bentonite mixture) [53]



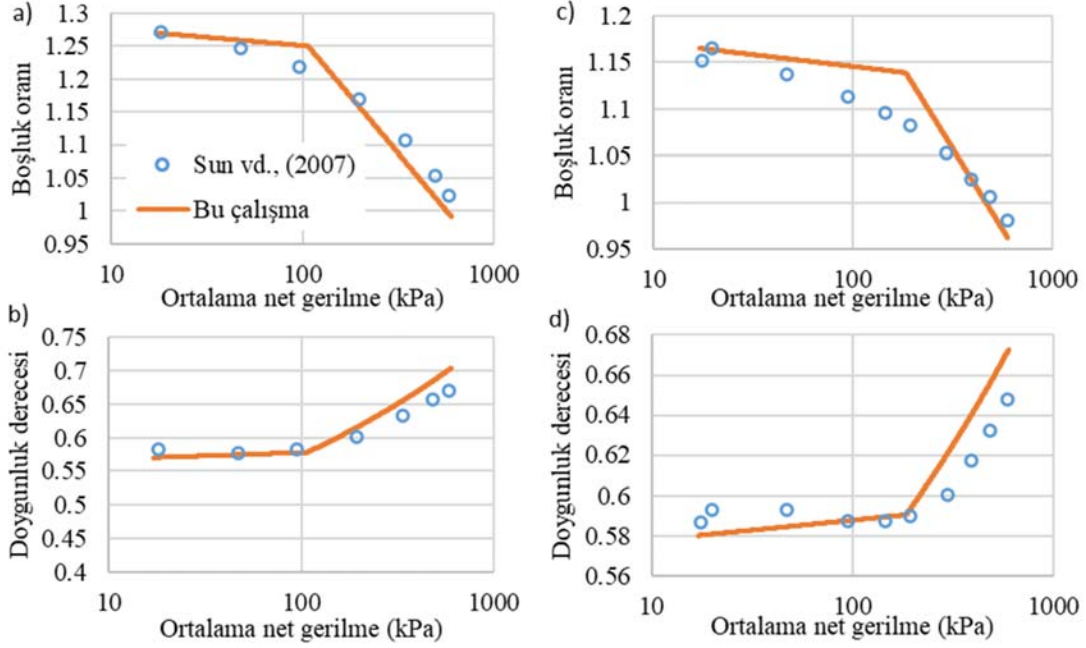
Şekil 8. Model parametrelerinin kalibrasyonu için kullanılan $e_0=1,39$ değerine sahip izotropik sıkıştırma deneyi Sun vd. [32] (The isotropic compression test with $e_0=1,39$ test is used for the calibration of the model parameters Sun et al. [32])

Tablo 3. Sun vd. [32] ve Sun vd. [13] deneylerinin simülasyonlarında kullanılan parametreler (Parameters used for simulations of Sun et al. [32] and Sun et al. [13])

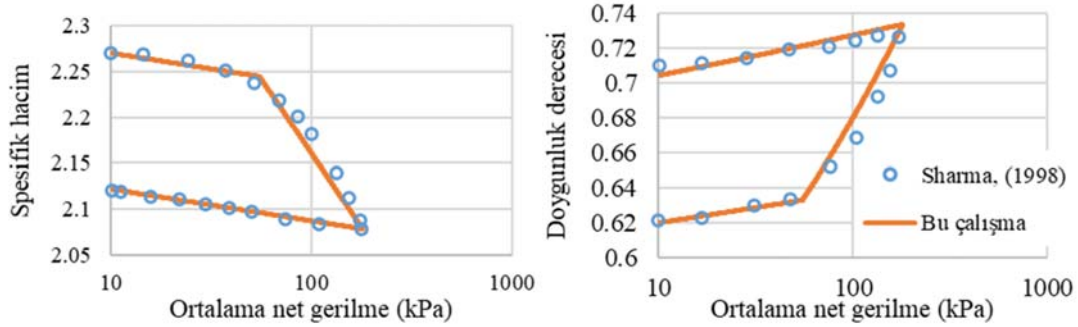
λ	κ	λ_s	k	e_0	p_0 (kPa)	B
0,028	0,011	0,085	0,4	1,39; 1,28; 1,17; 1,33	70; 110; 180; 80	0,5

Tablo 4. Sharma [53] deney simülasyonlarında kullanılan parametreler (Parameters used in Sharma [53] simulations)

λ	κ	λ_s	k	e_0	p_0 (kPa)	s (kPa)	B
0,18; 0,16; 0,14	0,0015	0,008	0,4	1,32; 1,27; 1,27	35; 50; 55	100; 200; 300	0,191
m	N	Ψ	ω_{wet}	ω_{dry}	m_{sc}	n_{sc}	Ψ_{sc}
0,0333	4,53	6,62	59,3	188	0,161	0,621	10



Şekil 9. Sun vd.'nin [54] (a), (b) $e_0=1,28$ ve (c), (d) $e_0=1,17$ başlangıç boşluk oranlarına sahip izotropik sıkıştırma deneylerinin simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırması
(The isotropic compression test of Sun et al. [54] with (a), (b) $e_0=1,28$ and (c), (d) $e_0=1,17$ and the comparison of the simulation results)



Şekil 10. Model parametrelerinin kalibrasyonunda kullanılan Sharma'nın [53] $s=300$ kPa izotropik sıkıştırma deneyi
(The isotropic compression test of Sharma [53] with $s=300$ kPa is used for the calibration of the model parameters)

3.3. Sabit Su Muhtevalı Üç Eksenli (CW) Deney Simülasyonları (Simulations of Constant Water Content Triaxial (CW) Tests)

DOZ'un drenajsız durumdaki davranışını yakalamak için, sabit su muhtevalı (CW - constant water content) Sun vd. [13] tarafından yapılan bir üç eksenli deney de simüle edilmiştir. Bu deney tipinde deney boyunca gravimetrik su muhtevası (w) sabit tutulmaktadır. Doygun zeminlerin aksine, boşluklardaki hava kolayca sıkışıp numuneden tahliye olabildiğinden, drenajsız üç eksenli deneyin her aşamasında hacimsel şekil değiştirmelerin oluşması beklenir. Hacimsel deformasyon boşluk suyu basıncının yükselmesine izin verir ve bu da emmenin azalmasına neden olur. Ayrıca toplam boşluk suyu ağırlığı sabit olduğundan boşluk oranı azaldıkça doygunluk derecesi artar. Bu nedenle simülasyon, gravimetrik su muhtevasını sabit tutmak için böyle bir davranışı modellemek üzere bir kısıtlama koşulu gerektirir. Bu kısıtlama, Eş. 27'de verilen su muhtevası ilişkisinden türetilmiştir.

$$dw = d\left(\frac{S_r e}{G_s}\right) = 0 \quad (27)$$

Bu ilişkiyi zincir kuralıyla genişletmek Eş. 28'i verir.

$$\frac{\partial S_r}{\partial \bar{\sigma}} d\bar{\sigma} + \frac{\partial S_r}{\partial s} ds + \frac{\partial e}{\partial \bar{\sigma}} d\bar{\sigma} + \frac{\partial e}{\partial s} ds = 0 \quad (28)$$

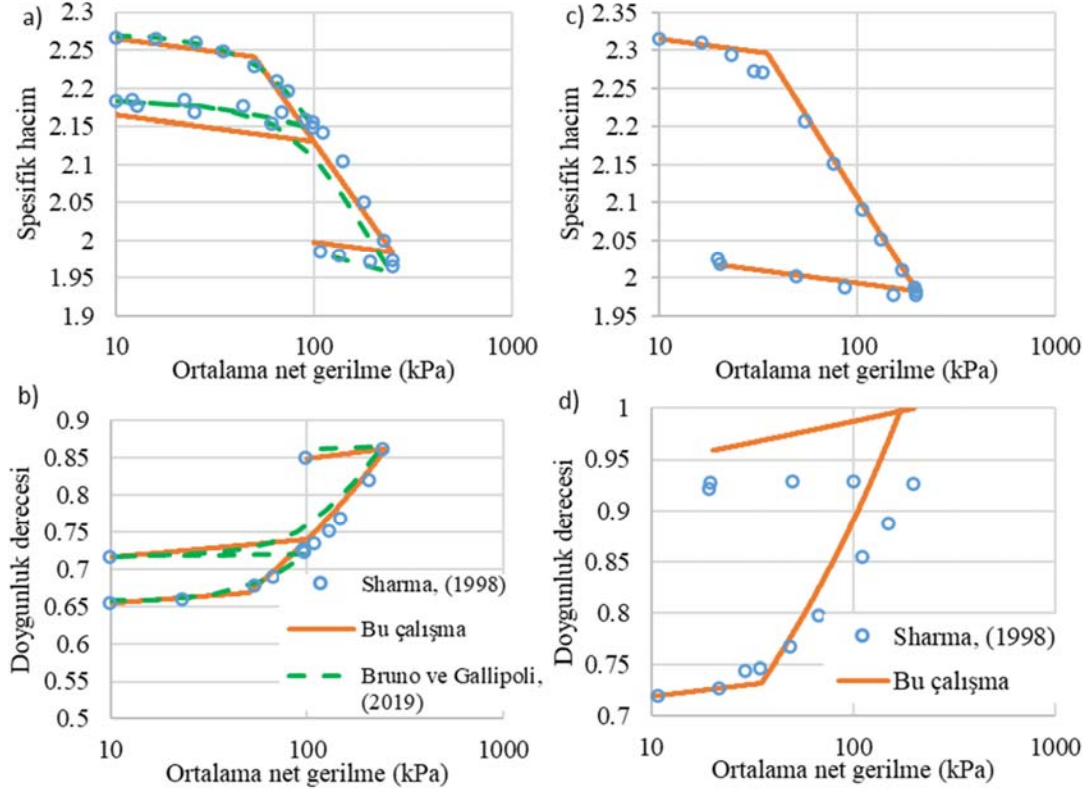
Kısmi türevler bu denkleme Eş. 20 ve Eş. 23'teki gibi ilgili ifadelerle yerleştirilip emme artımı çekilir (Eş. 29).

$$ds = \frac{\left[\frac{S_r}{n} \left(1 - \frac{B}{S_r n}\right) \left(-\lambda \frac{dp}{p}\right) e + \frac{\lambda}{p} S_r\right] d\bar{p}}{\left[e \left(\frac{\partial S_r}{\partial s}\right)_{SWRC} - \left(\frac{\lambda_{vs}}{s}\right) S_r\right]} \quad (29)$$

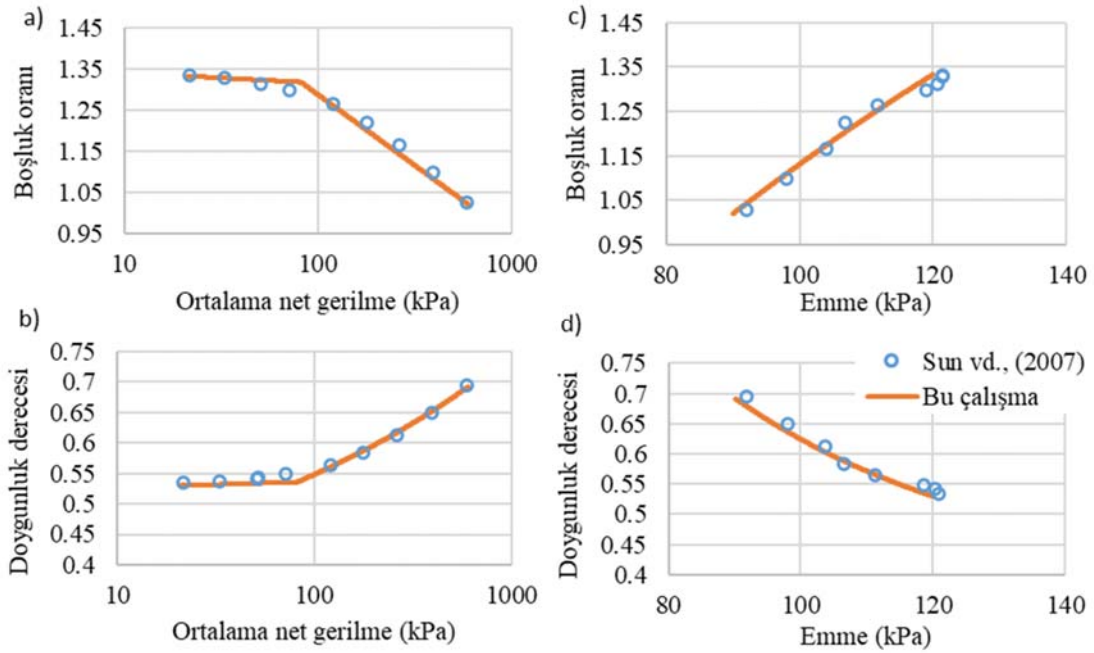
Emme değişimi hesaplandıktan sonra CW testi modellenenebilir. Eş. 29'a göre emme artışının öyle bir değer olması gerekir ki, bir emme artışının neden olduğu hacimdeki ve doygunluk derecesindeki değişiklikler, hacimsel su muhtevasının sabit kalmasını sağlasın. Bu nedenle, emme artışı, $\bar{p}$, S_r ve e açısından açık bir analizde önceki yük adımına dayalı olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada simüle edilen CW testi, 20 kPa'dan 600 kPa'ya kadar bir ortalama net gerilme ile Pearl kili üzerinde izotropik sıkıştırma testinin CW test sonuçlarını

sunan Sun vd. [13] tarafından yapılmıştır. Model parametreleri, aynı zemin üzerinde gerçekleştirilen önceki test setine Sun vd. [54] dayalı olarak kalibre edilmiştir. Böylece modelin aynı parametreleri kullanarak hem CD hem CW simüle edebildiği görülmektedir. Bu simülasyon için STE fonksiyonu, kısıtlama koşulunu açıkça

karşılayabilmek için önceki simülasyonların (Şekil 8, 9) ıslatma yolunun log-linear eğrisi olarak seçilmiştir. Bu çalışmada önerilen bünye modeli, DOZ'un sabit su muhtevası davranışını yakalamada oldukça doğru sonuçlar vermektedir (Şekil 12).



Şekil 11. Sabit emme altında izotropik sıkışma deneylerinin [53] simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırması (a)-(b) $s=200$ kPa, (c)-(d) $s=100$ kPa (The drained isotropic compression tests with (a)-(b) $s=200$ kPa and (c)-(d) $s=100$ kPa and the comparison of the simulation results [53])



Şekil 12. Simülasyon ve CW deney Sun vd. [13] sonuçlarının karşılaştırması
(Comparison of simulation and the CW test results of Sun et al. [13])

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, hidrolik histerezis içeren bir elasto-plastik hidro-mekanik bünye modeli geliştirilmiştir. Formülasyon, su muhtevası değişikliklerini net gerilme ile bağlamak için tek bir model parametresi kullanacak şekilde geliştirilmiştir. Model, elde etmek için yalnızca bir avuç klasik üç eksenli test gerektiren başka bir dizi malzeme parametresi kullanır. Sabit emmede çok sayıda doygun olmayan drenajlı üç eksenli deneyler ve sabit su muhtevasıyla drenajsız üç eksenli deneyleri çeşitli net gerilme ve emme yolları için modellenmiştir. Benzer amaçlara sahip bazı mevcut modellerle karşılaştırıldığında, önerilen model, boşluk oranının su tutma davranışı üzerindeki etkisinin başarılı bir şekilde yakalanmasıyla sonuçlanan nispeten basit bir formülasyon sunar. Ayrıca, doğrulama analizleri, önerilen modelin, doygun olmayan zeminlerin hidro-mekanik tepkisinin bazı temel özelliklerini başarılı bir şekilde yakalayabildiğini, örneğin net gerilme ve emmenin neden olduğu doygunluk değişikliklerinin derecesini tahmin etmek gibi oldukça basit formülasyonunu göz önünde bulundurarak başarılı bir şekilde yakalayabildiğini göstermektedir.

5. Simgeler (Symbols)

e = Boşluk oranı
 v = Spesifik hacim
 n = Porozite
 e_0 = Başlangıç boşluk oranı
 $\lambda(0)$ = Doygun durumda net gerilme artımına karşılık plastik hacimsel sıkışabilirlik indisi
 λ = Doygun olmayan durumda net gerilme artımına karşılık elastik hacimsel sıkışabilirlik indisi
 κ = Elastik hacimsel sıkışabilirlik indisi
 λ_{vs} = Emme artımına karşılık plastik hacimsel sıkışabilirlik indisi
 κ_{vs} = Emme artımına karşılık elastik hacimsel sıkışabilirlik indisi
 B = Net gerilme artımına karşılık zeminden çıkması beklenen boşluk suyunu temsil eden model parametresi
 θ = Hacimsel su muhtevası
 S_r = Doygunluk derecesi
 w = Ağırlıkça su muhtevası
 D^e = Elastik matris
 D^{ep} = Elasto-plastik matris
 $\bar{\sigma}$ = Net gerilme
 ε = Şekil değiştirme
 ε_m = Sadece net gerilme artımından kaynaklanan şekil değiştirme
 ε^p = Plastik şekil değiştirme
 f = Akma yüzeyi
 g = Plastik potansiyel fonksiyonu
 h = Pekleşme fonksiyonu
 M = Kritik durum çizgisinin eğimi
 p_0 = Ön konsolidasyon basıncı (akma gerilmesi)
 p_0^* = Akma yüzeyinin $s=0$ eksenini kestiği pozitif nokta
 p_s = Akma yüzeyinin ortalama net gerilme doğrultusundaki en küçük değeri
 $\bar{p}$ = Ortalama net gerilme
 s = Matrik emme
 p^c = Referans basınç
 p_{atm} = Atmosfer basıncı

5.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

BBM= Barcelona Basic Model
 CW= Sabit su muhtevasında üç eksenli deneyi (Constant Water Content)
 DOZ= Doygun Olmayan Zeminler
 STE= Su Tutma Eğrisi
 SI= Emme artımı yönündeki akma yüzeyi (Suction Increase)
 SD= Emme azalımı yönündeki akma yüzeyi (Suction Decrease)

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma 117M330 numaralı ve “Doygun Olmayan Zeminlerin Statik Davranışlarının Bünyesel Modellenmesi ve Mühendislik Uygulamalarında Kullanımı” başlıklı TÜBİTAK 1001 araştırma projesi desteğiyle yapılmıştır. Yazarlar, TÜBİTAK’a teşekkürü bir borç bilir.

Kaynaklar (References)

1. Aitchison G., Donald I., Effective stresses in unsaturated soils, Proceedings 2nd Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Christchurch, N.Z., Wellington, New Zealand, New Zealand Institution of Engineers, 1956, 192-199.
2. Bishop A.W., The principle of effective stress, Teknisk ukeblad, 39, 859-863, 1959.
3. Fredlund D.G., Morgenstern N.R., Constitutive relations for volume change in unsaturated soils, Canadian Geotechnical Journal, 13 (3), 261-276, 1976.
4. Lloret A., Alonso E.E., Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour, Géotechnique, 30 (4), 449-477, 1980.
5. Alonso E.E., Gens A., Josa A., A constitutive model for partially saturated soils, Géotechnique, 40 (3), 405-430, 1990.
6. Vaunat J., Romero E., Jommi C., An elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated soils, Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils, 20 (0), Editörler: Tarantino A., C. Mancuso, Trento, Italy, Balkema: Trento, 2000, 0.
7. Khalili N., Habte M.A., Valliappan S., A bounding surface plasticity model for cyclic loading of granular soils, Int J Numer Methods Eng, 63 (14), 1939-1960, 2005.
8. Kodikara J., Jayasundara C., Zhou A., A generalised constitutive model for unsaturated compacted soils considering wetting/drying cycles and environmentally-stabilised line, Comput Geotech, 118 (December 2019), 103332, 2020.
9. Cao Z., Chen J., Alonso E.E., Tarragona A.R., Cai Y., Gu C., Zhang Q., A constitutive model for the accumulated strain of unsaturated soil under high-cycle traffic loading, Int J Numer Anal Methods Geomech, nag.3188, 2021.
10. Wheeler S.J., Sharma R.S., Buisson M.S.R.R., Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils, Géotechnique, 53 (1), 41-54, 2003.
11. Gallipoli D., Constitutive and numerical modelling of unsaturated soils, PhD thesis, University of Glasgow, 2000.
12. Jommi C., Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, (1968), Editörler: Tarantino A., C. Mancuso, CRC Press, 2000, 147-162.
13. Sun D.A., Sheng D., Xiang L., Sloan S.W., Elastoplastic prediction of hydro-mechanical behaviour of unsaturated soils under undrained conditions, Comput Geotech, 35 (6), 845-852, 2008.
14. Terzaghi K., Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. F. Deuticke, 1925.
15. Fredlund D.G., Pham H.Q., Independent Roles of the Stress State Variables on Volume-Mass Constitutive Relations, Theoretical and Numerical Unsaturated Soil Mechanics, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 37-44, 2007.
16. Sheng D., Fredlund D.G., Gens A., A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables, Canadian Geotechnical Journal, 45 (4), 511-534, 2008.
17. Sheng D., Zhou A.N., Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils, Canadian Geotechnical Journal, 48 (5), 826-840, 2011.
18. Ng C.W.W., Zhou C., Chiu C.F., Constitutive modelling of state-dependent behaviour of unsaturated soils: an overview, Acta Geotech, 15 (10), 2705-2725, 2020.
19. Arroyo H., Rojas E., Fully coupled hydromechanical model for compacted soils, Comptes Rendus Mécanique, 347 (1), 1-18, 2019.
20. D'onza F., Gallipoli D., Wheeler S., Casini F., Vaunat J., Khalili N., Laloui L., Mancuso C., Mašin D., Nuth M., Pereira J.M.J.M., Vassallo R., Benchmark of constitutive models for unsaturated soils, Géotechnique, 61 (4), 283-302, 2011.
21. Sheng D., Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour, Comput Geotech, 38 (6), 757-776, 2011.

22. Hillel D., *The State of Water in the Soil*, Soil and Water, 63, London. U.K, Elsevier, 49-77, 1971.
23. Fredlund D.G., Rahardjo H., *Soil mechanics for unsaturated soils*, 1st editio. New York, USA, Wiley-Interscience, 1993.
24. Peranić J., Moscariello M., Cuomo S., Arbanas Ž., Hydro-mechanical properties of unsaturated residual soil from a flysch rock mass, *Eng Geol*, 269, 105546, 2020.
25. Barbour S.L., Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective, *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (5), 873-894, 1998.
26. Romero E., Gens A., Lloret A., Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay, *Eng Geol*, 54 (1-2), 117-127, 1999.
27. Ng C.W.W., Pang Y.W., Influence of Stress State on Soil-Water Characteristics and Slope Stability, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (2), 157-166, 2000.
28. Zhou A., Sheng D., Sloan S.W., Gens A., Interpretation of unsaturated soil behaviour in the stress-saturation space. II: Constitutive relationships and validations, *Comput Geotech*, 43, 111-123, 2012.
29. Gallipoli D., A hysteretic soil-water retention model accounting for cyclic variations of suction and void ratio, *Geotechnique*, 62 (7), 605-616, 2012.
30. Wong K.S., Mašin D., Coupled hydro-mechanical model for partially saturated soils predicting small strain stiffness, *Comput Geotech*, 61, 355-369, 2014.
31. Li X.S., Modelling of hysteresis response for arbitrary wetting/drying paths, *Comput Geotech*, 32 (2), 133-137, 2005.
32. Gallipoli D., Bruno A.W., D'Onza F., Mancuso C., A bounding surface hysteretic water retention model for deformable soils, *Geotechnique*, 65 (10), 793-804, 2015.
33. Zhou C., Ng C.W.W., Chen R., A bounding surface plasticity model for unsaturated soil at small strains, *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 39 (11), 1141-1164, 2015.
34. Wheeler S.J., Inclusion of specific water volume within an elasto-plastic model for unsaturated soil, *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (1), 42-57, 1996.
35. Dangla P., Malinsky L., Coussy O., Plasticity and imbibition-drainage curves for unsaturated soils: a unified approach, *Numerical models in geomechanics: NUMOG VI*, Editörler: PIETRUSZCZAK S., G.N. PANDE, Montreal, Quebec, 1997, 141-146.
36. Sheng D., Sloan S.W., Gens A., A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects, *Comput Mech*, 33 (6), 453-465, 2004.
37. Zhou A., Wu S., Li J., Sheng D., Including degree of capillary saturation into constitutive modelling of unsaturated soils, *Comput Geotech*, 95 (October 2017), 82-98, 2018.
38. Khalili N., Habte M.A., Zargarbashi S., A fully coupled flow deformation model for cyclic analysis of unsaturated soils including hydraulic and mechanical hystereses, *Comput Geotech*, 35 (6), 872-889, 2008.
39. Li J., Yin Z.-Y., Cui Y.-J., Liu K., Yin J.-H., An elasto-plastic model of unsaturated soil with an explicit degree of saturation-dependent CSL, *Eng Geol*, 260, 105240, 2019.
40. Zhou A., Modelling hydro-mechanical behavior for unsaturated soils, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 5 (2), 79-94, 2017.
41. Liu Y., Cai G., Zhou A., Han B., Li J., Zhao C., A fully coupled constitutive model for thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated soils, *Comput Geotech*, 133 (January), 104032, 2021.
42. Gallipoli D., Wheeler S.J., Karstunen M., Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil, *Geotechnique*, 53 (1), 105-112, 2003.
43. Bruno A.W., Gallipoli D., A coupled hydromechanical bounding surface model predicting the hysteretic behaviour of unsaturated soils, *Comput Geotech*, 110 (February), 287-295, 2019.
44. Mašin D., Predicting the dependency of a degree of saturation on void ratio and suction using effective stress principle for unsaturated soils, *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 34 (1), 73-90, 2010.
45. Zhou C., Ng C.W.W.W., A new and simple stress-dependent water retention model for unsaturated soil, *Comput Geotech*, 62, 216-222, 2014.
46. 'Eyüpgiller M.M., 'Ulker M.B.C., Effect of plastic deviatoric strains on the hardening of unsaturated soils in relation to their hydro-mechanical behavior, 8th Geotechnical Symposium, Oct. 13-15, Istanbul, 2019.
47. van Genuchten M.Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal*, 44 (5), 892-898, 1980.
48. Fredlund D., Xing A., Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (4), 521-532, 1994.
49. Pertassek T., Peters A., Durner W., HYPROP Data Evaluation Software, User's Manual, Umwelt Monitoring Systeme GmbH, München, Germany. 2011.
50. Schindler U.U.G., Müller L., Soil hydraulic functions of international soils measured with the Extended Evaporation Method (EEM) and the HYPROP device, *Open Data Journal for Agricultural Research*, 3, 10-16, 2017.
51. Ahmadi-Naghadeh R., Hydro-mechanical behavior of unsaturated specimens isotropically reconstituted from slurry and compacted specimens, PhD Thesis, MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2016.
52. Eyüpgiller M.M., Kenanoğlu M.B., Ülker M.B.C., Tokar N.K., A constitutive model for hydromechanically coupled behavior of unsaturated soils with hydraulic hysteresis, *Proceedings of Pan-American Conference on Unsaturated Soils*, Brazil, 2021.
53. Sharma R.S., Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays, PhD Dissertation, University of Oxford, 1998.
54. Sun D.A., Sheng D.C., Cui H.B., Sloan S.W., A density-dependent elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated compacted soils, *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 31 (11), 1257-1279, 2007.

