



Pedotransfer Fonksiyonların (PTFs) Bazı Toprak Fiziksel Özellikleri için Değerlendirilmesi

Pelin Alaboz^{1*}, Ahmet Ali Işıldar¹

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü – Isparta-Türkiye

*Sorumlu Yazar: pelinalaboz@isparta.edu.tr

MAKALE BİLGİSİ

Alınış tarihi: 23.12.2019

Kabul tarihi: 26.12.2019

Anahtar Kelimeler: Pedotransfer Fonksiyonlar, Nem Sabiteleri, Hidrolik İletkenlik, Hacim Ağırlığı, Agregat Stabilitesi, Penetrasyon Direnci

ÖZET

Son yıllarda, bazı toprak özelliklerine ilişkin veriler kullanılarak bir başka toprak özelliğinin tahmin edilmesine yönelik çalışmaların sıklığı ve bu kapsamda pedotransfer fonksiyonlara (PTFs) olan ilginin arttığı gözlenmektedir. Bu çalışmada, bazı toprak fiziksel özellikleri (hidrolik özellikler, hacim ağırlığı, penetrasyon direnci ve agregat stabilitesi) için oluşturulan pedotransfer fonksiyonlar değerlendirilmiştir. Söz konusu tahmin modellerinde, tekstürel fraksiyonlar (% kum, silt ve kil) ve organik madde ortak olarak kullanılan toprak özellikleri olarak belirlenmiştir. Ayrıca hidrolik iletkenlik ve penetrasyon direnci tahminlerinde, hacim ağırlığının modellere dahil edilmesinin doğruluk düzeyini arttırdığı gözlenmiştir. Geçmişte yürütülen araştırmalar; elde edilen tahmin modellerinin kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde, yüksek belirleme katsayısı (R^2) ve düşük hata kareler ortalaması karekökünü (RMSE) önemli göstergeler olarak bildirmektedir. Modellerin tahmin doğruluk düzeyi; toprak özellikleri, bölgenin iklimi, analiz yöntemleri, verilerin homojenliği gibi parametrelerden etkilenebilmektedir.

Evaluation of Pedotransfer Functions (PTFs) for Some Soil Physical Properties

ARTICLE INFO

Received: 23.12.2019

Accepted: 26.12.2019

Keywords: Pedotransfer Functions, Moisture Constants, Hydraulic Conductivity, Bulk Density, Aggregate Stability, Penetration Resistance.

ABSTRACT

In recent years, studies on the estimation of another soil property using data on some soil properties (Pedotransfer Functions, PTFs), are widely used. In this context, increased interest in pedotransfer functions (PTFs) has been observed. In this study, the pedotransfer functions created for some soil physical properties (hydraulic properties, bulk density, penetration resistance and aggregate stability) were investigated. Textural fractions (% sand, silt and clay) and organic matter were determined as commonly used soil properties in the estimation models. In addition, the inclusion of the bulk density increased the accuracy of estimation in models of hydraulic conductivity and penetration resistance. Previous research had determined that high coefficient of determination (R^2) and low root mean square error (RMSE) were used as important indicators in assessing the usability of the estimation models obtained. The estimated accuracy level of the models can be affected by parameters such as soil properties, climate of the region, methods of analysis, homogeneity of data.

1. Giriş

Modelleme çalışmaları pek çok alanda olduğu gibi toprak biliminde de sıklıkla çalışılan bir konu haline gelmiştir. Pedotransfer fonksiyonlar (PTFs) sıklıkla kolay ölçülen toprak özelliklerinden zahmetli, zaman alıcı ve pahalı yöntemlerle ölçülen toprak özelliklerinin tahmin edilebilmesi için oluşturulan matematiksel modeller olarak tanımlanmaktadır (McBratney et al., 2002; Pachepsky and Van Genuchten, 2011). Bu fonksiyonlar Lin et al. (2014) tarafından temel toprak özellikleri (temel PTFs), toprağın değişken parametreleri (dinamik sürekli PTFs), horizon ve strüktürel özellikler (sınıf PTFs), topoğrafik özellikler (topoğrafik PTFs) iklim ya da arazi kullanım planlaması olmak üzere beş kategoride sınıflandırılmıştır. PTFs uygulamalarında, uluslararası nitelik taşıyan UNSODA (Unsaturated Soil Hydraulic Database), HYPRES (Hydraulic Properties of European Soils), NRCS (National Soil Survey Center Characterization database) gibi veri

tabanları yanında Rect ve Rosetta gibi programlara yer verilmektedir.

Modellerin oluşturulması aşamasında kullanılan bazı istatistiksel yöntemler arasında; bağımlı ve bağımsız değişkenlerin doğrudan ve dolaylı etkilerini belirleyen path analizi, birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi ölçmeye yönelik çoklu lineer regresyon (Yılmaz vd., 2005; Shalmani et al., 2010; Igwe et al., 2013) ve farklı algoritmalara başvuru yapıp sinir ağırları (Yang and You, 2013; Yakupoğlu vd., 2015; Mohanty et al., 2015; Usta et al., 2018) bulunmaktadır. PTFs ile oluşturulan modellerde gerçek değerler ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılmasında diğer bir deyimle modellerin geçerliliğinin test edilmesinde çoğunlukla hata kareler ortalaması karekökü (RMSE), regresyon belirleme katsayısı (R^2) ve ortalama hata (ME) parametreleri kullanılmaktadır (Van Looy et al., 2017) (Eşitlik 1,2,3). Aynı amaca yönelik fakat daha az sıklıkta kullanılan parametreler arasında ise ortalama mutlak hata (MAE),

ortalama sapma (MD) ve kareler ortalamalarının karekökü sapması (RMSD) sayılabilir.

$$R^2 : \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE : \sqrt{\frac{\sum(X_g - X_t)^2}{n}} \quad (2)$$

$$ME : \sum_{i=1}^n \frac{(X_g - X_t)}{n} \quad (3)$$

Denklemden kullanılan y_i : deneysel olarak belirlenmiş değer, \bar{Y} : regresyon eşitliğinden hesaplanmış değer, y : deneysel verilerin ortalaması, X_g : gerçek değer, X_t : tahmin edilen değer, n : örnek sayısı'nı ifade etmektedir.

1.1. Hidrolik özelliklerin tahmininde PTfs'nin kullanımı

Toprak fiziksel özelliklerinin tahminine yönelik pedotransfer fonksiyonlar çoğunlukla toprakta suyun tutulması ve hidrolik iletkenlik üzerinedir (Brooks and Corey, 1964; Champbel 1974; Van Genuchten, et al., 1980). Toprakta su tutulmasına ilişkin PTFS'lerde noktasal ve parametrik olarak 2 yaklaşım söz konusudur. Çeşitli basınç yükleri altında toprak su içeriğinin tahmini için her bir basınç yüküne özgü ayrı modellerin oluşturulması noktasal yaklaşımdır (Saxton et al., 1986; Vereecken et al., 1989; Rawls and Brakensiek, 1989). Modellerdeki tahmin katsayılarının belirlenmesi ise parametrik yaklaşımlardır (Ghorbani Dashtaki and Homae 2004; Rajkaet et al., 2004). Bu amaçla en sık kullanılan denklemler Brooks and Corey (1964), Campbell (1974) ve Van Genuchten et al.(1980) tarafından önerilmiş olanlardır (Eşitli 4,5,6).

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_b}{h}\right)^\lambda \quad (\text{Brooks and Corey, 1964}) \quad (4)$$

$$h_b \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{-b} \quad (\text{Campbell, 1974}) \quad (5)$$

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = 1 / (1 + |ah|)^m \quad (\text{Van Genuchten, 1980}) \quad (6)$$

θ : Hacimsel su içeriği (cm cm⁻³), θ_r : Kalan su içeriği (residual) (cm cm⁻³), θ_s : Doygun su içeriği, (cm cm⁻³), h : Toprak su potansiyeli (cm), h_b : Hava giriş basıncı (cm) α : Gözenek çapı ortalaması ile ters orantılı bir katsayı (cm⁻¹), m , n : Denklem katsayısı, $n > 1$, ve $m : 1 - 1/n$, $0 < m < 1$, λ : toprak karakteristik eğrisinin eğimini etkileyen parametre . b : tekstür ile ilgili katsayı

Rosetta programı kapsamında hidrolik özelliklerin (su tutma parametreleri, doymuş ve doymuş olmayan durumdaki hidrolik iletkenlik değerleri) tahmini için geliştirilen 5 farklı pedotransfer fonksiyon; ¹tekstür sınıfı, ²kum, kil ve silt içeriği, ³kum, kil ve silt içeriği, hacim ağırlığı, ⁴kum, kil ve silt içeriği, hacim ağırlığı, 33kPa'daki

su içeriği, ⁵kum, kil ve silt içeriği, hacim ağırlığı, 33kPa ve 1500 kPa'daki su içeriği parametrelerini içermektedir. Rosetta programı kapsamındaki fonksiyonlar ile hidrolik özellikler başarılı bir şekilde tahmin edilebilmektedir (Unguruşu et al., 2012; Alvarez-Acosta et al., 2012)

Toprak su karakteristikleri ve hidrolik iletkenliğin tahminine (hidrolik özellikler) ilişkin modellerde kum (Saxton et al., 1986; Vereecken et al., 1989), silt (Wösten et al., 1999; Gülser ve Candemir 2014) ve kil (Rajkaet et al., 2004; Cemek et al., 2004; Abbasi et al., 2011 Yakupoğlu vd. 2013) içerikleri yaygın olarak kullanılan toprak özellikleridir (Çizelge 1). Toprak hacim ağırlığı ve organik madde özelliklerinin modellere dahil edilmesi tahmin doğruluğunu arttırmaktadır (Abbasi et al., 2011; Mohawesh 2013; Gülser ve Candemir 2014). Saturasyon yüzdesinin kullanıldığı modellerde aynı düzeyde etki gözlenmemiş ve bazı nem sabiteleri ile saturasyon yüzdesi arasındaki korelasyonlar (yüksek, Grewal et al., 1990 ve düşük, Yakupoğlu vd., 2013) değişkenlik göstermiştir. Bu çalışmalarda örnek sayısı oldukça düşüktür ($n:25-30$). Modellerde veri setini oluşturan özelliklerin oldukça geniş değişim aralığına sahip olması ve çok sayıda örnekle çalışılması yüksek tahmin doğruluğu sağlamaktadır (Wösten et al., 2001). Toprağın çoğu fiziksel özelliklerinin nem tahmin modellerinde kullanımı oldukça yaygınken (Minasny and Hartemink 2011; Botula 2013; Gülser ve Candemir 2014), belirlemesi oldukça kolay olan penetrasyon direnci (PR) özelliğine pek yer verilmediği görülmektedir (Bayat and Zadeh 2018). Bunda en önemli etken belirli bir nem düzeyi için kullanılması gerekliliğidir. Keza arazi koşullarında pek çok değişkenin etkisi altındadır (Unger and Jones, 1998; Bradford, 1986; Hernanz et al., 2000). Yine porozite (P) (Gülser 2004; Suleiman and Ritchie, 2001), kation değişim kapasitesi (KDK), elektriksel iletkenlik (EC), CaCO₃'üsi modellerde pek sık kullanılmayan özellikler arasındadır. Nem sabitelerinin lineer regresyon modelleriyle tahmin edilebilirliğinde, porozite'nin modelin tahmin doğruluk düzeyine katkısı yüksektir (Gülser, 2004). Hidrolik iletkenlik tahmin modellerinde, nem sabiteleri, tekstürel veriler ve hacim ağırlığının bulunması tahmin doğruluk düzeyini arttırmaktadır (Yakupoğlu vd., 2013).

Farklı tahmin modellerinin kurak ve yarı kurak bölgelerde kullanılabilirliği araştırıldığında (Mohawesh, 2013), düşük RMSE elde edilen birçok model bulunmaktadır (Cosby et al., 1984; Rawls and Brakensiek, 1989; Manrique et al., 1991) Hutson and Wagenet, 1992; Wösten et al., 1999) Söz konusu modellerin oluşturulmasında kullanılan toprakların yer aldığı bölgede iklim ve topoğrafik özelliklerin benzerliği yanında örnekleme sayılarının fazla olması, modellerin tahmin doğruluğunun yüksek olmasının nedeni olarak görülmektedir.

Çizelge 1. Hidrolik özellikleri tahmin modellerinde kullanılan toprak özellikleri
Table 1. Soil properties used in the hydraulic properties estimation models

Kaynaklar	K	C	Si	TK	SN	P	Ha	Sat	OM	PR	KDK	EC	CaCO ₃	pH
Saxton et al. (1986)	+	+												
Vereecken et al. (1989)	+	+												
Grewal et al. (1990)								+						
Wösten et al. (1999)			+	+			+			+				
Suleiman ve Ritchie (2001)						+								
Rajkalet et al. (2004)	+	+	+				+			+				
Cemek et al. (2004)	+	+	+				+							
Ghorbani Dashtaki and Homae (2004)	+	+					+							
Gülser (2004)	+	+				+					+			
Zacharias and Wessolek (2007)	+	+					+							
Adhikary et al. (2008)	+	+	+											
Abbasi et al. 2011	+	+	+				+			+				
Minasny and Hartemink (2011)	+	+					+							
Yakupoglu vd. (2013)	+	+	+	+			+	+						
Botula (2013)	+	+					+							
Gülser ve Candemir (2014)			+	+	+	+	+							
Miha'likova et al. (2015)	+	+	+	+	+			+	+			+		+
Tunçay et al. (2018)	+	+	+	+	+		+		+			+	+	+
Bayat and Zadeh (2018)	+	+	+						+	+	+	+	+	+

K:kum, C:kil, Si:silt, TK: tarla kapasitesi, SN: solma noktası, P:porozite, HA: hacim ağırlığı, OM: organik madde, PR: penetrasyon direnci, KDK: katyon değişim kapasitesi, EC: Elektriksel iletkenlik, CaCO₃: Kireç

1.2. Hacim ağırlığı tahmininde PTfs'nin kullanımı

Hacim ağırlığı, porozite ve hacimsel nem içeriği gibi özelliklerin belirlenmesi için bilinmesi gereken özelliklerden biridir ve sıklıkla tekstür, organik madde içeriği, arazi yönetimi ve sıkışma faktörlerden etkilenir (Al-Qinna ve Jaber, 2013). Hacim ağırlığının belirlenmesinde uygun nem aralığının yakalanma zorluğu tahmin modelleri aracılığı ile aşılabilmektedir. Hacim ağırlığı tahmin modellerinde kum, kil ve silt (Rawls, 1983; Keller et al., 2010; Nanko et al., 2014), organik karbon

(Alexander 1980; Heuscher et al., 2005; Benites et al., 2007; Al-Qinna et al., 2013) ve toprak derinliği (Heuscher et al., 2005; Keller et al., 2010; Minasny and Hartemink, 2011) oldukça sık kullanılan toprak özellikleridir (Çizelge 2). Modellere organik karbon veya organik madde'nin dahil edilmesi tahmin doğruluğunu arttırmaktadır (Abdelbaki et al., 2018). Hacim ağırlığı, kum ile pozitif ve organik madde, KDK, Ca+Mg, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve kil ile negatif ilişkiler sergilemektedir (Giarola et al., 2002; Özdemir vd., 2018).

Çizelge 2. Hacim ağırlığı tahmin modellerinde kullanılan toprak özellikleri
Table 2. Soil properties used in the bulk density estimation models

Kaynaklar	K	C	Si	OC	OM	N	D	YK	KDK	Ca+Mg	TK/SN
Alexander (1980)				+							
Honeysett and Ratkowsky (1989)								+			
Rawls (1993)	+	+			+						
Dexter (2004)		+		+							
Heuscher et al. (2005)	+	+	+	+		+	+				
Tranter et al. (2007)	+						+				
Benites et al. (2007)		+		+							
Keller et al. (2010)	+	+	+		+						
Suuster et al. (2011)		+		+		+	+				
Minasny and Hartemink (2011)	+				+		+				
Hollis et al. (2012)		+					+				
Han et al. (2012)					+						
Al-Qinna et al. (2013)	+			+							
Nanko et al. (2014)	+	+	+	+	+						
Özdemir vd. (2018)	+	+	+		+				+	+	+

Hacim ağırlığı tahmin modellerinde Al₂O₃ ve Fe₂O₃'e pek yer verilmemiştir. Özellikle tropik bölgelerde yüksek Al₂O₃ ve Fe₂O₃'in agregasyon üzerine etkisi göz önüne alındığında, tahmin modellerinde etkili bir özellik (Schwertmann and Taylor, 1977; Giarola et al., 2002)

olabileceği değerlendirilmektedir. Hacim ağırlığı tahmini ile ilgili geçmişte birçok model üretilmiş olup yakın dönemde başlayan ve hala süren çalışmalarda bunların kullanılabilirlikleri araştırılmaktadır (Kaur et al., 2002; Devos et al., 2005; Perie and Ouimet, 2007; Sevastas et al.,

2018). Özellikle kurak ve yarı kurak koşullarda hacim ağırlığı belirlemelerinin güçlüğü pedotransfer fonksiyonlardan yararlanılma gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır (Brahim et al., 2012).

1.3. Penetrasyon direnci tahmininde PTfs'nin kullanımı

Toprak sıkışmasının bir göstergesi olan penetrasyon direnci; toprağın su içeriği, hacim ağırlığı, organik madde, tekstür, strüktür gibi özelliklerinden etkilenmektedir (Unger and Jones, 1998; Bradford, 1986; Hernanz vd., 2000; Sağlam ve Dengiz, 2017). Penetrasyon direnci

tahminlerinde hacim ağırlığı (Busscher, 1990; Grunwald et al., 2001; Santos et al., 2012) ve nem içeriği (Costantini, 1995; Bayat et al., 2008; Filho et al., 2012) özellikleri oldukça sık kullanılmaktadır (Çizelge 3). Islak toprakta penetrasyon direnci oldukça zayıftır. Kurumayla artan sürtünme direnci penetrasyon direncinin artmasına yol açar (Landsberg et al., 2003). Bu durum penetrasyon direnci ile nem arasındaki ilişkinin yüksek bulunmasının bir nedenidir. Penetrasyon direncinin, kum ile pozitif ve kil ile negatif (Negiş vd., 2016), <0.2 µm por yüzdesi ile pozitif, >50 µm ve 50-8.6 µm arası por yüzdesi ile negatif ilişkiler sergilediğine (Şeker, 1999) ilişkin bazı araştırma sonuçları mevcuttur.

Çizelge 3. Penetrasyon direnci tahmin modellerinde kullanılan toprak özellikleri

Table 3. Soil properties used in penetration resistance estimation models

Kaynaklar	K	C	Si	P	OM	N	Sat	Ha	kPA	D
Bennie and Burger (1988)		+	+			+		+		
Busscher (1990)						+	+	+	+	
Costantini (1996)						+		+		
Grunwald et al. (2001)	+	+	+			+		+		+
To and Kay (2005)		+			+			+	+	
Whalley (2007)	+							+	+	
Bayat et al. (2008)				+		+		+		
Santos et al. (2012)						+		+		
Filho et al. (2012)					+	+		+		

K:kum, C:kil, Si:silt, P: porozite, OM: organik madde, N: nem, Sat: saturasyon yüzdesi, Ha: hacim ağırlığı, kPA: kpa'da tutulan su, D: derinlik

Toprak tekstürü (Grunwald et al., 2001), agregat stabilitesi ve organik madde miktarı (Turgut vd., 2008; Turgut ve Öztaş, 2012) ile penetrasyon direnci arasında önemli korelasyon bulunmaktadır. Penetrasyon direncinin çok fazla parametreden etkilenmesi yüksek. Farklı toprak özellikleri kullanılarak PR tahmin modellerinin oluşturulması PR değerinin daha doğru tahmin edilmesine yol açacaktır. Toprak hidrolik özelliklerinin tahmini kadar yoğun olarak üzerinde çalışılan bir özellik olmasa da, lineer modeller dışında yapay sinir ağları kullanılarak daha yüksek doğrulukla tahminler yapılabilmektedir (Bayat et al., 2008). Penetrasyon direnci tahminlerinde, geniş bir veri seti ve toprak özelliklerinin değişim aralığı dar olan gruplarla çalışılması durumunda daha yüksek doğruluklu tahminler elde edilmektedir (To and Kay, 2005).

1.4. Agregat stabilitesi tahmininde PTfs'nin kullanımı

Primer taneciklerin bir araya gelerek flokülasyonu ve çimentolaşmasıyla oluşan agregatların (Duiker et al., 2003), stabilitesi strüktürel durumun değerlendirilmesinde kullanılan önemli parametrelerden biridir (Six et al., 2000). Toprakta agregat oluşumunda

genel olarak kil mineralleri, organik kökenli koloidal maddeler, demir, alüminyum ve mangan oksitler ve kalsiyum karbonat etkili parametreler arasında sayılmaktadır (Branick and Lal, 2005). Agregat stabilitesi için oluşturulan modellerde oldukça fazla değişken yer almaktadır (Çizelge 4). Örnek sayısı ve değişken sayısındaki artış tahmin doğruluk düzeyini olumlu yönde etkilemektedir.

Tekstürel fraksiyonlar (Shalmani et al., 2010; Saidi et al., 2015; Aziz and Karim, 2016), organik madde (Yakupoğlu vd., 2015; Igwe et al., 2013; Usta et al., 2018) ve KDK (Saidi et al., 2015; Marashi et al., 2017; Annabi et al., 2017) özelliklerine modellerde sıklıkla rastlanılmaktadır (Çizelge 4). Ayrıca kil, organik karbon (Yakupoğlu vd., 2012), tane büyüklük dağılımı, tane yoğunluğu, kireç, pH ve mekanik direnç (Shalmani et al., 2010) gibi özelliklerin kullanılmasyla doğruluğu yüksek modeller oluşturulmaktadır. Agregat stabilitesinin modellenmesine ilişkin istatistiksel yaklaşımlarda, yapay sinir ağlarının kullanımının daha güvenilir tahminlerin yapılmasını sağladığı bilinmektedir (Yakupoğlu vd., 2015; Marashi et al., 2017; Rivera and Bonila, 2020).

Çizelge 4. Agregat stabilitesi tahmin modellerinde kullanılan toprak özellikleri

Table 4. Soil properties used in aggregate stability estimation models

Kaynaklar	K	C	Si	pH	OM	EC	OC	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Ha	M	MA	KDK	SN	TK
Yılmaz vd. (2005)	+	+						+	+			+	+		+				
Shalmani et al. (2010)	+	+	+	+			+							+					
Umer and Rajab (2012)																+			
Yakupoğlu vd. (2012)		+					+												+
Igwe et al. (2013)							+	+	+			+	+						+
Saidi et al. (2015)	+	+	+	+	+	+				+									+
Yakupoğlu vd.(2015)		+			+					+									+
Aziz and Karim (2016)	+	+	+		+			+	+	+	+								+
Marashi et al. (2017)		+		+	+														+
Annabi et al. (2017)	+	+	+	+		+				+			+						+
Šimanský et al. (2017)	+	+	+				+												+
Usta et al. (2018)	+	+			+														+

K:kum, C:kil, Si: silt, OM: organik madde, EC: elektriksel iletkenlik, OC: organik karbon, Ha: Hacim ağırlığı, M: kil minerali, MA:mikrobiyal aktivite, KDK: katyon değişim kapasitesi, SN: solma noktası, TK: tarla kapasitesi

2. Sonuç ve Öneriler

Toprağın fiziksel özelliklerinin tahmininde yaygın olarak kullanılan pedotransfer fonksiyonlarla ilgili olarak;

- Hacim ağırlığı için oluşturulan tahmin modellerinde; tekstürel fraksiyonlar, organik karbon, toprak derinliği
- Hidrolik özellikler ve nem sabiteleri için; tekstürel fraksiyonlar, hacim ağırlığı, organik madde
- Penetrasyon direnci için; hacim ağırlığı ve nem içeriği
- Agregat stabilitesi için; tekstürel fraksiyonlar, organik madde ve KDK

özellikleri kullanılan parametreler arasında en etkili olanlardır.

Araştırmacılar tarafından oluşturulan modellerin kullanılabilirliği ve geçerliliği; bölgenin iklimi, toprak özelliklerinin benzerliği, verilerin homojenliği, örnekleme sayıları ve analiz yöntemleri gibi parametrelere bağlı olarak değişebilmektedir. Ayrıca; bugüne değin yapılmış çalışmalar; PTFs'in sadece belirlemesi kolay toprak özelliklerinden, belirlenmesi zor, zaman alıcı ve pahalı olan toprak özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmadığı, geçmiş ve günümüzde yürütülmüş toprak özelliklerine ilişkin çalışma verileri kullanılarak tüm toprak özelliklerinin diğer etkili toprak özelliklerinden tahmin edilebileceğini göstermektedir.

3. Kaynaklar

- Abbasi, Y., Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A. M. ve Shorafa, M. (2011). Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran. *Pedosphere*, 21(2), 230-237.
- Abdelbaki, A.M. (2018). Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for US soils. *Ain Shams Engineering Journal*.

- Adhikary, P.P., Chakraborty, D., Kalra, N., Sachdev, C.B. ve Patra, A.K. (2008). Pedotransfer functions for predicting the hydraulic properties of Indian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 46, 476-484
- Alexander, E.B. (1980). Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 689-692.
- Al-Qinna, M.I. ve Jaber, S.M. (2013). Predicting soil bulk density using advanced pedotransfer functions in an arid environment. *T. Asabe*, 56, 963-976.
- Alvarez-Acosta, C., Lascano, R.J. ve Stroosnijder, L. (2012). Test of the rosetta pedotransfer function for saturated hydraulic conductivity. *Open Journal of Soil Sciences*, 2, 203-212.
- Annabi, M., Raclot, D., Bahri, H., Bailly, J. S., Gomez, C. ve Le Bissonnais, Y. (2017). Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia, *Catena*, 153, 157-167.
- Aziz, S. A.ve Karim, S. M. (2016). The effect of some soil physical and chemical properties on soil aggregate stability in different locations in sulaimani and halabja governorate, *Open Journal of Soil Science*, 6(04), 81.
- Bayat, H., Neyshaburi, M. R., Hajabbasi, M. A., Mahboubi, A. A. ve Mosaddeghi, M. R. (2008). Comparing neural networks, linear and nonlinear regression techniques to model penetration resistance. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32(5), 425-433.
- Bayat, H. ve Zadeh, G.E. (2018). Estimation of the soil water retention curve using penetration resistance curve models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 144, 329-343.
- Benites, V.M., Machado, P.L.O.A., Fidalgo, E.C.C., Coelho, M.R.ve Madari, B.E. (2007). Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, 139, 90-97.
- Bennie, A.T.P. ve Burger, R.D.T. (1988). Penetration resistance of fine sandy apedal soils as affected by relative bulk density, water content and texture. *South African Journal of Plant and Soil*, 5(1), 5-10.
- Botula, Y.D. (2013). Indirect methods to predict hydrophysical properties of soils of Lower Congo. Ghent University, Gent, p 236
- Bradford, J. M. (1986). Penetrability. Clude, A. (ED.), *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods* (463-478). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1188p, America
- Brahim, N., Bernoux, M.ve Gallali, T. (2012). Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: Tunisia case. *Journal of Arid Environments*, 81, 77-83.
- Bronick, C.J. ve Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3-22.
- Brooks, R.J. ve Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper 3*. Fort Collins: Colorado State University.
- Busscher, W.J. (1990). Adjustment of flat- tipped penetrometer resistance data to a common water content. <http://naldc.nal.usda.gov/download/18014/PDF> (Erişim: 8 kasım 2019)

- Campbell, G.S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117:311–314.
- Cemek, B., Meral, R., Apan, M. ve Merdum, H. (2004). Pedotransfer function for the estimation of the field capacity and permanent wilting point. *Pakistan Journal of Biological Science*, 7(4), 535-541.
- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B. ve Ginn, T.R. (1984). A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20, 682–690.
- Costantini, A. (1995). Relationships between cone penetration resistance, bulk density, and moisture content in uncultivated, repacked, and cultivated hardsetting and non-hardsetting soils from the coastal lowlands of south-east Queensland.
- De Vos, B., Van Meirvenne, M., Quataert, P., Deckers, J. ve Muys, B. (2005). Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 500–10.
- Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214.
- Duiker, S.W., Rhoton, F.E., Torrent, J., Smeck, N.E. ve Lal, R. (2003). Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation, *Soil Science Society of America Journal*, 67(2), 606-611.
- Filho, J.T., Feltran, C.T.M., José Francirlei de Oliveira, J.F. ve Almeida, E. (2012). Modelling of soil penetration resistance for an oxisol under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 89-95.
- Ghorbani Dashtaki, S.H. ve Homae, M. (2004). Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions. In Whrle, N. and Scheurer, M. (eds.) *EuroSoil*. September 4–12, 2004. Freiburg, Germany. 10(30): 1–10.
- Giarola, N.F.B., Da Silva, A.P. ve Imhoff, S. (2002). Relações entre propriedades físicas e características de solos da Região Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26, 885–893.
- Grewal, K. S., Buchan, G. D. ve Tonkin, P. J. (1990). Estimation of field capacity and wilting point of some New Zealand soils from their saturation percentages. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 18(4), 241-246.
- Grunwald, S., Lowery, B., Rooney, D.J. ve McSweeney, K. (2001). Profile cone penetrometer data used to distinguish between soil materials. *Soil & Tillage Research*, 62, 27-40.
- Gülser, C. (2004). Tarla kapasitesi ve devamlı solma noktası değerlerinin toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleriyle ilişkili pedotransfer eşitliklerle belirlenmesi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(3), 19-23.
- Gülser, C. ve Candemir, F. (2014). Using soil moisture constants and physical properties to predict saturated hydraulic conductivity. *Eurasian Journal of Soil Science*, 3, 77-81.
- Han, G.Z., Zhang, G.L., Gong, Z.T. ve Wang, G.F. (2012). Pedotransfer functions for estimating soil bulk density in China. *Soil Science*, 177, 158–164.
- Hernanz, J.L., Peixoto, H., Cerisola, C. ve Sánchez-Girón, V. (2000). An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth. *Journal of Terramechanics*, 37(4), 167-184.
- Heuscher, S.A., Brandt, C.C. ve Jardine, P.M. (2005). Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 51–56.
- Hollis, J.M., Hannam, J. ve Bellamy, P.H. (2012). Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. *European Journal of Soil Science*, 63, 96–109.
- Honeysett, J.L. ve Ratkowsky, D.A. (1989). The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. *J. Soil Science*, 40, 299–308.
- Hutson, J.L. ve Wagenet, R.J. (1992). Leaching estimation and chemistry model. department of soil. *Crop and Atmospheric Sciences Research series no. 92.3*, New York, Cornell University.
- Igwe, C. A., Zarei, M. ve Stahr, K. (2013). Stability of aggregates of some weathered soils in south-eastern Nigeria in relation to their geochemical properties. *Journal of Earth System Science*, 122(5), 1283-1294.
- Kaur R, Kumar, S. ve Gurung, H.A. (2002). Pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Australian Journal of Soil Research*, (40), 847–57.
- Keller, T. ve Hakansson, I. (2010). Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* 154, 398–406.
- Landsberg, J.D., Miller, R.E., Anderson, H.W. ve Tepp, J.S. (2003). Bulk density and soil resistance to penetration as affected by commercial thinning in northeastern Washington. Res. Pap. PNW-RP-551. Portland, OR: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Lin, H., Zhang, W. ve Yu, H. (2014). *Hydropedology: linking dynamic soil properties with soil survey data*. In application of soil physics in environmental analyses (pp. 23-50). Springer International Publishing.
- McBratney, A., Minasny, B., Cattle, S.R. ve Vervoort, R.W. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma* 109,41–73
- Manrique, L.A., Jones, C.A. ve Dyke, P.T. (1991). Predicting soil water retention characteristics from soil physical and chemical properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 22, 1847–1860.
- Marashi, M., Torkashvand, A. M., Ahmadi, A. ve Esfandyari, M. (2017). "Estimation of soil aggregate stability indices using artificial neural network and multiple linear regression models", *Spanish Journal of Soil Science*, 7(2).
- Miháliková, M., Başkan, O. ve Dengiz, O. (2015). Capability of different interpolation models and pedotransfer functions to estimate soil hydraulic properties in Büyükçay Watershed.. *Environmental Earth Sciences*, 74(3), 2425-2437.
- Minasny, B. ve Hartemink, A.E. (2011). Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Science Reviews*, 106, 52–62
- Mohanty, M., Nishant, K., Sinha, D.K., Painuli, K.K., Bandyopadhyay, K.M., Hati, K. ve Sammi Reddy, Chaudhary, R.S., (2015). Modelling soil water contents at field capacity and permanent wilting point using artificial neural network for Indian soils. *National Academy Science Letter*, 38(5), 373-377.
- Mohawesh, O.E. (2013). Assessment of pedotransfer functions (PTFs) in predicting soil hydraulic properties under arid and semi arid environments. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 9(4).
- Nanko, K., Ugawa, S., Hashimoto, S., Imaya, A., Kobayashi, M., Sakai, H., Ishizuka, S., Miura, S., Tanaka, N., Takahashi, M. ve Kaneko, S. (2014). A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. *Geoderma*, 213, 36–45.
- Neğiş, H., Şeker, C., Gümüş, İ., Özyaytekin, H. H., Atmaca, E. ve Karaca, Ü. (2016). Şeker pancarı tarımında penetrasyon direncinin belirlenmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 272-279.
- Özdemir, N., Ekberli, İ. ve Durmuş, Ö.T.K. (2018). Bazı toprak özellikleri ile kütle yoğunluğunun tahmini için pedotransfer modeller. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 6(1), 46-51.
- Pachepsky, Y.A. ve Van Genuchten, M. T. (2011). Pedotransfer functions. *Encyclopedia of Agrophysics*, 556-561.
- Perie, C. ve Ouimet, R. (2007). Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 88, 315–25.
- Rajkai, K., Kabos, S. ve Van Genuchten, M. Th. (2004). Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil & Tillage Research*, 79, 145–152.
- Rawls, W.J. (1983). Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science*, 135, 123–125.
- Rawls, W.J. ve Brakensiek, D.L. (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: S. Morel, Editor, *unsaturated flow in hydrologic modeling. theory and practice*, Kluwer academic publishers.
- Rivera, J. I. ve Bonilla, C. A. (2020). Predicting soil aggregate stability using readily available soil properties and machine learning techniques. *Catena*, 187, 104408.
- Sağlam, M. ve Dengiz, O. (2017). Spatial variability of soil penetration resistance in an alluvial delta plain under different land uses in middle Black Sea Region of Turkey. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(1), 60-73.
- Saidi, D., Hamel, Z. ve Ababou, A. (2015). Using pedotransfer functions to assess aggregate stability: application to the lower cheliff soils, Algeria. *International Journal of Plant & Soil Science*, 8, 1-10.
- Santos, F.L., Jesus, V.A.M. ve Valente, Domingos Sárvio Magalhães, D.S.M. (2012). Modeling of soil penetration resistance using statistical analyses and artificial neural networks. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 34, 2, 219-224.
- Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J.S. ve Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1031–1036.

- Schwertmann, U. ve Taylor, R.M. (1977). Iron oxides. In: Dixon JB (ed) Minerals in soil environments. Soil Science Society of America, Madison. 948 p
- Sevastas, S., Gasparatos, D., Botsis, D., Siarkos, I., Diamantaras, K. I. ve Bilas, G. (2018). Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in the Upper Anthemountas basin, Greece. *Geoderma Regional*, 14, e00169.
- Shalmani, A. A., Shahrestani, M. S., Asadi, H. ve Bagheri, F. (2010). Comparison of regression pedotransfer functions and artificial neural networks for soil aggregate stability simulation. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 1-6 August, Brisbane, Australia.
- Šimanský, V., Kravka, M. ve Jonczak, J. (2017). Stability of soil aggregates in loamy soils of Slovakia. *Journal of Elementology*, 22(2), 581-592.
- Six, J., Elliott, E.T. ve Paustian, K. (2000). Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1042 – 1049.
- Suleiman, A. A. ve Ritchie, J. T. (2001). Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity. *Transactions of the ASAE*, 44(2), 235.
- Suuster, E., Ritz, C., Roostalu, H., Reintam, E., Kolli, R. ve Astover, A. (2011). Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. *Geoderma* 163, 74–82.
- Şeker, C. (1999). Penetrasyon direnci ile bazı toprak özellikleri arasındaki ilişkiler. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 23, (3), 583-588.
- To, J. ve Kay, B.D. (2005). Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*, 126(3-4), 261-276.
- Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A.B., Murphy, B., McKenzie, N.J., Grundy, M. ve Brough, D., 2007. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. *Soil Use Management*, 23, 437–443.
- Tunçay, T., Başkan, O., Bayramın, I., Dengiz, O. ve Kılıç, Ş. (2018). Geostatistical approach as a tool for estimation of field capacity and permanent wilting point in semi-arid terrestrial ecosystem. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(9), 1240-1253.
- Turgut, B., Aksakal, E.L., Öztaş, T. ve Babagil, G.E. (2008). Penetrasyon direncine etki eden toprak özelliklerine ait etki katsayılarının çoklu regresyon analizi ile belirlenmesi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 39(1), 115-121.
- Turgut, B. ve Öztaş, T. (2012). Penetrasyon direncini etkileyen bazı toprak özelliklerinin yersel değişiminin belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 18, 115-125.
- Umer, M. I. ve Rajab, S.M. (2012). Correlation between aggregate stability and microbiological activity in two Russian soil types. *Eurasian Journal of Soil Science*, 1(1), 45-50.
- Unger, P.W. ve Jones, O.R. (1998). Long-Term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. *Soil & Tillage Research*, 45(1), 39-57.
- Unguraşu, A.N., Anel, F.D. ve Florian Stătescu, F. (2012). Estimation of soil hydraulic parameters with the help of rosetta program. *Lucrări Ştiinţifice– vol. 55, seria Agronomie*.
- Usta, A., Yılmaz, M. ve Kocamanoglu, Y.O. (2018). Estimation of wet soil aggregate stability by some soil properties in a semi-arid ecosystem. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(12 A), 9026-9032.
- Van Genuchten, M.Th. (1980). A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-898.
- Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., et al. ve Schaap, M.G. (2017). Pedotransfer functions in Earth system science: challenges and perspectives. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1199-1256.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. ve Darius, P. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*, 148: 389–403.
- Whalley, W.R., To, J., Kay, B.D. ve Whitmore, A.P. (2007). Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters. *Geoderma* 137, 370–377.
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A. ve Le Bas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*. 90: 169–185.
- Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y. ve Rawls, W.J. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251, 123–150.
- Yakupoğlu, T., Saltah, K. ve Karagöktaş, M. (2012). Narlı ovası'nda toprak aşınabilirliğinin pedotransfer yaklaşım ile tahminlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi*, 15(2), 59-67.
- Yakupoğlu, T., Şişman, A.Ö., Karagöktaş, M. ve Demir, Ö.F. (2013). Toprakların doymuş koşullardaki hidrolik iletkenlik değerlerinin pedotransfer eşitliklerle tahminlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 8 (1), 84-89.
- Yakupoğlu, T., Şişman, A. Ö. ve Gündoğan, R. (2015). Toprakların agregat stabilitesi değerlerinin yapay sinir ağları ile tahminlenmesi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 2(2), 83-92.
- Yang, X. ve You, X. (2013). Estimating parameters of van genuchten model for soil water retention curve by intelligent algorithms. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 7, No. 5, 1977-1983.
- Yılmaz, K., Çelik, I., Kapur, S. ve Ryan, J. (2005). Clay minerals, Ca/Mg Ratio and Fe-Al-oxides in relation to structural stability, hydraulic conductivity and soil erosion in southeastern Turkey. *Turkish journal of Agriculture and Forestry*, 29(1), 29-37.
- Zacharias, S. ve Wessolek, G. (2007). Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 43–50.