



## پیش‌بینی چگالی ظاهری با استفاده از توابع انتقالی برای خاک‌های دشت سیستان

محمد مهدی چاری\*

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

### چکیده

**سابقه و هدف:** چگالی ظاهری خاک (BD) به دلیل تأثیر مستقیم بر ویژگی‌های خاک مانند تخلخل، رطوبت در دسترس خاک و هدایت هیدرولیکی و اثرات غیرمستقیم آن بر رشد ریشه و عملکرد محصول از اهمیت زیادی برخوردار است. فرآیندهای محیطی و روش‌های زراعی باعث می‌شود که چگالی ظاهری خاک در مکان و زمان بسیار متفاوت باشد. از طرفی اندازه‌گیری آن در مقیاس بزرگ نیاز به وقت زیاد دارد و مرقون به صرفه نمی‌باشد. در نتیجه از روش‌های غیرمستقیم برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری هنگام انجام فعالیت‌های میدانی در مقیاس بزرگ، از روش‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود. یکی از روش غیرمستقیم مرقون به صرفه و صرفه‌جویی در وقت برای پیش‌بینی BD استفاده از توابع انتقالی است. هدف از این پژوهش ارزیابی توابع انتقالی موجود به منظور تعیین چگالی ظاهری برای خاک‌های مختلف منطقه سیستان و همچنین واسنجی و ارائه توابع انتقالی جدید برای منطقه مورد مطالعه است.

**مواد و روش‌ها:** پس از انجام بررسی منابع مختلف، ۶۴ تابع انتقالی (PTF) مختلف منتشر شده در منابع مختلف برای برآورد چگالی ظاهری انتخاب شدند. این توابع انتقالی به گونه‌ای انتخاب شدند که: (۱) دارای مقیاس زمانی گسترده‌ای باشند (از سال ۱۹۵۷ تا به امروز)، (۲) برای مناطق مختلف جهانی، (۳) از زمین‌های با خاک‌های متغیر (۴) از انواع روش‌های رگرسیون استفاده کرده و (۵) داده‌های مورد نیاز آن اندازه‌گیری متداول مانند شن، سیلت، رس و کربن آلی خاک باشد. تعداد نمونه‌های خاک برداشت شده در این پژوهش ۲۲۰ داده بوده است که از ۱۱۰ نقطه در دو عمق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ به دست آمده است. در این پژوهش به منظور ارزیابی توابع انتقالی از سه شاخص میانگین مطلق خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و انحراف استاندارد از خطای پیش‌بینی شده (SDPE) استفاده شده است.

**یافته‌ها:** در بین توابع انتقال موجود روش بنیتس و همکاران (۲۰۰۷) با مقدار ME برابر با مقدار ۰/۰۰۰۸-، مقدار RMSE برابر با ۰/۱۰۳۸ و SDPE برابر ۰/۱۰۳۳ دارای بهترین نتایج بود. بر اساس مقدار RMSE تابع یانگ و همکاران (۲۰۰۷) با مقدار ۰/۱۰۳۸ دارای رتبه ۱ و بر اساس SDPE تابع لیوناوچته (۲۰۰۰) با مقدار ۰/۰۹۷۶ بهترین نتایج را داشتند. برای منطقه مورد مطالعه ۵ رابطه ارائه شده شامل رابطه خطی بین BD و کربن آلی (OC)، رابطه خطی بین مجذور OC و BD، رابطه نمایی بین BD و OC، رابطه خطی بین BD و لگاریتم OC و رابطه چندجمله‌ای بین OC و BD ارائه شد.

\* مسئول مکاتبه: mmahdichari@uoz.ac.ir

**نتیجه‌گیری:** بر اساس نتایج می‌توان نتیجه‌گیری کرد که که کربن آلی خاک (OC) مهم‌ترین عامل در پیش‌بینی چگالی ظاهری خاک است و با استفاده از تنها کربن آلی خاک می‌توان چگالی ظاهری خاک را دقت مناسبی پیش‌بینی کرد. هم‌چنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ۵ رابطه توسعه داده شده در این پژوهش را می‌توان به‌منظور به‌دست آوردن چگالی ظاهری در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** بافت خاک، توابع انتقالی، چگالی ظاهری، کربن آلی

#### مقدمه

چگالی ظاهری (BD) خاک که از نسبت توده خشک خاک به حجم کل آن محاسبه می‌شود (۲۲ و ۵۹)، به‌عنوان یک عامل مهم در ارتباط با تراکم خاک و بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک در نظر گرفته می‌شود (۵۰). چگالی ظاهری خاک (BD) تأثیر مستقیم بر ویژگی‌های خاک مانند تخلخل، رطوبت در دسترس خاک و هدایت هیدرولیکی (۱۲) و تأثیر غیرمستقیم بر رشد ریشه و عملکرد محصول دارد (۳۹ و ۴۸).

فرآیندهای محیطی و روش‌های زراعی باعث می‌شود که چگالی ظاهری خاک در مکان و زمان بسیار متفاوت باشد و برخلاف آنچه انتظار می‌رود ارزیابی این تنوع بسیار چالش برانگیز باشد (۳۶). در واقع، عملیات نمونه‌برداری مؤثر نیاز به جمع‌آوری تعداد زیادی نمونه‌های خاک دارد و در نتیجه، کارهای میدانی حتی برای پژوهش‌ها در مناطق نسبتاً کوچک پر هزینه و نیروی کار زیاد نیاز دارد (۴۱).

برای جلوگیری این محدودیت، که هنگام انجام فعالیت‌های میدانی در مقیاس بزرگ، به یک مانع جدی تبدیل می‌شود، باید از برآوردهای غیرمستقیم چگالی ظاهری خاک استفاده شود، در حالی‌که اندازه‌گیری‌های مستقیم در تعداد محدودی از موقعیت‌ها عمدتاً برای اهداف کالیبراسیون یا اعتبارسنجی انجام می‌شود. یک روش غیرمستقیم مقرون به صرفه و صرفه‌جویی در وقت برای پیش‌بینی

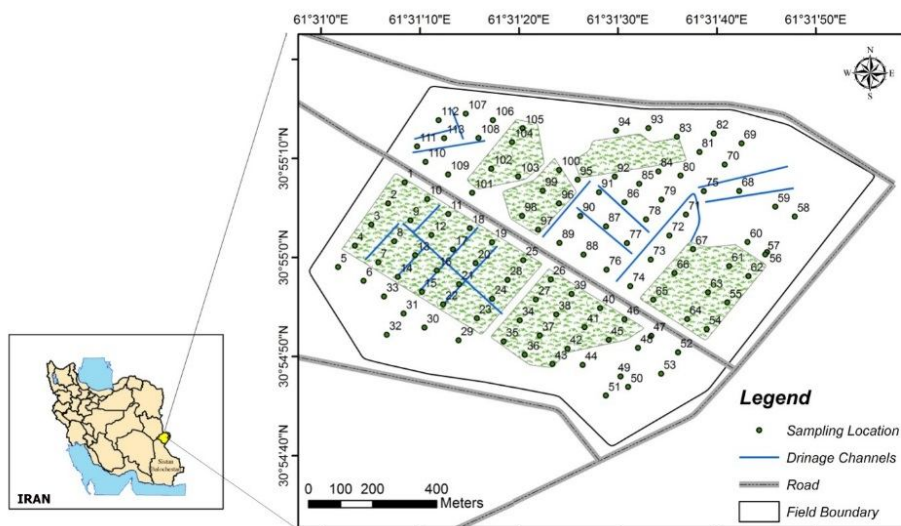
BD استفاده از توابع انتقالی است (۵، ۱۴، ۵۱ و ۵۲). این معادلات پژوهشگران را قادر می‌سازد ویژگی‌های اساسی خاک را که اندازه‌گیری آن‌ها وقت‌گیر است، مانند چگالی ظاهری و هدایت هیدرولیکی، از دیگر داده‌های خاک قابل دستیابی، تعیین کنند (۵ و ۱۴).  
عبدلیکی و همکاران (۲۰۱۸) عملکرد ۴۸ تابع انتقالی بر اساس کربن آلی (OC)، مقدار ماده آلی (OM)، بافت، درصد رطوبت و عمق خاک برای یک بانک اطلاعاتی بزرگ از خاک ایالات متحده برای به‌دست آوردن چگالی ظاهری مورد بررسی قرار داد. نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین عملکرد اکثر مدل‌ها، زمانی بود که تنها از OC به‌عنوان متغیر پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌شد (۱). کاتوال و همکاران (۲۰۱۹) مدل‌های مبتنی بر OC برای پیش‌بینی BD خاک شامل رابطه خطی بین BD و OC، رابطه خطی بین مجذور OC و BD، رابطه نمایی بین BD و OC و رابطه خطی بین BD و لگاریتم OC ارائه کردند (۳۲). آنان نشان دادند که روش‌های ارائه شده با دقت مناسبی چگالی ظاهری را پیش‌بینی می‌کند. از آنجاکه توابع انتقالی از تمامی عوامل محلی سازنده خاک استفاده نمی‌کند در نتیجه خطاهایی در پیش‌بینی چگالی ظاهری خاک دارند. این خطاها به‌ویژه زمانی که توابع انتقالی را برای منطقه‌ای غیر از منطقه‌ای که توابع بر اساس داده‌های آن ایجاد شده است به کار می‌بریم قابل رویت است (۳۱ و ۴۱).

میانگین ارتفاع منطقه سیستان از سطح دریا ۴۸۱ متر می‌باشد. آب و هوای شهرستان زابل بر اساس طبقه‌بندی کوپن، جزء اقلیم‌های خشک و بسیار گرم با تابستان‌های گرم و خشک می‌باشد. براساس آمار ۳۰ ساله ایستگاه هواشناسی زابل، میانگین بارش سالانه این شهرستان ۵۹/۶ میلی‌متر و دمای آن در سال بین ۹/۵- تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد متغیر است. همچنین میانگین حرارت سالانه ۲۲ درجه سانتی‌گراد و میزان تبخیر سالانه ۴۸۲۰/۵۴ میلی‌متر می‌باشد (۱۳). تعداد نمونه‌های خاک برداشت شده در این پژوهش ۲۲۰ داده بوده که از ۱۱۰ نقطه در یک شبکه نسبتاً منظم با فاصله حدود ۷۰ متر در دو عمق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ به‌دست آمده است. برخی خصوصیات آماری این ۲۲۰ داده شامل چگالی ظاهری (BD)، درصد شن (Sand)، سیلت (Silt) و رس (Clay) و کربن آلی (OC) در جدول ۱ مشخص شده است.

منطقه سیستان واقع در جنوب شرق ایران یکی از مناطقی است که تغییرات مکانی خاک بسیار زیاد است. از طرفی بخش بسیار زیادی از اشتغال (حدود ۳۸٪) در این منطقه مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد (۹). در سال‌های اخیر دولت اقداماتی را برای توسعه کشاورزی در این بخش انجام داده است. هدف از این پژوهش ارزیابی ۶۴ توابع انتقالی موجود به‌منظور تعیین چگالی ظاهری برای بخشی از خاک‌های مختلف منطقه سیستان و همچنین واسنجی و ارائه توابع انتقالی جدید برای منطقه مورد مطالعه است.

### مواد و روش‌ها

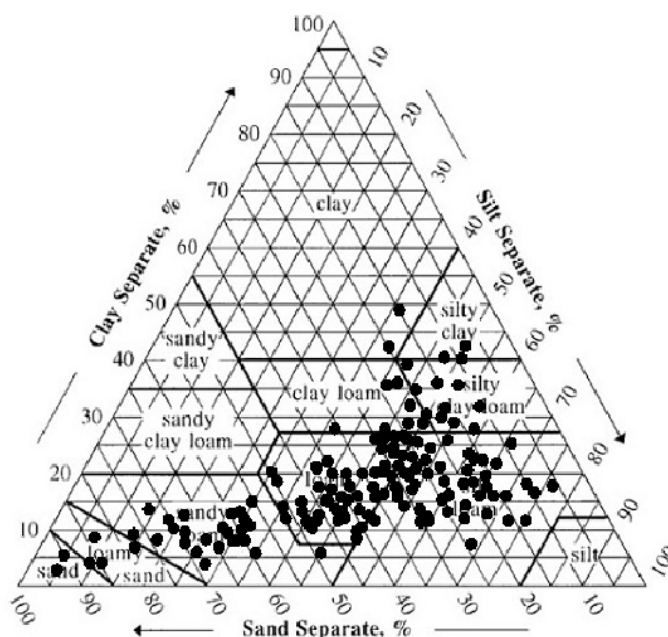
**منطقه مورد مطالعه:** در این مطالعه از داده‌های یک بخش از دشت سیستان در فاصله ۱۴ کیلومتری از مرز ایران و افغانستان استفاده شد. مساحت تحت پوشش حدود ۱۰۰ هکتار بود (مزرعه سد سیستان زابل). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.  
Figure 1. Location of study field.

در مناطق گرم و خشک مانند سیستان به دلیل تبخیر زیاد و فرسایش بادی است (۱۳). چگالی ظاهری خاک نیز با استفاده از روش سیلندر نمونه‌برداری به‌دست آمد. شکل ۲ محدوده بافت خاک نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

درصد شن، سیلت و رس از روش هیدرومتر با قرائت ۲ ساعت و کربن آلی (OC) به وسیله روش والکلی-بلک اندازه‌گیری شد (۴۲). مقدار کربن آلی بین ۰/۱ درصد تا ۱/۶ درصد متغیر بود. غلظت کم مقدار کربن آلی در خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر)



شکل ۲- محدوده بافت‌های خاک استفاده شده در این مطالعه.

Figure 2. The range of soil texture covered in this study.

جدول ۱- خصوصیات آماری خاک‌های مورد مطالعه.

Table 1. Descriptive statistics of soil properties of study field.

متغیر Variable	عمق Depth (cm)	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation	ضریب تغییرات Coefficient of Variation
شن (%)	0-15	6	96	40.6	20.49	50.46
Sand (%)	15-30	6	80	38.5	24.3	46.5
سیلت (%)	0-15	3	76	41	15.24	35.2
Silt (%)	15-30	4	71	42.1	16.01	36.18
رس (%)	0-15	2	43	16.1	48.43	48.43
Clay (%)	15-30	3	49	17.3	43.2	45.2
کربن آلی	0-15	0.1	1.35	0.55	0.263	46.4
OC (%)	15-30	0.15	1.6	0.58	0.245	44.5
چگالی ظاهری	0-15	1.09	1.78	1.41	0.106	7.41
BD (gr cm <sup>-3</sup> )	15-30	1.04	1.84	1.38	0.088	6.85

۳) از زمین‌های با خاک‌های متغیر (۴) از انواع روش‌های رگرسیون استفاده کرده و (۵) داده‌های مورد نیاز آن اندازه‌گیری متداول مانند شن، سیلت، رس و کربن آلی خاک باشد. توابع انتقالی مورد استفاده به همراه منبع مورد به‌کار رفته در جدول ۲ مشخص شده است.

توابع انتقالی: پس از انجام بررسی منابع مختلف، ۶۴ تابع انتقالی (PTF) مختلف منتشر شده در منابع مختلف برای برآورد چگالی ظاهری انتخاب شدند. این توابع انتقالی به گونه‌ای انتخاب شدند که: (۱) دارای مقیاس زمانی گسترده‌ای باشند (از سال ۱۹۵۷ تا به امروز)، (۲) برای مناطق مختلف جهانی،

جدول ۲- اطلاعات توابع انتقالی استفاده شده در این مطالعه.

**Table 2. Information on the pedotransfer functions used in this study.**

PTF no	Reference	Function
1	Abdelbaki (2016)	$BD = 1.449 \cdot \exp(-0.03 \cdot OC)$
2	Adams (1973)	$BD = 100/[OM/0.224 + (100 - OM/1.27)]$
3	Akpa et al. (2016)	$BD = 1.177 + 0.00263 \cdot Sa - 0.0439 \cdot \ln Si + 0.00208 \cdot Si$
4	Alexander (1980)-a	$BD = 1.66 - 0.308 \cdot OC^{0.5}$
5	Alexander (1980)-b	$BD = 1.72 - 0.294 \cdot OC^{0.5}$
6	Al-Qinna and Jaber (2013)	$BD = 1.228 - 0.155 \cdot \log(OC) + 0.008 \cdot Sa$
7	Benites et al. (2007)	$BD = 1.5688 - 0.0005 \cdot (Cl - 10) - 0.009 \cdot (OC \cdot 10)$
8	Bernoux et al. (1998)	$BD = 1.398 - 0.0047 \cdot Cl - 0.042 \cdot OC$
9	Beutler et al. (2017)	$BD = [1.6179 - 0.0180 \cdot (Cl + 1)0.46 - 0.0398 \cdot OC0.55]^{1.33}$
10	Botula et al. (2015)	$BD = 1.64581 - 0.00362 \cdot Cl - 0.0016 \cdot Sa - 0.0158 \cdot OC$
11	Calhoun et al. (2001)	$BD = 1.673 - 0.0071 \cdot OC - 0.0017 \cdot Si - 0.003 \cdot Cl$
12	Cienciala et al. (2006)	$BD = 100/[OM/0.244 + (100-OM)/1.41]$
13	Curtis and Post (1964)	$BD = 10^{[2.09963 - 0.00064 \cdot \log_{10}(OM) - 0.22302 \cdot \log_{10}(OM)/2]}$
14	De Vos et al. (2005)	$BD = 1.775 - 0.173 \cdot OM^{0.5}$
15	Dexter (2004)	$BD = 1/(0.59 + 0.00163 \cdot Cl + 0.0253 \cdot OM)$
16	Drew (1973)	$BD = 1/(0.6268 + 0.0361 \cdot OM)$
17	Eschner et al. (1957)	$BD = 1.8014 - 0.8491 \cdot \log_{10}(OM + 2) + 0.0026 \cdot Cl$
18	Federer (1983)	$BD = \exp[-2.314 - 1.0788 \cdot \ln(OM/100) - 0.1132 \cdot \ln(OM/100)^2]$
19	Federer et al. (1993)	$BD = 0.111 \cdot 1.45/[1.45 \cdot OM/100 + 0.111 \cdot (1 - OM/100)]$
20	Grigal et al. (1989)	$BD = 0.075 + 1.301 \cdot \exp(-0.06 \cdot OM)$
21	Hallet et al. (1998)-a	$BD = 0.87 + 0.071 \cdot \ln(Cl) + 0.093 \cdot \ln(Sa) - 0.254 \cdot \ln(OC)$
22	Hallet et al. (1998)-b	$BD = 1.46 - 0.0254 \cdot \ln(Cl) + 0.0279 \cdot \ln(Sa) - 0.261 \cdot \ln(OC)$
23	Han et al. (2012)	$BD = \exp(0.5379 - 0.0653 \cdot OM^{0.5})$
24	Harrison and Boccock (1981)	$BD = 1.558 - 0.728 \cdot \log(OM)$
25	Heuscher et al., 2005	$BD = 1.711 - 0.0487 \cdot OC^2 + 0.0059 \cdot OC^3 + 0.002 \cdot Cl$
26	Heuscher et al. (2005)	$BD = 1.674 - 0.310 \cdot OC^{0.5} + 0.015 \cdot Cl - 2.41 \cdot 10^{-4} \cdot Si^2$
27	Heuscher et al. (2005)	$BD = 1.780 - 0.379 \cdot OC0.5 + 0.00123 \cdot \text{depth}$
28	Hollis et al. (2012)-a	$BD = 0.80806 + 0.823844 \cdot \exp(-0.27993 \cdot OC) + 0.0014065 \cdot Sa - 0.0010299 \cdot Cl$
29	Hollis et al. (2012)-b	$BD = 0.69794 + 0.750636 \cdot \exp(-0.230355 \cdot OC) + 0.0008687 \cdot Sa - 0.0005164 \cdot Cl$
30	Hollis et al. (2012)-c	$BD = 1.4903 - 0.33293 \cdot \ln(OC)$
31	Honeysett and Ratkowsky (1989)	$BD = 1/(0.564 + 0.0556 \cdot OM)$
32	Hong et al. (2013)	$BD = 100/\{OM/0.224 + (100-OM)/[1.017 + 0.0032 \cdot Sa + 0.054 \cdot \log(\text{depth})]\}$
33	Hossain et al. (2015)	$BD = 0.701 + 0.952 \cdot \exp(-0.29 \cdot OC)$
34	Huntington et al. (1989)	$BD = \exp\{-2.39 - 1.316 \cdot \ln(OM/100) - 0.167 \cdot [\ln(OM/100)]^2\}$
35	Jeffrey (1970)	$BD = 1.482 - 0.6786 \cdot \log 100M$
36	Kaur et al. (2002)	$BD = \exp(0.313 - 0.191 \cdot OC + 0.02102 \cdot Cl - 0.0004768 \cdot Cl^2 - 0.00432 \cdot Si)$

ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

PTF no	Reference	Function
37	Keller and Håkansson (2010)	$BD = 1.308 + 0.0119 \cdot CI + 0.0103 \cdot Sa - 0.00018 \cdot CI^2 - 0.00008 \cdot Sa^2 - 0.00062 \cdot Si \cdot OM - 0.00059 \cdot Sa \cdot OM$
38	Kobal et al. (2011)	$BD = 1.4842 - 0.1424 \cdot OC$
39	Leonaviciute (2000)	$BD = 1.70398 - 0.00313 \cdot Si + 0.00261 \cdot CI - 0.11245 \cdot OC$
40	Manrique and Jones (1991)	$BD = 1.510 - 0.113 \cdot OC$
41	Men et al. (2008) in Yi et al. (2016)	$BD = 1.386 - 0.078 \cdot OC + 0.001 \cdot Si + 0.001 \cdot CI$
42	Merry in Valzano et al. (2005)	$BD = 1.608 - 0.0872 \cdot OC$
43	Minasny and Hartemink (2011)	$BD = 100 / \{ OM / 0.224 + (100 - OM) / [0.935 + 0.049 \cdot \log_{10}(\text{depth}) + 0.0055 \cdot Sa + 0.000065 \cdot (Sa - 38.96)^2] \}$
44	Nanko et al. (2014)	$BD = 100 / [OM / 0.14 + (100 - OM) / 1.153]$
45	Périé and Ouimet (2008)	$BD = (0.111 \cdot 1.767) / \{ 1.767 \cdot OM / 100 + [(1 - OM / 100) \cdot 0.111] \}$
46	Prévost (2004)	$BD = \exp[-1.81 - 0.892 \cdot \ln(OM / 100) - 0.092 \cdot \ln(OM / 100)^2]$
47	Rawls et al. (2004)	$BD = 1.36411 + 0.185628 \cdot (0.0845397 + 0.701658 \cdot w - 0.614038 \cdot w^2 - 1.18871 \cdot w^3 + 0.0991862 \cdot y - 0.301816 \cdot w \cdot y - 0.153337 \cdot w^2 \cdot y - 0.072242 \cdot y^2 + 0.392736 \cdot w \cdot y^2 + 0.0886315 \cdot y^3 - 0.601301 \cdot z + 0.651673 \cdot w \cdot z - 1.37484 \cdot w^2 \cdot z + 0.298823 \cdot y \cdot z - 0.192686 \cdot w \cdot z \cdot y + 0.0815752 \cdot y^2 \cdot z - 0.0450214 \cdot z^2 - 0.179529 \cdot w \cdot z^2 - 0.0797412 \cdot y \cdot z^2 + 0.00942183 \cdot z^3)$ $x = -1.2141 + 4.23123 \cdot Sa / 100$ $y = -1.70126 + 7.55319 \cdot CI / 100$ $z = -1.55601 + 0.507094 \cdot OM$ $w = -0.0771892 + 0.256629 \cdot x + 0.256704 \cdot x^2 - 0.140911 \cdot x^3 - 0.0237361 \cdot y - 0.098737 \cdot x^2 \cdot y - 0.140381 \cdot y^2 + 0.0140902 \cdot x \cdot y^2 + 0.0287001 \cdot y^3$
48	Reidy et al. (2016)	$BD = 1.705925 - 0.342497 \cdot OC^{0.5}$
49	Ruehlmann and Körschens (2009)	$BD = (2.684 - 140.943 \cdot 0.008) \cdot \exp(-0.008 \cdot OC \cdot 10)$
50	Saini (1966)	$BD = 1.53 - 0.05 \cdot OM$
51	Sevastas et al. (2018)-a	$BD = 2.268 - 0.179 \cdot \ln(Sa) - 0.345 \cdot \ln(OC)$
52	Sevastas et al. (2018)-b	$BD = 2.039 - 0.563 \cdot OC + 0.103 \cdot OC^2$
53	Sevastas et al. (2018)-c	$BD = 1.64 - 0.1396 \cdot OC$
54	Sevastas et al. (2018)-d	$BD = 1.611 + 0.004 \cdot CI - 0.182 \cdot OC$
55	Song et al. (2005)-a	$BD = 1.3565 \cdot \exp(-0.0046 \cdot OC \cdot 10)$
56	Song et al. (2005)-b	$BD = 1.3770 \cdot \exp(-0.0048 \cdot OC \cdot 10)$
57	Tamminen and Starr (1994)	$BD = 1.565 - 0.2298 \cdot OM^{0.5}$
58	Tomasella and Hodnett (1998)	$BD = 1.578 - 0.054 \cdot OC - 0.006 \cdot Si - 0.004 \cdot CI$
59	Tranter et al. (2007)	$BD = 1.35 + 0.0045 \cdot Sa + (44.7 - Sa)^2 \cdot (-6 \cdot 10^{-5}) + 0.060 \cdot \ln(\text{depth})$
60	Tremblay et al. (2002)	$BD = (0.12 \cdot 1.4) / [OM / 100 \cdot 1.4 + (1 - OM / 100) \cdot 0.12]$
61	Williams (1970)	$BD = 1.37 - 0.076 \cdot OC$
62	Wu et al. (2003)	$BD = 1.2901 - 0.1229 \cdot \ln(OC)$
63	Yang et al. (2007)	$BD = 0.29 + 1.2033 \cdot \exp(-0.075 \cdot OC)$
64	Zinke et al. (1986)	$BD = 1.446 - 0.000645 \cdot \text{depth} - 0.344 \cdot \log_{10}(OC)$

## نتایج و بحث

مقدار شاخص‌های آماری میانگین مطلق خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و انحراف استاندارد از خطای پیش‌بینی شده (SDPE) برای تمامی ۶۴ توابع انتقالی مورد استفاده در این پژوهش به دست آمد. مقدار میانگین مطلق خطا (ME) برای توابع انتقالی مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ مشخص می‌کند که در حدود نیمی از توابع چگالی ظاهری بیش‌برآورد (مثبت) و در نیمی از توابع انتقای چگالی ظاهری کم‌برآورد (منفی) بوده است. کم‌ترین مقدار ME برابر با  $-1/25$  در تابع ترمبلی و همکاران (۲۰۰۲) و بیش‌ترین مقدار برابر با  $0/43$  در تابع سواستس و همکاران (۲۰۱۸) بود.

بیش‌ترین مقدار RMSE برابر با  $1/26$  در تابع ترمبلی و همکاران (۲۰۰۲)، کم‌ترین مقدار برابر با  $0/1038$  در تابع یانگ و همکاران (۲۰۰۷) بود و مقدار میانگین آن برابر با  $0/2211$  بود (شکل ۴). باید توجه گردد که روش یانگ و همکاران (۲۰۰۷) تنها از OC برای پیش‌بینی چگالی ظاهری استفاده می‌کند. نویسندگان مختلفی با استفاده از روش‌های پیشرفته مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، درختان رگرسیون درختی، الگوریتم‌های k-نزدیک‌ترین نوع همسایه و ماشین‌های بردار پشتیبان و تنها استفاده از OC را به منظور پیش‌بینی چگالی ظاهری توصیه می‌کنند (۳۲ و ۵۳). در پژوهش نستا و همکاران (۲۰۲۰) برای تعدادی از خاک‌های ایتالیا نیز، روش سانگ و همکاران (۲۰۰۵) که تنها از OC به منظور پیش‌بینی چگالی ظاهری استفاده می‌کند بهترین نتایج را داشت (۴۲). با توجه به نتایج، ۳۷ مورد از ۶۴ تابع انتقالی دارای مقدار RMSE کم‌تر از  $0/20$  گرم بر سانتی‌مترمکعب هستند که بر اساس پژوهش دیوس و همکاران (۲۰۰۵) دارای نتایج قابل قبول هستند (۱۴).

مقدار ماده آلی (OM) براساس رابطه  $OM = 1.742 OC$  محاسبه شد (۴۱).

ارزیابی دقت توابع انتقالی: به طور معمول به منظور ارزیابی توابع انتقالی از چند شاخص برآورد خطا استفاده می‌شود (۱۴، ۲۲ و ۴۰). در این پژوهش به منظور ارزیابی از سه شاخص میانگین مطلق خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و انحراف استاندارد از خطای پیش‌بینی شده (SDPE) استفاده شد:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (1)$$

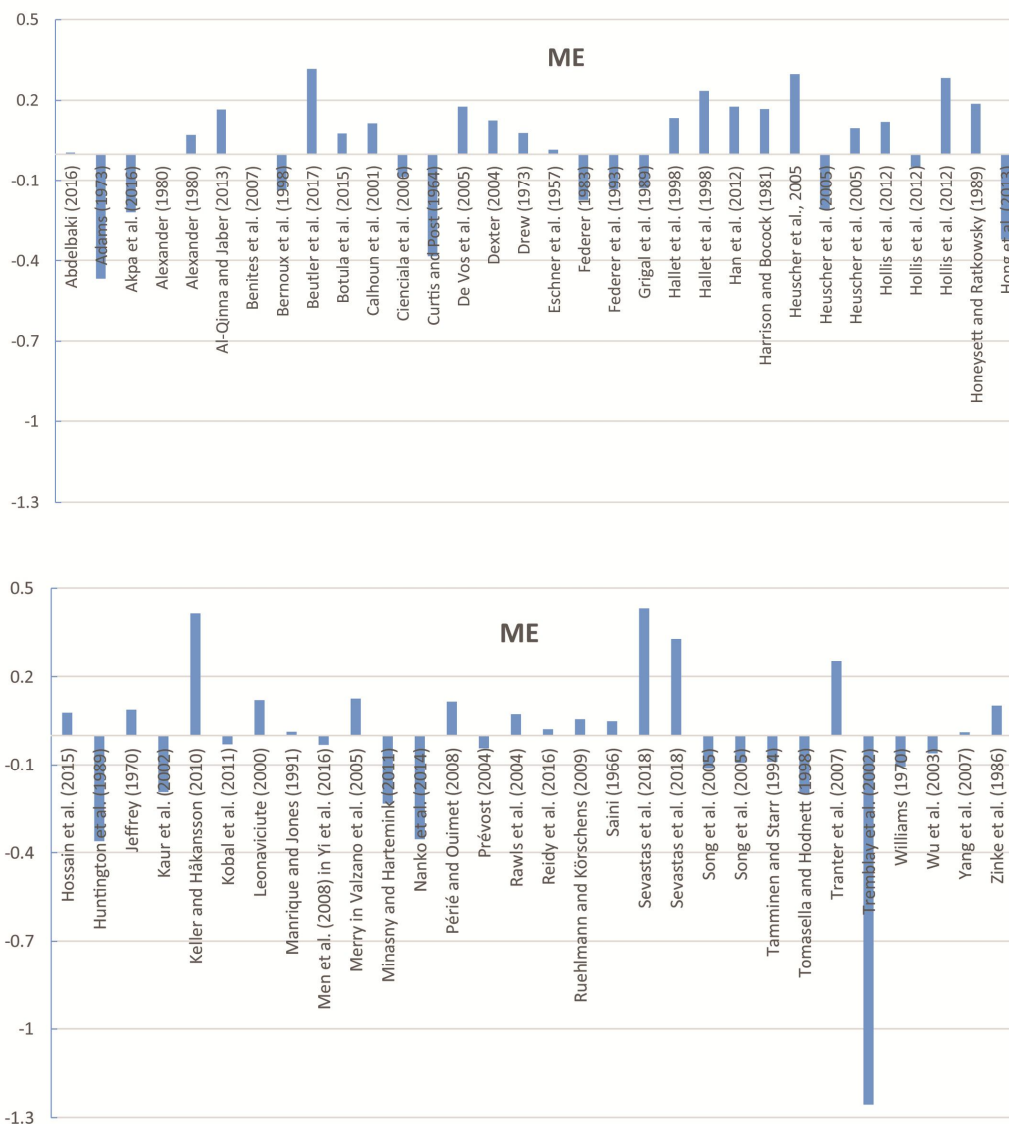
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$SDPE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(P_i - O_i) - ME]^2} \quad (3)$$

که در آن‌ها،  $P_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده در  $i$  و  $n$  تعداد نمونه‌ها می‌باشد. ME میانگین اختلاف بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده و گرایش نتایج به بیش‌برآورد (مقادیر مثبت) یا کم برآورد (مقادیر منفی) را نشان می‌دهد. SDPE تغییرات تصادفی پیش‌بینی‌ها را بعد از تصحیح ME نشان می‌دهد. از طرف دیگر RMSE خطای کلی پیش‌بینی را نشان می‌دهد (۴۷). برای پیش‌بینی بهینه، مقادیر باید برای ME نزدیک به صفر نزدیک و تا حد ممکن مقدار RMSE و SDPE کم باشند.

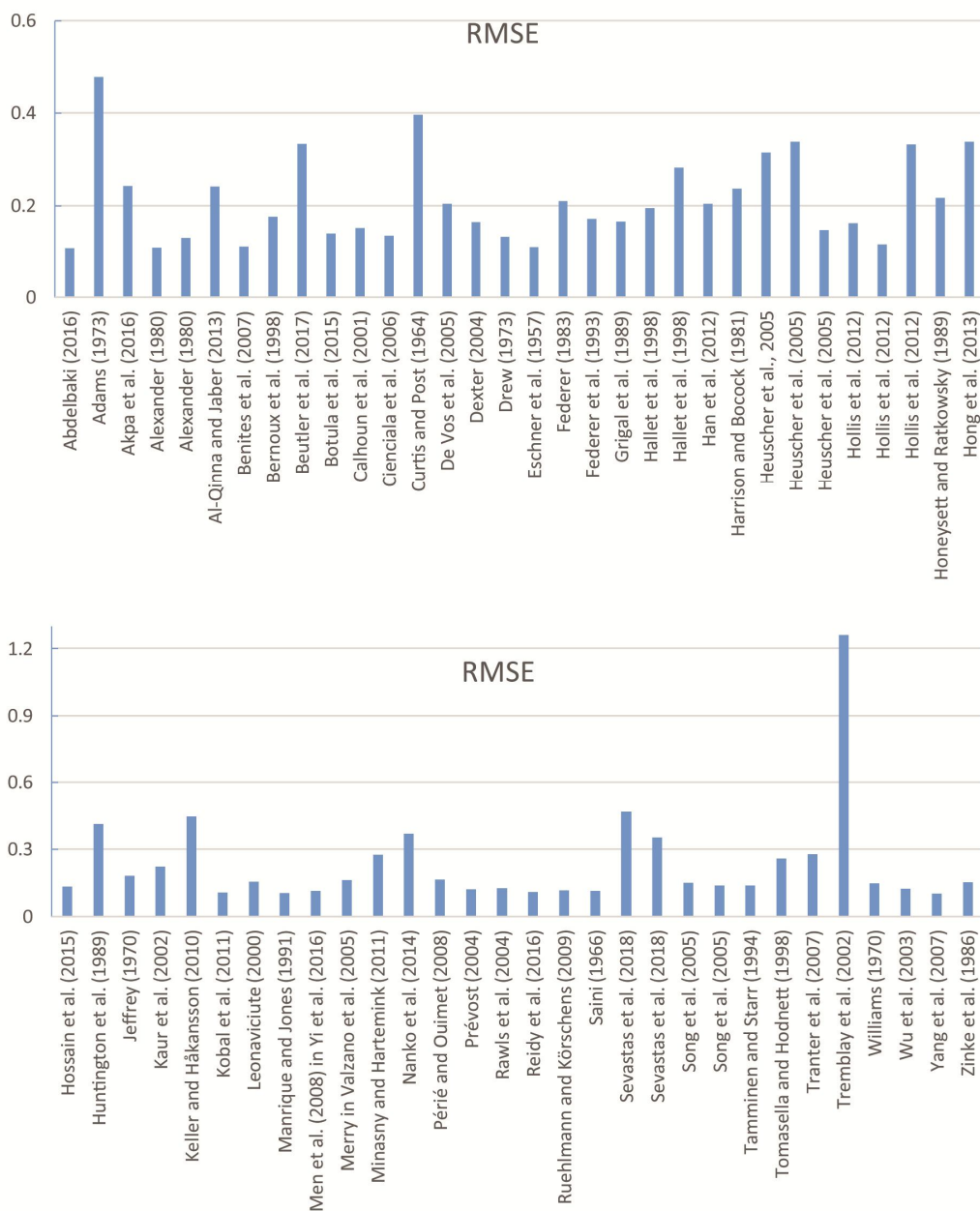
در بیش تر موارد نزدیک به یکدیگر بوده است. مقدار ضریب تغییرات SDPE برابر با ۲۲٪ است که نشان دهنده تغییرات کم توابع مختلف براساس این آماره خطا است (شکل ۵).

مقدار SDPE بین ۰/۰۹۷۶ تا ۰/۲۶۶۱ با میانگین ۰/۱۲۰۴ متغیر بود. با توجه به شکل ۴ مقدار SDPE به استثنا چند مورد ( Heuscher et al. (2005)-b; Harrison and Boccock (1981); Huntington et al. (1989); Sevastas et al. (2018)-a; Hollis (et al. (2012)-c; Al-Qinna and Jaber (2013)



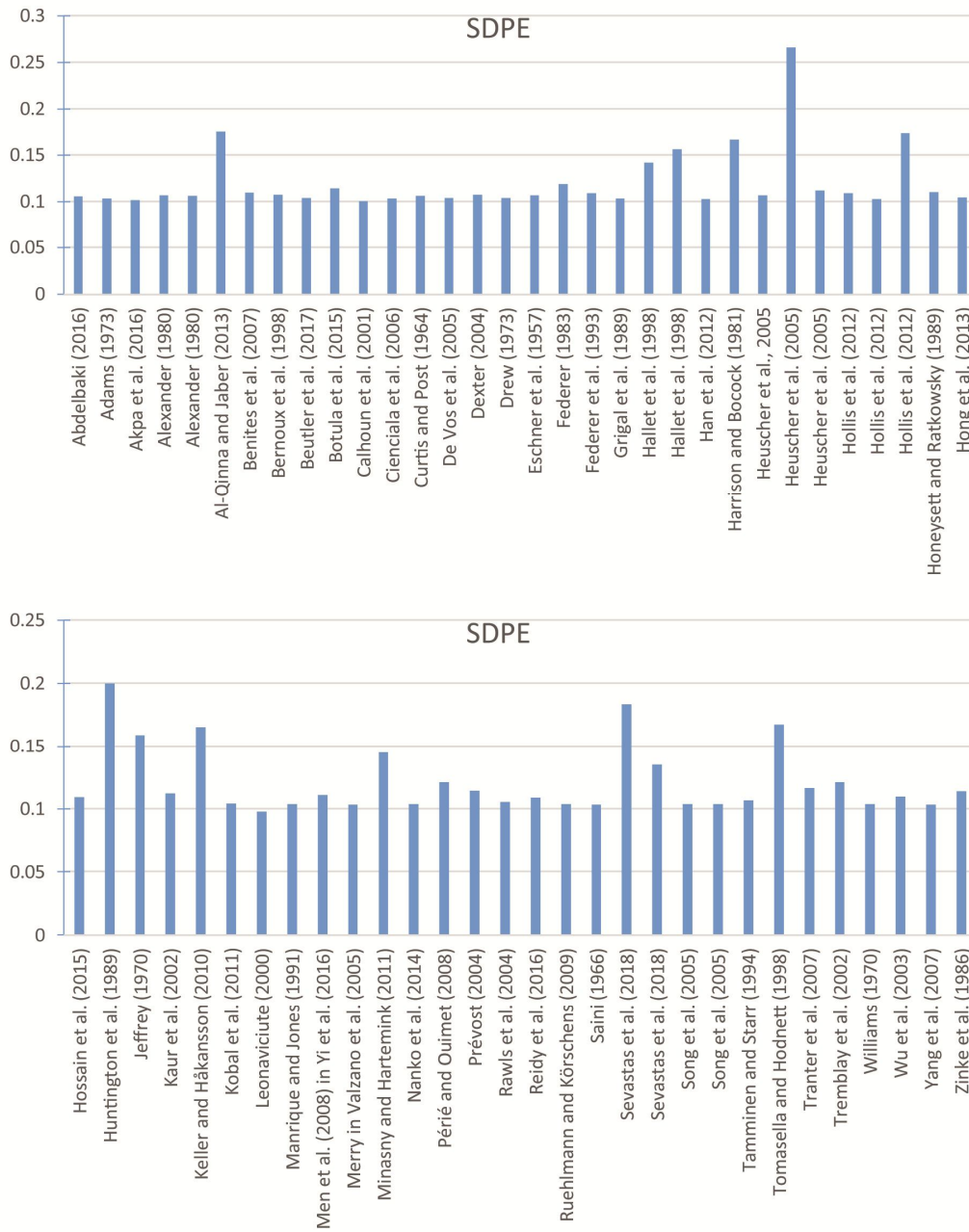
شکل ۳- مقدار ME توابع انتقالی مورد استفاده به منظور پیش بینی چگالی ظاهری.  
 Figure 3. ME value of pedotransfer functions used to predict bulk density.





شکل ۴- مقدار RMSE توابع انتقالی مورد استفاده به منظور پیش‌بینی چگالی ظاهری.

Figure 4. RMSE value of pedotransfer functions used to predict bulk density.



شکل ۵- مقدار SDPE توابع انتقالی مورد استفاده به منظور پیش بینی چگالی ظاهری.

Figure 5. SDPE value of pedotransfer functions used to predict bulk density.

در پژوهش مذکور، بر اساس مقدار ME تابع عبدالبکی (۲۰۱۶) با مقدار ۰/۰۰۳۵ دارای بهترین نتایج بود (۵۳). مقدار ME در پژوهش حاضر برای تابع تابع عبدالبکی (۲۰۱۶) برابر با ۰/۰۰۵۴ است که دارای رتبه ۳ بوده و مقدار آن نزدیک به پژوهش انجام شده در یونان است. همچنین برای خاک‌های یونان بر اساس مقدار RMSE روش رالز و همکاران (۲۰۰۴) با مقدار ۰/۱۲۹۰ دارای بهترین نتایج بود. برای تعدادی از خاک‌های جنوب ایتالیا بر اساس مقدار RMSE روش سانگ و همکاران (۲۰۰۵) با مقدار ۰/۱۹۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب دارای بهترین نتایج بود (۴۱).

بر اساس SDPE تابع انتقالی لیوناوچته (۲۰۰۰) با مقدار بین ۰/۰۹۷۶ رتبه ۱ و تابع انتقالی سانگ و همکاران (۲۰۰۵) با مقدار ۰/۱۰۳۸ دارای رتبه ۱۵ است. تابع انتقالی دارای بهترین نتایج بر اساس SDPE با بهترین توابع انتقالی بر اساس سایر آماره‌های خطا متفاوت است، نتایج پژوهش سوستاس و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داد که بهترین تابع بر اساس آماره خطا SDPE متفاوت از سایر آماره‌های خطا است (۵۳). در پژوهش سوستاس و همکاران (۲۰۱۸) تابع انتقالی بن (۱۹۸۴) بیان شده در لنتز و همکاران، (۲۰۰۵) با مقدار SDPE برابر با ۰/۱۲۵۰ دارای بهترین نتایج بود.

جدول ۳، ۱۵ تابع انتقالی مختلف که براساس آماره‌های خطا دارای بهترین نتایج بوده‌اند را نشان می‌دهد. بر اساس مقدار ME تابع بنتیس و همکاران (۲۰۰۷) با مقدار ۰/۰۰۰۸ - دارای بهترین نتایج (رتبه ۱) و تابع رالز و همکاران (۲۰۰۴) با مقدار ۰/۰۷۳۱ دارای رتبه ۱۵ است. مقدار میانگین چگالی ظاهری برای خاک‌های مورد مطالعه در بنتیس و همکاران (۲۰۰۷) برابر با ۱/۳۶ بود که نزدیک به مقدار میانگین چگالی ظاهری در این پژوهش است. در ۱۰ مورد از ۱۵ مورد مقدار ME مثبت (بیش‌برآورد) و در ۵ تابع دیگر دارای مقدار منفی (کم‌برآورد) است. بر اساس مقدار RMSE تابع یانگ و همکاران (۲۰۰۷) با مقدار ۰/۱۰۳۸ دارای رتبه ۱ و تابع رالز و همکاران (۲۰۰۴) با مقدار ۰/۱۲۷۹ دارای رتبه ۱۵ است. تابع یانگ و همکاران (۲۰۰۷) براساس ۲۴۷۳ نمونه خاک با بافت‌های خاک مختلف و کاربری‌های متفاوت از سراسر چین به‌دست آمده در نتیجه برای خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش نیز دارای نتایج خوبی بود. ۱۵ تابع انتقالی دارای بهترین نتایج بر اساس مقدار RMSE بر اساس مقدار ME نیز دارای بهترین نتایج هستند اگرچه در بعضی موارد رتبه آن فرق می‌کند. در پژوهش سوستاس و همکاران (۲۰۱۸) برای تعدادی از خاک‌های یونان نیز ۱۵ تابع انتقالی دارای بهترین نتایج بر اساس مقدار RMSE و ME یکسان بودند اگرچه رتبه‌بندی آن‌ها فرق می‌کرد.

جدول ۳- ارزیابی عملکرد و رتبه توابع انتقالی مختلف بر اساس معیارهای ارزیابی برای ۲۲۰ نمونه مورد آزمایش.

**Table 3. Performance evaluation and ranking of the PTFs via accuracy criteria.**

منبع	ME ( $\frac{g}{cm^3}$ )	رتبه	منبع	RMSE ( $\frac{g}{cm^3}$ )	رتبه	منبع	SDPE ( $\frac{g}{cm^3}$ )	رتبه
Benites et al. (2007)	-0.0008	۱	Yang et al. (2007)	0.1038	۱	Leonaviciute (2000)	0.0976	۱
Alexander (1980)-a	0.0018	۲	Manrique and Jones (1991)	0.1042	۲	Calhoun et al. (2001)	0.1009	۲
Abdelbaki (2016)	0.0054	۳	Abdelbaki (2016)	0.1060	۳	Akpa et al. (2016)	0.1016	۳
Yang et al. (2007)	0.0111	۴	Benites et al. (2007)	0.1069	۴	Hollis et al. (2012)-b	0.1032	۴
Manrique and Jones (1991)	0.0136	۵	Kobal et al. (2011)	0.1087	۵	Benites et al. (2007)	0.1033	۵
Eschner et al. (1957)	0.0155	۶	Eschner et al. (1957)	0.1082	۶	Merry in Valzano et al. (2005)	0.1033	۶
Reidy et al. (2016)	0.0224	۷	Alexander (1980)-a	0.1095	۷	Yang et al. (2007)	0.1033	۷
Kobal et al. (2011)	-0.0288	۸	Reidy et al. (2016)	0.1108	۸	Saini (1966)	0.1033	۸
Men et al. (2008) in Yi et al. (2016)	-0.0310	۹	Hollis et al. (2012)-2	0.1137	۹	Cienciala et al. (2006)	0.1034	۹
Prévoست (2004)	-0.0420	۱۰	Saini (1966)	0.1142	۱۰	Williams (1970)	0.1035	۱۰
Hollis et al. (2012)-b	-0.0481	۱۱	Men et al. (2008) in Yi et al. (2016)	0.1149	۱۱	Manrique and Jones (1991)	0.1035	۱۱
Saini (1966)	0.0489	۱۲	Ruehlmann and Körschens (2009)	0.1173	۱۲	Ruehlmann and Körschens (2009)	0.1035	۱۲
Ruehlmann and Körschens (2009)	0.0554	۱۳	Prévoست (2004)	0.1216	۱۳	Song et al. (2005)-b	0.1036	۱۳
Wu et al. (2003)	0.0588	۱۴	Wu et al. (2003)	0.1242	۱۴	Grigal et al. (1989)	0.1037	۱۴
Rawls et al. (2004)	0.0731	۱۵	Rawls et al. (2004)	0.1279	۱۵	Song et al. (2005)-a	0.1038	۱۵

(۱، ۲۴ و ۲۵). از آنجا که توانایی PTF موجود معمولاً فقط به مناطق یا انواع خاک‌هایی که برای آن‌ها ساخته شده است محدود می‌شود در نتیجه برای خاک‌های هر منطقه باید واسنجی شوند (۷، ۱۴ و ۳۰). در این مطالعه، مدل مبتنی بر OC مختلف که معمولاً در توابع مختلف از آن‌ها استفاده می‌شود به‌منظور پیش‌بینی چگالی ظاهری خاک با استفاده از معادلات زیر واسنجی شد:

**واسنجی توابع انتقالی:** در این پژوهش مدل‌های تک‌پارامتری برای پیش‌بینی BD خاک بر اساس OC به عنوان متغیر پیش‌بینی توسعه یافت. با توجه به پژوهش‌های گذشته اکثر مدل‌های مبتنی بر OC برای پیش‌بینی BD خاک شامل رابطه خطی بین BD و OC (رابطه ۴)، رابطه خطی بین مجذور OC و BD (رابطه ۵)، رابطه نمایی بین BD و OC (رابطه ۶)، رابطه خطی بین BD و لگاریتم OC (رابطه ۷) و رابطه چندجمله‌ای بین OC و BD (رابطه ۸) است

RMSE به دست آمده از رابطه های ۴، ۶، ۷ و ۸ چه در مرحله واسنجی و چه در مرحله ارزیابی کم تر از مقدار RMSE تابع یانگ و همکاران (۲۰۰۷) است. مقدار SDPE بین ۰/۰۷۹۲ گرم بر سانتی متر مکعب (در رابطه ۶) و ۰/۱۰۲۴ گرم بر سانتی متر مکعب (در رابطه ۴) برای مرحله واسنجی متغیر بود، و این مقدار برای مرحله ارزیابی بین ۰/۰۸۷۵ و ۰/۱۰۳۴ بود. نتایج مقدار SDPE در جدول ۳ و جدول ۴ نشان می دهد که دقت رابطه های ۴ تا ۸ بهتر از ۶۴ معادله مورد ارزیابی است. مقدار ME نیز برای رابطه های ۴ تا ۸ کوچک تر از  $|0.0003|$  است. که مقدار آن خیلی کم تر از ME به دست آمده با استفاده از ۶۴ تابع مورد ارزیابی بود.

تجزیه و تحلیل نتایج جدول ۴ نشان می دهد که توابع انتقالی تولید شده با دقت رضایت بخشی چگالی ظاهری خاک را بر اساس مقدار کربن آلی پیش بینی می کند. هم چنین نتایج نشان می دهد که هیچ کدام از توابع ارائه شده برتری محسوس نسبت به سایر مدل ها در خاک های مورد مطالعه ندارد. نتایج جدول ۴ نشان می دهد که در مرحله ارزیابی نیز دقت توابع انتقالی تولید شده مناسب بوده است.

$$BD = 1.4856 - 0.0942OC \quad (۴)$$

$$BD = 1.5386 - 0.1452OC^{0.5} \quad (۵)$$

$$BD = 1.4869 \times \exp(-0.0664OC) \quad (۶)$$

$$BD = 1.3985 - 0.04974 \ln(OC) \quad (۷)$$

$$BD = 1.4936 - 0.1226OC + 0.0206 \times OC^2 \quad (۸)$$

برای به دست آوردن پارامترهای برازش (ثابت های معادله ها) از روش حداقل مجذور مربعات استفاده شد. برای این منظور از ۱۱۰ نمونه از کل نقاط شامل ۵۵ نمونه از عمق ۰-۱۵ و ۵۵ نمونه از عمق ۱۵-۳۰ به منظور پیدا کردن بهترین پارامترهای برازش و از باقیمانده نقاط به منظور ارزیابی استفاده شد. جدول ۴ مقدار پارامترهای آماری مربوط به آموزش و ارزیابی رابطه های ۴ تا ۸ را نشان می دهد.

مقدار RMSE برای مرحله واسنجی دارای کم ترین مقدار برابر با ۰/۰۸۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب در رابطه ۸ و بیش ترین مقدار برابر با ۰/۱۰۶۱ گرم بر سانتی متر مکعب در رابطه ۴ بود. در بین ۶۴ تابع مورد بررسی کم ترین مقدار RMSE مربوط به تابع یانگ و همکاران (۲۰۰۷) با مقدار ۰/۱۰۳۸ بوده است. مقدار

جدول ۴- ارزیابی دقت مدل های ایجاد شده.

Table 4. Evaluation the accuracy of the developed models.

رابطه	واسنجی			ارزیابی		
	ME	RMSE	SDPE	ME	RMSE	SDPE
۴	-0.0001	0.0936	0.1024	-0.0001	0.1033	0.1009
۵	-0.0000	0.0965	0.0986	-0.0000	0.1067	0.1034
۶	-0.00002	0.0995	0.0792	-0.00002	0.1021	0.0875
۷	-0.0003	0.0835	0.0993	-0.0003	0.1013	0.1014
۸	0.00002	0.0865	0.0923	0.00002	0.0913	0.0945

### نتیجه گیری

بهترین نتایج بودند. از آنجاکه توابع انتقالی موجود برای مناطق یا خاک‌هایی که برای آن‌ها ساخته شده‌اند توانایی دارند در نتیجه برای محدوده مورد مطالعه ۵ تابع انتقالی که فقط نیاز به ماده آلی دارند مورد واسنجی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که واسنجی باعث افزایش دقت برای خاک‌های مورد مطالعه می‌گردد.

در مطالعه حاضر، یک بررسی جامع از توابع انتقالی‌های موجود در زمینه که تخمین چگالی ظاهری خاک صورت گرفت. برای این منظور توانایی ۶۴ تابع انتقالی مختلف موجود در منابع برای ۲۲۰ نمونه از بخشی از خاک‌های دشت سیستان واقع در جنوب شرقی ایران بر اساس شاخص‌ها آماری  $RMSE$ ،  $ME$  و  $SDPE$  مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بهترین عملکردها مربوط به توابع انتقالی است که تنها از کربن آلی یا ماده آلی به‌عنوان متغیر ورودی استفاده می‌کند. نتایج نشان داد که توابع یانگ و همکاران (۲۰۰۷)، مانیک و جونز (۱۹۹۱)، عبدالکی و همکاران (۲۰۱۸) و الکساندر (۱۹۸۰) دارای

### سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-9618-122 انجام شد که بدین‌وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌گردد.

### منابع

1. Abdelbaki, A.M. 2016. Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S. soils. *Ain Shams Engineering Journal*. 9: 4. 1611-1619.
2. Adams, W.A. 1973. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *European Journal of Soil Science*. 24: 10-17.
3. Alexander, E.B. 1980. Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*. 44: 689-692.
4. Al-Qinna, M.I., and Jaber, S.M. 2013. Predicting soil bulk density using advanced pedotransfer functions in an arid environment. *Transactions of the ASAE*. 56: 963-976.
5. Benites, V.M., Machado, P.L.O.A., Fidalgo, E.C.C., Coelho, M.R., and Madari, B.E. 2007. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*. 139: 90-97.
6. Bernoux, M., Arrouays, D., Cerri, C., Volkoff, B., and Jolivet, C. 1998. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*. 62: 743-749.
7. Botula, Y.D., Nemes, A., Van Ranst, E., Mafuka, P., De Pue, J., and Cornelis, W.M. 2015. Hierarchical pedotransfer functions to predict bulk density of highly weathered soils in Central Africa. *Soil Science Society of America Journal*. 79: 476-486.
8. Calhoun, F.G., Smeck, N.E., Slater, B.L., Bigham, J.M., and Hall, G.F. 2001. Predicting bulk density of Ohio soils from morphology, genetic principles, and laboratory characterization data. *Soil Science Society of America Journal*. 65: 811-819.
9. Chari, M.M., Poozan, M.T., and Afrasiab, P. 2020. Modeling soil water infiltration variability using scaling. *Biosystem Engineering*. 196: 56-66.
10. Cienciala, E., Exnerova, Z., Macku, J., and Henzlik, V. 2006. Forest topsoil organic carbon content in Southwest Bohemia region. *Journal of Forest Science*. 52: 387-398.
11. Curtis, R.O., and Post, B.W. 1964. Estimating bulk density from organic-matter content in some Vermont forest soils. *Soil Science Society of America Journal*. 28: 285-286.

12. Dam, R.F., Mehdi, B.B., Burgess, M.S.E., Madramootoo, C.A., Mehuys, G.R., and Callum, I.R. 2005. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil and Till Research*. 84: 41-53.
13. Delbari, M., Afrasiab, P., Gharabaghi, B., Amiri M., and Salehian, A. 2019. Spatial variability analysis and mapping of soil physical and chemical attributes in a salt-affected soil. *Arabian Journal of Geosciences*. 12: 68. 1-18.
14. De Vos, B., Van Meirvenne, M., Quataert, P., Deckers, J., and Muys, B. 2005. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*. 69: 500-510.
15. 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.
16. Drew, L.A. 1973. Bulk density estimation based on organic matter content of some Minnesota soils. *MEinn Forestry Research Notes*. 243: 1-4.
17. Eschner, A.R., Jones, B.O., and Moyle, R.C. 1957. Physical Properties of 134 soils in Six Northeastern States. Station Paper No. 89, Forest Service. United States Department of Agriculture, 1-24.
18. Federer, C.A. 1983. Nitrogen mineralization and nitrification: depth variation in four New England forest soils. *Soil Science Society of America Journal*. 47: 1008-1014.
19. Federer, C.A., Turcotte, D.E., and Smith, C.T. 1993. The organic fraction - bulk density relationship and the expression of nutrient content in forest soils. *Canadian Journal of Forest Research*. 23: 1026-1032.
20. Grigal, D.F., Brovold, S.L., Nord, W.S., and Ohmann, L.F. 1989. Bulk density of surface soils and peat in the north central United States. *Canadian Journal of Forest Research*. 69: 895-900.
21. Hallet, S.H., Hollis, J.M., and Keay, C.A. 1998. Derivation and Evaluation of a set of Pedogenically-based Empirical Algorithms for Predicting Bulk Density in British Soils. [https://www.landis.org.uk/downloads/downloads/Predicting Bulk Density.pdf](https://www.landis.org.uk/downloads/downloads/Predicting%20Bulk%20Density.pdf).
22. Han, G.Z., Zhang, G.L., Gong, Z.T., and Wang, G.F. 2012. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density in China. *Soil Science*. 177: 158-164.
23. Harrison, A.F., and Bocoock, K.L. 1981. Estimation of soil bulk-density from loss-on-ignition values. *Journal of Applied Ecology*. 18: 919-927.
24. Heuscher, S.A., Brandt, C.C., and Jardine, P.M. 2005. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal*. 69: 51-56.
25. Hollis, J.M., Hannam, J., and Bellamy, P.H. 2012. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. *European Journal of Soil Science*. 63: 96-109.
26. Honeysett, J.L., and Ratkowsky, D.A. 1989. The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. *Soil Science*. 40: 299-308.
27. Hong, S.Y., Minasny, B., Han, K.H., Kim, Y., and Lee, K. 2013. Predicting and mapping soil available water capacity in Korea. *Peer Journal*. DOI: 10.7717/peerj.71.
28. Hossain, M.F., Chen, W., and Zhang, Y. 2015. Bulk density of mineral and organic soils in the Canada's arctic and sub-arctic. *Information Processing in Agriculture*. 2: 183-190.
29. Huntington, T.G., Johnson, C.E., Johnson, A.H., Siccama, T.G., and Ryan, D.F. 1989. Carbon, organic matter, and bulk density relationships in a forested spodosol. *Soil Science*. 148: 380-386.
30. Jeffrey, D.W. 1970. A note on the use of ignition loss as a means for the approximate estimation of soil bulk density. *Journal of Ecology*. 58: 297-299.
31. Kaur, R., Kumar, S., and Gurung, H.P. 2002. A 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: 5. 847-858.

32. Katuwal, S., Knadel, M., Norgaard, T., Moldrup, P., Greve, M.H., and de Jonge, L.W. 2019. Predicting the dry bulk density of soils across Denmark: Comparison of single-parameter, multi-parameter, and vis-NIR based models. *Geoderma*. 361: 1140-1148.
33. Keller, T., and Hakansson, I. 2010. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*. 154: 398-406.
34. Kopal, M., Urbancic, M., Potocic, N., De Vos, B., and Simoncic, P. 2011. Pedotransfer functions for bulk density estimation of forest soils. *Journal of Forestry Society of Croatia*. 135: 19-27.
35. Leonaviciute, N. 2000. Predicting soil bulk and particle densities by pedotransfer functions from existing soil data in Lithuania. *Geografijos metraštis*. 33: 317-330.
36. Makovniková, J., Širán, M., Houšková, B., Pálka, B., and Jones, A. 2017. Comparison of different models for predicting soil bulk density. Case study: Slovakian agricultural soils. *International Agrophysics*. 31: 491-498.
37. Manrique, L.A., and Jones, C.A. 1991. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*. 55: 476-481.
38. Men, M.X., Peng, Z.P., Xu, H., and Yu, Z.R. 2008. Investigation on Pedotransfer function for estimating soil bulk density in Hebei province. *Chinese Journal Soil Science*. 39: 33-37 (In Chinese)
39. Minasny, B., and Hartemink, A.E. 2011. Predicting soil properties in the tropics. *Earth Science Reviews*. 106: 52-62.
40. Nanko, K., Ugawa, S., Hashimoto, S., Imaya, A., Kobayashi, M., Sakai, H., Ishizuka, S., Miura, S., Tanaka, N., Takahashi, M., and Kaneko, S. 2014. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. *Geoderma*. 213: 36-45.
41. Nasta, P., Palladino, M., Benedetto Sica, B., Pizzolante, A., Trifuoggi, M., Toscanesi, M., Giarra, A., D'Auria, J., Nicodemo, F., Mazzitelli, C., Lazzaro, U., Di Fiore, P., and Romano, N. 2020. Evaluating pedotransfer functions for predicting soil bulk density using hierarchical mapping information in Campania, Italy. *Geoderma Regional*. 21: 1-13.
42. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 539-547. In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney, (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison.
43. Perie, C., and Ouimet, R. 2008. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. *Canadian Journal Soil Science*. 88: 315-325.
44. Prevost, M. 2004. Predicting soil properties from organic matter content following mechanical site preparation of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*. 68: 943-949.
45. Rawls, W.J., Nemes, A., and Pachepsky, Ya. 2004. Effect of soil organic carbon on soil hydraulic properties. P 95-114. In: Ya., Pachepsky and W.J., Rawls (eds.), *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*. Developments in Soil Science vol. 30. Elsevier, New York.
46. Reidy, B., Simo, I., Sills, P., and CreMAEr, R.E. 2016. Pedotransfer functions for Irish soils – estimation of bulk density (pb) per horizon type. *Soil Discussions*. 2: 2. 1039-1074.
47. Ruehlmann, J., and Körschens, M. 2009. Calculating the effect of soil organic matter concentration on soil bulk density. *Soil Science Society of America Journal*. 73: 3. 876-885.
48. Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., and Håkansson, I. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Till Research*. 102: 242-254.
49. Saini, G.R. 1966. Organic matter as a measure of bulk density of soil. *Nature*. 210: 5042. 1295-1296.



50. Sequeira, C.H., Wills, S.A., Seybold, C.A., and West, L.T. 2014. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma*. 213: 64-73.
51. Sevastas, S., Siarkos, I., Theodossiou, N., Ifadis, I., and Kaffas, K. 2017. Comparing hydrological models built upon open access and/or measured data in a GIS environment. 6<sup>th</sup> International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) and SECOTOX Conference, June 25–30, Thessaloniki, Greece.
52. Sevastas, S., Gasparatos, D., Botsis, D., Siarkos, I., Diamantaras, K.I., and Georgios Bilas, G. 2018. Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in the Upper Anthemountas basin, Greece. *Geoderma Regional*. 14: 1-14.
53. Shiri, J., Keshavarzi, A., Kisi, O., Karimi, S., and Iturraran-Viveros, U. 2017. Modeling soil bulk density through a complete data scanning procedure: heuristic alternatives. *Journal of Hydrolgy*. 549: 592-602.
54. Song, G., Li, L., Pan, G., and Zhang, Q. 2005. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation. *Biogeochemistry*. 74: 1. 47-62.
55. Tamminen, P., and Starr, M. 1994. Bulk density of forested mineral soils. *Silva Fennica*. 28: 53-60.
56. Tomasella, J., and Hodnett, M.G. 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*. 163: 190-202.
57. Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A.B., Murphy, B., McKenzie, N.J., Grundy, M., and Brough, D. 2007. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. *Soil Use Management*. 23: 437-443.
58. Tremblay, S., Ouimet, R., and Houle, D. 2002. Prediction of organic carbon content in upland forest soils of Quebec. Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. 32: 903-914.
59. Walter, K., Don, A., Tiemeyer, B., and Freibauer, A. 2016. Determining soil bulk density for carbon stock calculations: A systematic method comparison. *Soil Science Society of America Journal*. 80: 579-591.
60. Williams, R.J.B. 1970. Relationships between the composition of soils and physical measurements made on them. Rothamsted Experimental. Station Report Part 2: 5-35.
61. Wu, H., Guo, Z., and Peng, C. 2003. Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochemical Cycles*. 17: 2. 1048-1060.
62. Yang, Y., Mohammad, A., Feng, J., Zhou, R., and Fang, J. 2007. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*. 84: 2. 131-141.
63. Zinke, P.J., Stangenberger, A.G., Post, W.M., Emanuel, W.R., and Olson, J.S. 1986. Worldwide Organic Soil Carbon and Nitrogen Data. Oak Ridge National Laboratory. Pp: 4-6.



---

## Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in Sistan plain

**\*M.M. Chari**

Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Zabol

Received: 07.16.2020; Accepted: 10.27.2020

---

### Abstract

**Background and Objectives:** Soil bulk density (BD) is important because of its direct effect on soil properties such as porosity, soil moisture availability, and hydraulic conductivity and its indirect effects on root growth and crop yield. Environmental processes and agronomic practices induce soil bulk density to vary greatly in both space and time. On the other hand, measuring it on a large scale requires a lot of time and is not economical. As a result, indirect methods are used to measure the bulk density when performing large-scale field activities. Pedotransfer Functions (PTFs) have been broadly implemented as indirect cost-effective and time-saving methods in predicting soil bulk density. The purpose of this study is to evaluate the existing Pedotransfer functions in order to determine the bulk density for different soils of Sistan region as well as calibration and provide new Pedotransfer functions for the study area.

**Materials and Methods:** After reviewing different reference, 64 different Pedotransfer functions (PTFs) published in different sources were selected to estimate the bulk density. These Pedotransfer functions were selected in such a way that 1) in a wide range of time scale (from 1957 up to date), 2) from wide regional, 3) from various soil land uses 4) from all types of regression techniques and 5) only using common and easily measured predictors such as sand, silt, clay and organic carbon. The soil samples collected in this study was 220 data, which was obtained from 110 points at two depths of 0-15 and 15-30 .Three indicators of absolute mean error (ME), root mean square error (RMSE) and standard deviation of the predicted error (SDPE) were used to evaluate.

**Results:** Among the existing Pedotransfer functions, Benites et al. (2007) with ME value equal to -0.0008, RMSE value equal to 0.1038 and SDPE equal to 0.1033 had the best results. Based on the RMSE value of Yang et al. (2007) with a value of 0.1038 with a rank of 1 and based on SDPE function with a value between 0.0976 Leonaviciute (2000) had the best results. For the study area, 5 presented relationships including linear relationship between BD and OC, linear relationship between OC and BD squares, exponential relationship between BD and OC, linear relationship between BD and OC logarithm and polynomial relationship between OC and BD were presented.

**Conclusion:** Based on the results it can be concluded that soil organic carbon (OC) is the most important factor in predicting soil bulk density and using soil organic carbon alone, soil bulk density can be predicted with relative accuracy. It can also be concluded that the 5 relationships developed in this study can be used to obtain the apparent density in the study area.

**Keywords:** Bulk density, Organic carbon, Pedotransfer function, Soil texture

---

\* Corresponding Author; Email: mmahdichari@uoz.ac.ir