

Killi Zeminlerde Zemin-Su Karakteristik Eğrisinin Değişimi

¹Kadir Kocaman, *¹Aşkın Özocak ve ²Pelin Özener

¹Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Sakarya Üniversitesi, Türkiye

²İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

Özet

Doygun olmayan zeminlerin davranış özelliklerini ortaya koyan en önemli parametre zemin-su karakteristik eğrisidir. Zemin-su karakteristik eğrisi, zemin davranışını emme-su ilişkisi üzerinden analiz etmede anahtar bir role sahiptir. Bu çalışmada, bir dolgu sahasından elde edilmiş üç farklı killi zemin kullanılmıştır. Zeminlerin konsolide edilmesiyle elde edilen numuneler üzerinde filtre kağıdı yöntemi kullanılarak emme ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca zemin-su karakteristik eğrileri oluşturularak zeminlerin olası davranışları irdelenmiştir. Zeminin sahip olduğu fiziksel özelliklerin zemin-su karakteristik eğrisine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki killi zeminlere ait sonuçlarla uyumlu gerçekleşmiştir. Ayrıca farklı eğri oluşturma modellerinin deney sonuçlarına uygunluğu incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Doygun olmayan zemin, kılcal emme, zemin-su karakteristik eğrisi, filtre kağıdı yöntemi

Change of Soil-Water Characteristic Curve in Clayey Soils

¹Kadir Kocaman, *¹Aşkın Özocak and ²Pelin Özener

¹Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, Turkey

²Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering Yildiz Technical University, Turkey

Abstract

The most important parameter that reveals the behavior characteristics of unsaturated soils is the soil-water characteristic curve. It has a key role to analyze the unsaturated soil behavior. In this study, three different clayey soils obtained from a landfill area were used. Suction measurements were made on the consolidated samples using filter paper method. In addition, soil-water characteristic curves were examined in order to predict unsaturated soil behavior. The effect of the physical properties of the soil on the soil-water characteristic curve was investigated. The results were consistent with the results of clayey soils in the literature. In addition, the suitability of different curve-fitting models to experimental results was examined.

Key words: Unsaturated soils, matric suction, soil-water characteristic curve, filter paper method

1. Giriş

Klasik zemin mekaniğinde yapılabilen kabullerden biri de doymun olmayan zeminlerin doymun kabul edilerek, ortamdaki doymun zemin özelliklerinin kararlı ve sürekli olduğu düşüncesiyle problemler çözülmektedir. Gerçekleştirilen deneylerin ekonomik olması ve hızlı sonuçlar vermesi, bilinen zemin parametrelerinin kullanılması doymun zemin varsayımının tercih edilmesinin

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, 54187, Sakarya TURKEY. E-mail address: aozocak@sakarya.edu.tr, Phone: +902642955737

sebeplerden bazılarıdır. Bu konuda savunulan görüş doygun zemin kabulünün daha muhafazakâr sonuçlar vermesi olmaktadır. Yapılan çalışmalar doygun olmayan zemin çözümlerinin doygun durum kabulünden çok farklı olduğunu ortaya koymaktadır [1]. Doygun olmayan zeminlerin kayma dirençleri doygun durumdakinden daha yüksektir ve daha kısıtlı sıkışma özelliğine sahiptir. Doygun olmayan zeminler için doygun zemin varsayımı yapmak tasıma gücü ve oturma açısından hatalı ve ekonomik olmayan analizler ortaya koyabilmektedir [2].

Dünya genelinde ve özellikle Türkiye’de gerçekleştirilen altyapı inşaatları son yıllarda artış göstermektedir. Karayolu, havaalanı ve barajlar gibi yapıların tamamı sıkıştırılmış zeminler üzerine inşa edilmektedir. Son dönemlerde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde sıkıştırılmış zeminler, rezidüel zeminler, göçebilen zeminler ve şişen zeminler konularının doygun olmayan zemin mekaniğine özel konular arasında oldukları görülmektedir [3, 4]. Yollar, havaalanları, toprak barajlar ve altyapılara ait zemin yapıları sıkıştırılmış zeminlere örnek verilebilir [4]. Bunun yanında özellikle ülkemizin yarı kurak bir iklime sahip olduğunu göz önünde bulundurduğumuzda, geoteknik tasarımlara ve zemin problemlerine bulunacak çözümlerin doygun olmayan zeminlerin mekaniğinin konusu olduğu görülmektedir. Bu durumda doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerini kullanmanın yerinde olacağı anlaşılmaktadır.

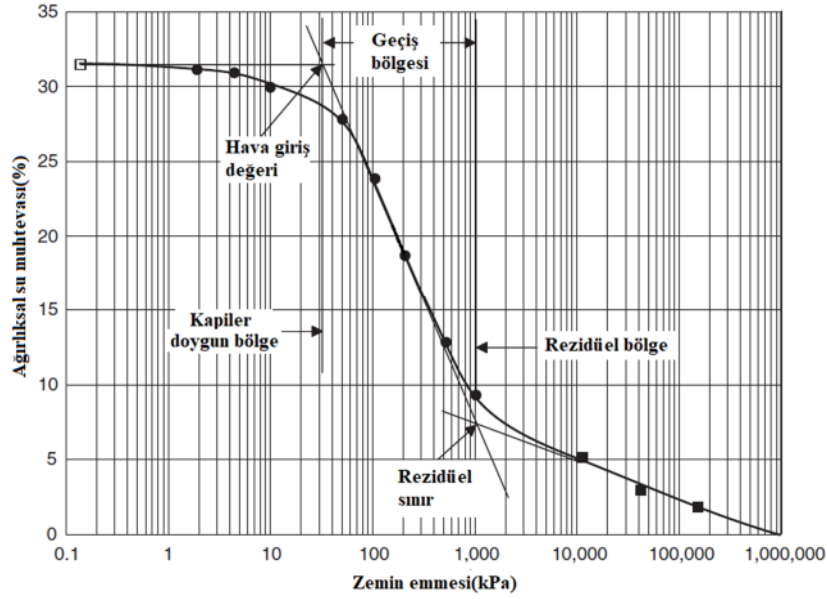
Bu çalışmada, bir dolgu sahasından elde edilen killi zeminlerin davranışı emme değeri-su muhtevası ilişkisi üzerinden analiz edilmiştir. Bu kapsamda, farklı kil yüzdelerine sahip üç farklı killi zemin üzerinde filtre kağıdı yöntemi kullanılarak kılcal emme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Zeminlere ait zemin-su karakteristik eğrileri (SWC eğrisi) elde edilerek, literatürde yer alan farklı eğri modelleriyle uyumu irdelenmiştir.

2. Literatür

Zemin emmesi doygun olmayan zemin davranışını kontrol eden en önemli parametrelerden biridir [5, 6]. Doygun olmayan zeminlerdeki beliren negatif boşluk suyu basıncını zemin emmesi olarak tarif etmek mümkündür. Zemin emmesi basitçe zeminin su çekmeye ve tutmaya olan yeteneği olarak tanımlanabilir [7]. Zemin emmesi, kılcal gerilme ve eriyik emme bileşenlerinden oluşmaktadır [8]. Kılcal gerilme, zemin boşluk suyundaki rölatif negatif basınçtır [9]. Kılcallık olayı ile ilgilidir ve zemin boşluklarındaki hava ve su basınçları arasındaki fark olarak tanımlanır [10]. Eriyik emme ise kil mineralleri ile boşluk suyu arasındaki fiziko-kimyasal etkileşimlere bağlıdır. Kılcal gerilme değeri zemin yapısı tarafından kontrol edildiği için zemin davranışını göstermesi açısından eriyik emme değerine nazaran daha dikkat çekmektedir [11].

Doygun olmayan zeminlerde emme değeri-su muhtevası ilişkisi zemin davranışını ölçmek için önemli bir parametredir [4]. Doygun zeminlerin davranışının analizinde gerilme durumu ve boşluk oranı arasındaki ilişkiyi tanımlayan konsolidasyon eğrisine benzer olarak doygun olmayan zeminlerde zemin davranışının analizinde zemin su karakteristik eğrisi önemli bir rol oynamaktadır [3]. Doygun olmayan zeminin sahip olduğu su muhtevası (ya da doygunluk derecesi) ve emme değeri ilişkisi "Zemin Su Karakteristik Eğrisi (SWC eğrisi)" olarak bilinmektedir [4]. SWC eğrisinin iki önemli parametresi vardır; hava giriş değeri (veya kabarcıklanma basıncı) ve rezidüel doygunluk derecesi [12, 13]. Hava giriş değeri, zemin-su karakteristik eğrisindeki ilk kırılmadır [14]. Bu emme değerinde büyük boşluklardan başlayarak su çıkışı başlamaktadır. Rezidüel

doygunluk derecesinden itibaren ise zeminden su çıkışı çok daha zor olmaktadır [13]. Tipik SWC eğrisi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tipik SWC eğrisi [15].

Houston ve arkadaşları, filtre kağıdı yöntemi kullanarak kil, silt ve kum zeminlere ait zemin-su karakteristik eğrilerini oluşturmuştur. Killi zeminlerin kılcal gerilme değerini silt ve kuma göre çok daha yüksek bulmuştur [5]. Leong ve arkadaşları, çalışmasında filtre kağıdı yöntemiyle elde ettiği toplam ve kılcal emme eğrilerini literatürde elde edilen birbirinden farklı emme eğrileri ile karşılaştırmıştır. Yaptığı incelemede 1000 kPa üzerindeki filtre kağıdı ölçümlerinde toplam ve kılcal gerilme değerleri arasındaki farkın ortadan kalktığını belirtmiştir [16]. Qian ve Lu, farklı su muhtevalarında ve sıkıştırma enerjilerinde hazırlanmış killi numunelerin SWC eğrilerini oluşturmak için filtre kağıdı metodu uygulamıştır. Deney sonuçları, hava giriş değerinin ve su tutma kapasitesinin kompaksiyon derecesinin yükselmesiyle arttığını göstermiştir [17]. Zhou ve arkadaşları, kompozit zeminler üzerinde filtre kağıdı ile yaptıkları kılcal gerilme ölçümlerinde, düşük su muhtevalarında büyük değerler, yüksek su muhtevası değerlerinde küçük kılcal değerler bulmuştur [18]. Chen ve arkadaşları, rezidüel bir zeminin SWC eğrisini filtre kağıdı kullanarak elde etmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda başlangıç su muhtevası, zemin yapısı ve gerilme durumu gibi bazı faktörlerin zemin-su karakteristiğini etkilediği gözlenmiştir [19].

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Zemin özellikleri

DeneySEL çalışma kapsamında incelenen zeminlerin doğal görünüşleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Zeminler üzerinde özgül ağırlık tayini, elek analizi, hidrometre ve kıvam limiti deneyleri yapılarak fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Yapılan zemin sınıflandırma deneylerinin sonucunda, TS1500/2000 zemin sınıflandırma standardına göre üç numune de orta plastisiteli kil (CI) olarak bulunmuştur [20]. Zeminlerin dane dağılım eğrileri Şekil 3’de gösterilmiştir. Elde edilen fiziksel

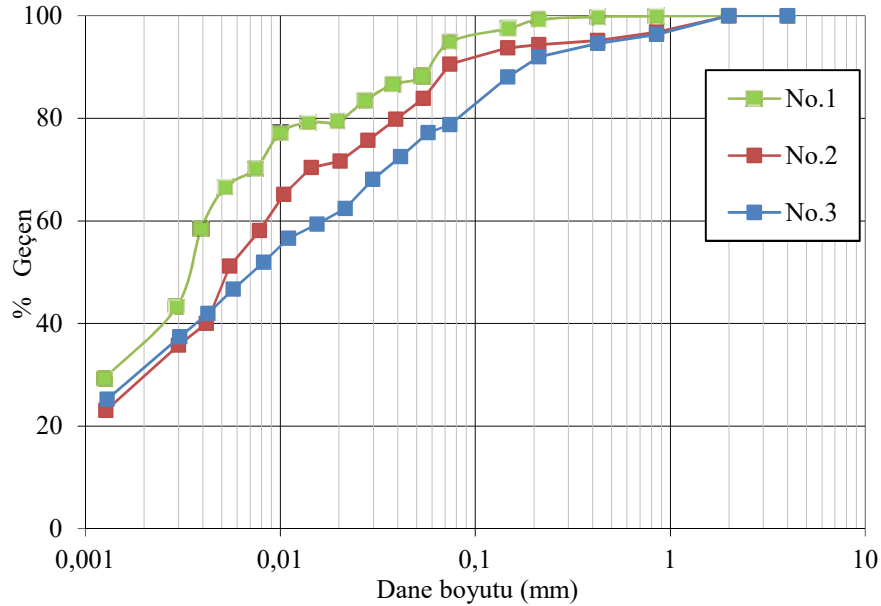
özellikler Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 2. Zeminlerin doğal görünümleri

Tablo 1. Zeminlerin fiziksel özellikleri.

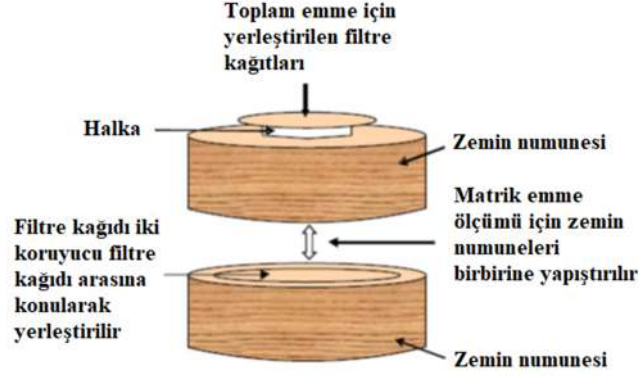
Numune Adı	Renk	w _L %	w _p %	w _s %	I _p	Zemin Sınıfı	G _s	%Kil	%Silt	%Kum
No.1	Beyaz	48	16	13	32	CI	2.78	37	58	5
No.2	Sarı-beyaz	40	16	14	24	CI	2.79	30	61	9
No.3	Yeşil	44	19	15	25	CI	2.76	32	47	21



Şekil 3. Zeminlerin dane dağılım eğrileri

3.2. Filtre kağıdı yöntemi

Filtre kâğıdı yöntemi ile emme dolaylı olarak ölçülmektedir [7]. Filtre kâğıdı ile ölçüm yapmanın basit, ucuz ve çok sayıda ölçüme aynı anda izin veriyor olması, bu yöntemi çok fazla tercih edilir yapmıştır [5, 21, 22]. Filtre kağıdı yöntemiyle toplam ve kılcal gerilme ölçümü yapmak mümkündür [7, 21]. Zemin ile filtre kağıdı temas halinde yerleştirilirse kılcal gerilme, temas halinde olmadan yerleştirilirse toplam emme ölçümü yapılmaktadır [7]. Filtre kağıdı yerleşimi Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Filtre kağıdının zemine yerleştirilmesi [7].

3.3. Deney programı

Zemin emme ölçümü ve SWC eğrisi deneylerinde konsolide edilerek hazırlanan zemin numuneleri kullanılmıştır. Konsolide numuneleri oluşturmak için, No.4 elek altı zemin ilk olarak likit limit değerinin yaklaşık 1,5 katı su muhtevasında bulamaç haline getirilmiştir. Daha sonra konsolidasyon hücresine yerleştirilmiştir. 100 kPa basınç altında konsolidasyonunu tamamladıktan sonra 50 mm çapındaki halkalara alınarak deney numuneleri oluşturulmuştur. SWC eğrisini oluşturmak için zeminin doygun duruma, yani 0 kılcal gerilme değerine getirilmesi gerekmektedir. Konsolidasyon yönteminde numunelerin yaklaşık olarak doygun hale gelmesi sebebiyle numune hazırlamada bu yöntem tercih edilmiştir.

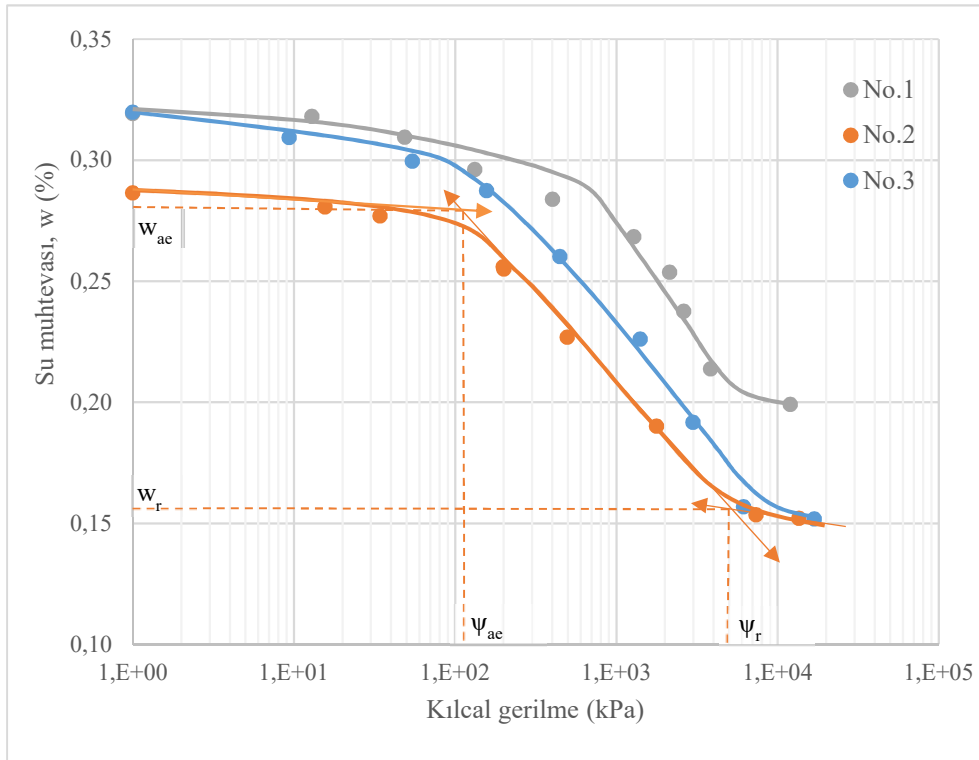
Emme ölçümleri için filtre kağıdı yöntemi uygulanmıştır (Şekil 5). Filtre kağıdı olarak Whatman No.42 filtre kağıdı tercih edilmiştir. Filtre kağıdı yöntemi uygulanırken ASTM D5298-10'da detayları verilmiş olan deney prosedürü kullanılmıştır [23]. Yapılan ölçümler standartta verilen eşitlikler ve kalibrasyon eğrisi kullanılarak zemin emme değerlerine çevrilmiştir.



Şekil 5. Filtre kağıdı yönteminin uygulanması.

3.4. Deney Sonuçları

Üç farklı killi zemine ait emme değerleri ve SWC eğrileri filtre kağıdı yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Kil zeminlere ait SWC eğrileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Kil oranı ve plastisitesi yüksek olan zeminin filtre kağıdı ölçüm sonuçları daha düzensiz bir dağılım göstermiştir. Bu durumun kil oranı arttıkça emme dengesinin sağlanmasındaki zorluğun ve gerekli denge süresinin artması nedeniyle kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6. Zeminlerin zemin-su karakteristik eğrileri

Zeminin fiziksel özelliklerinin SWC eğrisinin biçimini etkilediği görülmüştür. Kil yüzdesi yüksek olan No.1 zeminin SWC eğrisi yukarıya doğru ötelenmektedir. Bunun yanında doymuluktan ayrılma aşamasındaki eğiminde de bir artış fark edilmektedir. Aynı su muhtevası değerlerinde kil içeriği arttıkça kılcal gerilme değerlerinin büyüdüğü görülmüştür. Zeminlerin SWC eğrisi karakteristikleri Tablo 2'de sunulmuştur. Kil yüzdesi ve zeminin kıvam değerlerinin SWC eğrisinin karakteristiklerini etkilediği belirlenmiştir.

Tablo 2. Zeminlerin fiziksel özellikleri ve SWCC karakteristikleri

Zemin	w _L %	I _p	%Kil	ψ _{ac} (kPa)	ψ _r (kPa)	w _{ac} %	w _r %
No.1	48	32	37	700	5000	29	20,5
No.2	40	24	30	110	5000	28	16,5
No.3	44	25	32	120	8000	30	15,5

Not: ψ_{ac}: Hava-giriş değeri (kabarıkılanma basıncı), ψ_r: Rezidüel değer, w_{ac}: Kabarcıkılanma su muhtevası, w_r: Rezidüel su muhtevası

Likit limit değeri en düşük olan zeminin kabarcıkılanma basıncı en düşük bulunmuştur. No.1 ve

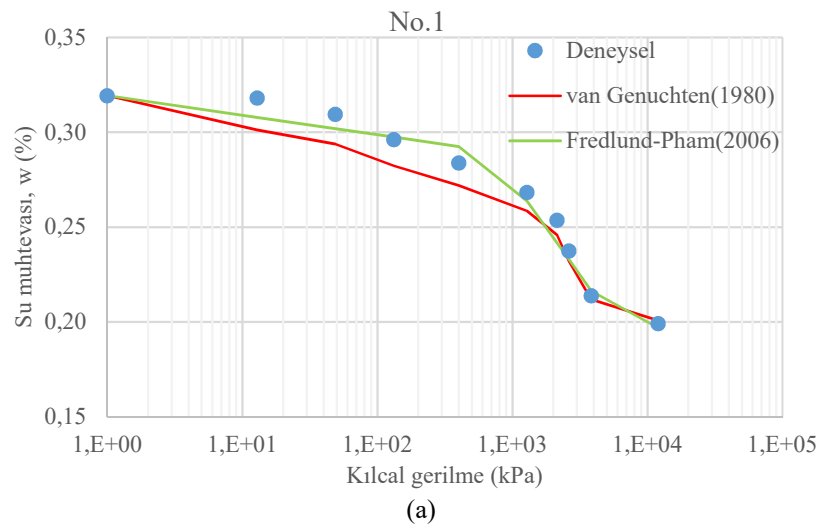
No.2 zeminleri aynı rezidüel değere sahiptir, fakat likit limit değeri yüksek olan zemin rezidüel değerine daha yüksek su muhtevasında ulaşmıştır. Zeminin plastisite değerinin artması kabarcıklanma basıncı değerini artırırken, rezidüel değerine daha yüksek su muhtevasında ulaşılmasını sağlamıştır. Kil yüzdesi ve plastisitesi birbirine yakın olan zeminlerin kabarcıklanma basınçları birbirine çok yakinken, rezidüel değerleri birbirinden çok farklı bulunmuştur.

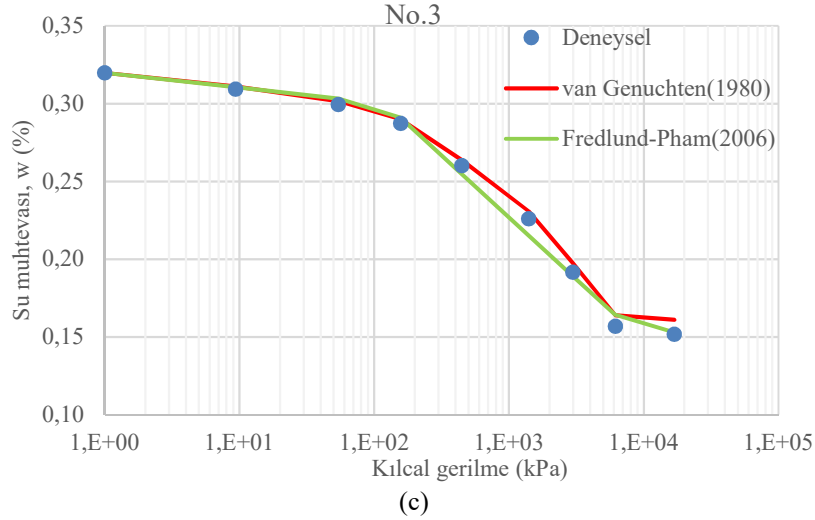
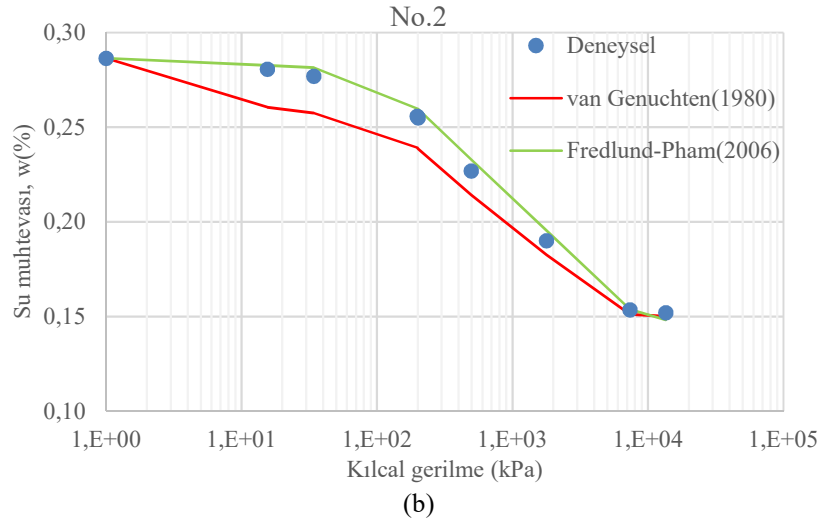
Elde edilen deneysel verilerden Tablo 3'te yer alan eşitlikler kullanılarak SWC eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan eğrilerin deneysel verilerle olan karşılaştırılması Şekil 7'de gösterilmiştir.

Tablo 3. SWC eğrisi eşitlikleri [15].

Kaynak	Eşitlikler	Parametreler
van Genuchten (1980) [24]	$\theta = \frac{1}{[1 + (a\psi)^n]^m}$	$m = 1 - \frac{2}{n}$
	$w_1(\psi) = w_u - S_1 \log(\psi)$	$1 \leq \psi \leq \psi_{ae}$
	$w_2(\psi) = w_{ae} - S_2 \log(\frac{\psi}{\psi_{ae}})$	$\psi_{ae} < \psi < \psi_r$
Fredlund-Pham (2006) [25]	$w_3(\psi) = S_3 \log(\frac{10^6}{\psi})$	$\psi_r \leq \psi < 10^6$
		m ve n : eğri oluşturma parametreleri S_1, S_2 ve S_3 : eğri üzerindeki eğimler w_u : 1 kPa'daki su muhtevası w_{ae} : kabarcıklanma su muhtevası

Fredlund-Pham (2006) eğri oluşturma modeli tüm zeminler için deneysel verilere daha yakın gerçekleşmiştir. Van Genuchten (1980) modeli ise sadece No.3 zemini için deneysel verilerle tam uyum göstermiştir. Diğer zeminlerle kısmen uyum sağlanmıştır. Van Genuchten (1980) modelinin No.1 ve No.2 zeminlere uygulanmasında, doymun bölgeye yaklaştıkça eğri deneysel verilerden uzaklaşmıştır. Buna karşılık rezidüel bölgeye yaklaştıkça eğri ve deney sonuçları çakışmaya başlamıştır. Fredlund-Pham (2006) modeli daha doğrusal bir yaklaşım ortaya koyarken, Van Genuchten (1980) modeli daha parabolik bir eğri oluşturmuştur.





Şekil 7. Eğri modellerinin deneysel verilere göre oluşturulması.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada filtre kağıdı yöntemi kullanılarak 3 farklı killi zeminin emme ölçümleri yapılmış ve SWC eğrileri oluşturulmuştur. Zeminin fiziksel özelliklerinin emme-su ilişkisini etkilediği görülmüştür. Literatürle uyumlu olarak kil içeriğin artmasıyla SWC eğrilerinin yüksek su muhtevalarına değerlerine doğru ötelendiği görülmüştür. Ayrıca kil oranı arttıkça SWC eğrisinin doygunluktan ayrılma kısmının eğiminin de arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında kil oranının yükselmesi kabarcıklanma basıncını yükseltmekte ve rezidüel su muhtevası değerini arttırmaktadır. Likit limit ve plastisitesi yükseldikçe rezidüel değere daha yüksek su muhtevasında ulaşıldığı görülmüştür. Fredlund-Pham (2006) ve Van Genuchten (1980) eğri modelleri kullanılarak oluşturulan SWC eğrileri karşılaştırılmıştır. Fredlund-Pham (2006) daha doğrusal bir yaklaşım olmakla beraber deneysel verilerle daha uyumlu bulunmuştur.

Kaynaklar

- [1] Önalp, A. Zeminler ve mekaniği. Birsen Yayınevi. İstanbul: 2002.
- [2] Özocak, A. Doygun olmayan siltli zeminlerin sıkışabilirliği. Doktora tezi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: 2003.
- [3] Barbour SL. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. Canadian Geotechnical Journal 1998; 35(5), 873-894.
- [4] Fredlund DG, Rahardjo H. The role of unsaturated soil behaviour in geotechnical engineering practice. In Proceedings of the 11th Southeast Asian Geotechnical Conference 1993; pp. 37-49.
- [5] Houston S, Houston W, Wagner A. Laboratory filter paper suction measurements. Geotechnical Testing Journal 1994; Vol. 17, No. 2, p. 185-194.
- [6] Guan Y, Fredlund DG. Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction. Canadian Geotechnical Journal 1997; 34(4), 604-614.
- [7] Bulut R, Wray W. Free energy of water-suction-in filter papers. Geotechnical Testing Journal 2005; Vol. 28, No. 4, p. 355-264.
- [8] Agus SS, Schanz T, Fredlund DG. Reply to discussion by Haghghi et al. on “Measurements of suction versus water content for bentonite–sand mixtures”. Canadian Geotechnical Journal 2011; 48(2), 336–337.
- [9] Krahn J, Fredlund DG. On total, matric and osmotic suction. Journal of Soil Science Journal 1972; Vol. 114, No. 5, p. 339–348.
- [10] Kim H, Ganju E, Tang D, Prezzi M, Salgado R. Matric suction measurements of compacted subgrade soils. Road Materials and Pavement Design 2015; 16(2), 358-378.
- [11] Wan AWL, Gray MN, Graham J. On the relations of suction, moisture content and soil structure in compacted clays. In Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris 1995; Vol. 1, p. 215-222.
- [12] Li AG, Tham LG, Yue ZQ, Lee CF, Law KT. Comparison of field and laboratory soil–water characteristic curves. Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2005; 131(9), 1176-1180.
- [13] Fredlund DG, Sheng D, Zhao J. Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal 2011; 48(2), 186-198.
- [14] Elkady TY, Al-Mahbashi A, Dafalla M, Al-Shamrani M. Effect of compaction state on the soil water characteristic curves of sand–natural expansive clay mixtures. European Journal of Environmental and Civil Engineering 2017; 21(3), 289-302.
- [15] Fredlund DG, Rahardjo H, Fredlund MD. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons: 2012.
- [16] Leong E, He L, Rahardjo H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. Geotechnical Testing Journal 2002; Vol. 25, No. 3, p. 322-333.
- [17] Qian JS, Lu H. Effect of compaction degree on soil-water characteristic curve of chongming clay. In Applied Mechanics and Materials 2011; Vol. 90, p. 701-706.
- [18] Zhou WG, Bao YL, Zhou HB. Research on soil-water characteristic curve of unsaturated mixed-soil in west sichuan. In Applied Mechanics and Materials 2013; Vol. 353, p. 996-1000.
- [19] Chen DX, Zhang MX, Lin YQ, Ni J. Measurement of swcc of xiamen residual soil by filter paper. In Applied Mechanics and Materials 2013; Vol. 256, p. 1046-1051.
- [20] TS1500. İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması. Ankara: 2000.
- [21] Bulut R, Lytton RL, Wray WK. Soil suction measurements by filter paper. In Expansive clay

- soils and vegetative influence on shallow foundations 2001; p. 243-261.
- [22] Vanapalli SK, Salinas LM, Avila D, Karube D. Suction and storage characteristics of unsaturated soils. In Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils 2004; Vol. 3.
- [23] Standard ASTM D5298. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper, ASTM International. West Conshohocken: 2010.
- [23] Fredlund DG, Rahardjo H, Fredlund MD. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons: 2012.
- [24] Van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil science society of America journal 1980; 44(5), 892-898.
- [25] Fredlund DG, Pham HQ. A volume-mass constitutive model for unsaturated soils in terms of two independent stress state variables. In Unsaturated Soils 2006; p. 105-134.