

پیشنهاد توابع انتقالی تخمین رطوبت خاک بر اساس بعد فرکتال بافت خاک

یاسر استواری^{۱*} - حبیب اله بیگی هرچگانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۳/۱۹

چکیده

اندازه‌گیری رطوبت در مکش‌های مختلف، صرف‌نظر از هزینه‌ها، نیازمند وقت زیادی است. لذا تخمین رطوبت خاک با استفاده از خصوصیات پایه‌ای آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این مطالعه بررسی رابطه‌ی بعد فرکتال بافت-رطوبت‌حجمی و ارائه روابط کمی برآورد رطوبت در هشت مکش خاک با استفاده از بعد فرکتال بافت است. برای این منظور از ۱۹۵ نمونه خاک UNSODA استفاده شد. در این مطالعه، از رابطه‌ی سپاسخواه و تفته (۲۰۱۳) جهت برآورد بعد فرکتال بر اساس درصد اجزای بافت خاک استفاده شد. رابطه‌ی بعد فرکتال-رطوبت بیشتر از یک روند نمایی پیروی می‌کند. تعدادی تابع نمایی بر مبنای بعد فرکتال و چگالی ظاهری برای برآورد رطوبت در دامنه‌ی منحنی رطوبتی خاک ارائه شد. این توابع پیشنهادی عموماً کارایی خوب، قابل مقایسه و گاه‌به‌گه‌تری در مقایسه با روابط خطی موجود از جمله توابع جدید قنبریان-میلان (۲۰۱۰) نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: بعد فرکتال بافت، توابع انتقالی، برآورد رطوبت خاک، روابط نمایی، UNSODA

مقدمه

علامت مثبت به کار رفته است و بر عکس. نمونه‌ی آن را در معادله‌ی لیل (۸) می‌بینید: $0.033 = 0.065 \times BD + 0.005 \times BD \times CI$. در این معادله رابطه‌ی مثبتی بین رطوبت و BD (جرم ویژه‌ی ظاهری) فرض شده است در صورتی که در رابطه‌ی منفی بین 0.33 و BD وجود دارد. به کارگیری تعداد زیادی متغیر مستقل در تابع به منظور افزایش ضریب تعیین (R^2). مثلاً معادله هادنت و توماسلا (۵) با داشتن تعداد زیاد متغیرهای ورودی، که اندازه‌گیری بعضی از آن‌ها مانند CEC وقت‌گیر و پرهزینه است، سعی در بالا بردن مقدار ضریب تعیین شده است.

در بسیاری از روابط پیش‌بینی رطوبت از درصد اجزای بافت یا ویژگی‌های مرتبط به بافت مانند میانگین هندسی اندازه ذرات (d_g) یا انحراف معیار هندسی اندازه ذرات (σ_g) استفاده شده است. این دو شاخص از درصدهای رس، شن و سیلت محاسبه می‌شوند (۱). یکی دیگر از شاخص‌های بافتی بعد فرکتال ذرات جامد (بافت خاک) است که مقدار آن بین صفر تا ۳ متغیر است (۱۱). تئوری فرکتال ابزار مفیدی ایجاد می‌کند که قادر است شکاف بین استفاده از مدل‌های تجربی و تفسیر فیزیکی ضرایب را پر کند (۶). اساساً، بعد فرکتال با استفاده از داده‌های کسر تجمعی ذرات- قطر محاسبه می‌شود (۷) و (۱۱). اخیراً توابعی برای تخمین بعد فرکتال ارائه شده که در آن‌ها از درصدهای بافت خاک استفاده می‌شود. از نمونه‌های آن می‌توان به توابع هوانگ و ژانگ (۶) و سپاسخواه و تفته (۱۱) اشاره کرد.

پیش‌بینی ظرفیت رطوبت حجمی خاک در مکش‌های گوناگون از بار هزینه‌های نمونه‌برداری و اندازه‌گیری خواهد کاست. از این رو توابعی برای پیش‌بینی رطوبت ارائه شده است که در آن از داده‌های موجود یا زودیافتی همچون درصد اجزای بافت، جرم ویژه‌ی ظاهری، ماده‌آلی استفاده شده است (۴ و ۹). این توابع همیشه موفق عمل نمی‌کنند. برخی از این توابع از داده‌های خاصی استخراج شده‌اند و احتمالاً در همان محدوده‌ی جغرافیایی مفید خواهند بود (۲). با این حال، برخی از توابع با همان داده‌های اولیه هم کارایی بالایی را نشان نمی‌دهند. برخی از علل عدم کارایی بالا و یا نواقص توابع پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف عبارتند از:

عدم در نظر گرفتن طبیعت رابطه‌ی متغیرهای مستقل با رطوبت در مکش مورد نظر: در بسیاری از موارد رابطه غیر خطی است، ولی رابطه خطی در نظر گرفته شده است.

عدم رعایت اثر کاهش یا افزایشی متغیر پیش‌بینی کننده بر مقدار متغیر پاسخ: در بسیاری از موارد رابطه‌ی متغیر پیش‌بینی کننده و رطوبت منفی است، ولی در توابع ارائه شده متغیر پیش‌بینی کننده با

۱ و ۲ - دانشجوی دکتری و استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*-نویسنده مسئول: (Email: Yaser.ostovary@gmail.com)

معیار اطلاعات آکائیک (AIC) جهت آزمون صحت و اعتبار سنجی توابع پیشنهادی و مقایسه این توابع با توابع قنبریان-میلان (۴) استفاده گردید (۲). ضریب تعیین مستقیماً از نرم‌افزار استخراج شد، ولی آماره‌های دیگر از روابط زیر به دست آمدند:

$$ME = \sum [(P_i - O_i) / n] \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{(\sum [(P_i - O_i)^2] / n)} \quad (3)$$

$$GMER = \exp [\sum \ln (P_i / O_i)] \quad (4)$$

$$AIC = n \ln [\sum (P_i - O_i)^2 / n] + 2 \cdot k \quad (5)$$

که در آن ها P_i : مقادیر برآورد شده رطوبت، O_i : مقادیر اندازه‌گیری شده، n : تعداد نمونه‌ها و k : تعداد پارامترهای مدل است. علاوه بر این، برای ارزیابی توابع پیشنهادی و مقایسه آن‌ها از خطوط ۱:۱ استفاده شد. تفاوت عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون مقادیر مشاهده شده-برآورد شده به وسیله‌ی هر تابع پیشنهادی و تابع نظیر قنبریان-میلان (۴) با صفر و یک محاسبه و برای مقایسه دو تابع نظیر به کار رفت. مقایسه میانگین متغیرها در مجموعه داده‌های اولیه و اعتبارسنجی با آزمون t در سطح ۵ درصد انجام شد. محاسبات آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA 8.0 صورت گرفت.

نتایج و بحث

شکل ۱ توزیع بافت خاک‌های به کار رفته در توسعه‌ی توابع انتقالی را نشان می‌دهد. بافت خاک در داده‌های اولیه در ۱۱ کلاس از ۱۲ بافت کلاس USDA قرار داشت (شکل ۱). بافت خاک داده‌های اعتبارسنجی نیز توزیع نسبتاً مشابهی داشت (شکل ۱). خلاصه آماری ویژگی‌های بافتی، جرم ویژه‌ی ظاهری و رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف دو گروه داده در جدول ۱ مقایسه شده است. میانگین اجزای بافت، جرم ویژه‌ی ظاهری، بعد فراکتال و رطوبت حجمی مکش‌های مختلف در دو مجموعه داده‌های اولیه و اعتبارسنجی تفاوت معنی‌داری باهم ندارند ($p > 0.05$). مقدار میانگین و میانه متغیرها در هر گروه داده نزدیک بوده که حاکی از نرمال بودن توزیع داده‌ها است. در داده‌های اولیه شبن با میانگین ۴۵/۶ درصد بیشترین و رس با میانگین ۱۸/۳ درصد کمترین مقدار را در اجزای بافت خاک دارد (شکل ۱، جدول ۲).

حداقل مقدار D برابر ۲/۳۴ و حداکثر آن ۲/۹ بود. در این داده‌ها، طبق معمول، مقادیر کم D در بافت‌های شنی و مقادیر بزرگ D در بافت‌های رسی دیده شد (۷). در داده‌های اولیه مقدار جرم ویژه‌ی ظاهری خاک‌ها از ۱/۰۲ تا ۱/۷۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب متغیر است. مقدار رطوبت از حداقل $0.1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ در مکش ۱۵۰۰ تا حداکثر $0.58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ در مکش صفر متغیر است. شکل ۲ رابطه بعد فرکتال (D) با رطوبت در مکش‌های مختلف را نشان می‌دهد. در همه نمودارها رابطه نمایی ($\theta = \exp(b_0 + b_1 D)$) بهتر از رابطه‌ی خطی

اگرچه رابطه‌ی بعد فرکتال با رطوبت در نقطه پژمردگی اخیراً توسط قنبریان‌علویچه و میلان (۳) تحلیل شده است، ولی به نظر می‌رسد تاکنون روابط کمی برای برآورد رطوبت در مکش‌های مختلف با استفاده از بعد فرکتال ارائه نشده است. لذا هدف از این پژوهش: ۱- بررسی روابط رطوبت با بعد فرکتال و ۲- ارائه روابط کمی برآورد رطوبت در مکش‌های مختلف با استفاده از بعد فرکتال بافت خاک است.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از داده‌های ۱۹۵ نمونه خاک بانک اطلاعاتی UNSODA استفاده شد. همه‌ی این ۱۹۵ نمونه دارای اطلاعات کافی برای استخراج بعد فرکتال بافت و رطوبت حجمی در مکش‌های صفر، ۱۰، ۳۳، ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال بودند. علاوه بر این نمونه‌هایی انتخاب شدند که در آن‌ها جرم ویژه‌ی ظاهری بزرگ‌تر از $1 \text{ m}^{-3} \text{ Mg}$ باشد. داده‌ها به دو دسته ۱۶۵ و ۳۰ تایی تقسیم شدند. دسته ۱۶۵ تایی که در اینجا از آن با نام داده‌های اولیه یاد می‌شود برای توسعه روابط مورد استفاده قرار گرفت. از دسته‌ی ۳۰ تایی برای سنجش اعتبار توابع پیشنهادی استفاده شد. برای برآورد بعد فرکتال از رابطه‌ی سپاسخواه و تفته (۱۱) استفاده شد:

$$D = 3 - 0.118 \left[-\ln \left(\frac{Cl}{100} \right) + \left(\frac{Si + Sa}{100} \right) \right] \quad (1)$$

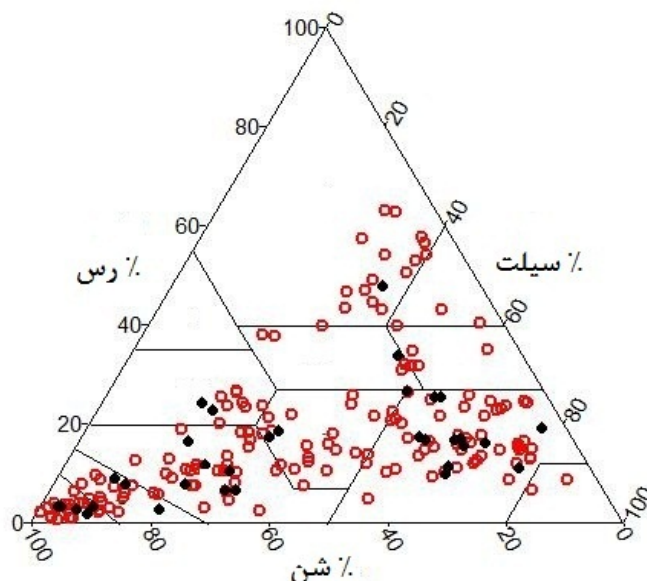
که در آن: D : بعد فرکتال، Cl : درصد رس، Si : درصد سیلت و Sa : درصد شن است.

به منظور بررسی رابطه‌ی بعد فرکتال بافت خاک با رطوبت در مکش‌های صفر، ۱۰، ۳۳، ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، ابتدا نمودارهای پراکنش رطوبت در مقابل بعد فرکتال رسم شد. سپس یک رابطه‌ی خطی به شکل $\theta = b_0 + b_1 D$ به نمودارهای پراکنش تحمیل شد. در مرحله بعد، با بازبینی نمودارها، رابطه‌ی $\theta = \exp(b_0 + b_1 D)$ شکل $\theta = \exp(b_0 + b_1 D)$ با استفاده از رگرسیون غیر خطی به داده‌ها برازش و سپس بر روی نمودار پراکنش ترسیم شد. بعد از استخراج توابع، صحت و اعتبار توابع حاصله ارزیابی شدند.

توابع انتقالی پیشنهادی با توابع نسبتاً جدید قنبریان-میلان جهت برآورد برخی نقاط منحنی رطوبتی (۴) مقایسه شد. انتخاب توابع قنبریان-میلان (۴) جهت مقایسه با توابع انتقالی پیشنهادی به دلیل جدید بودن آن‌ها، استفاده از داده‌های یکسان UNSODA در استخراج توابع انتقالی، و کارایی بالاتر آن‌ها نسبت به توابع گوناگون دیگر (جزئیات در اینجا داده نشده) بود.

از معیارهای ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطا (ME)، میانگین مربعات خطا (RMSE)، نسبت میانگین هندسی خطا (GMER) و

به داده‌ها می‌پردازد. ($\theta = b_0 + b_1 D$)



شکل ۱ - توزیع بافت نمونه‌های مورد استفاده خاک. دایره‌های توخالی داده‌های اولیه و دایره‌های توپر داده‌های اعتبارسنجی هستند.

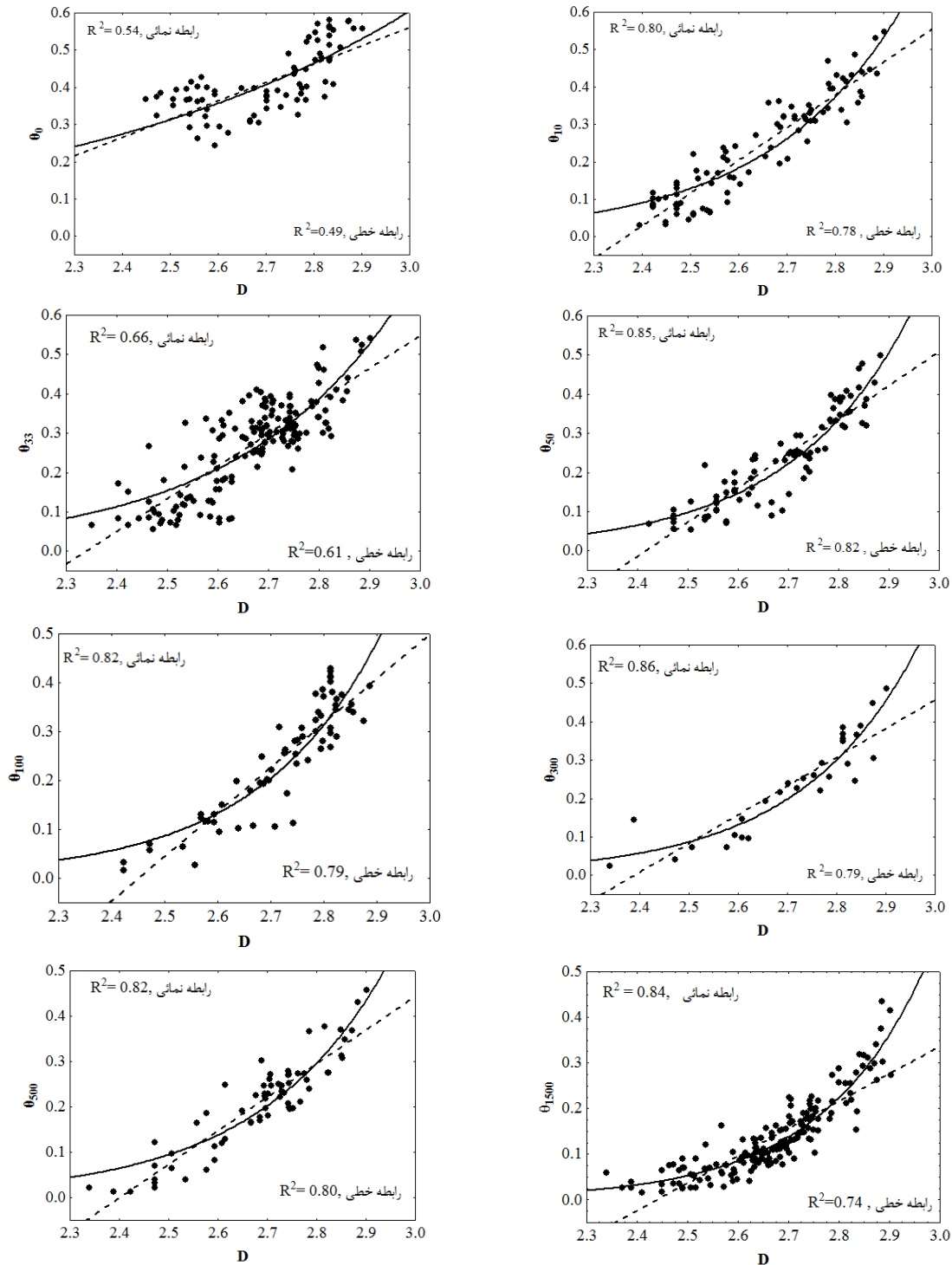
جدول ۱ - خلاصه آماری بعضی ویژگی‌های مرتبط و نقاط منحنی رطوبت‌داده‌های اولیه (A) و اعتبارسنجی (B) خاک UNSODA

انحراف معیار		بیشینه		کمینه		میانہ		میانگین		واحد	ویژگی
B	A	B	A	B	A	B	A	B	A		
۱۰/۱	۱۴/۰	۶۳/۱	۵۸/۳	۲/۰	۱/۲	۱۵/۹	۱۵/۰	۱۵/۸ ^a	۱۸/۳ ^a	%	رس
۲۳/۳	۲۲/۹	۷۶/۷	۸۵/۸	۲/۸	۳/۰	۳۲/۱	۳۲/۹	۳۷/۵ ^a	۳۷/۰ ^a	%	سیلت
۲۸/۹	۲۹/۶	۹۴/۰	۹۸/۹	۴/۰	۴/۰	۴۹/۰	۴۱/۳	۴۷/۲ ^a	۴۵/۶ ^a	%	شن
۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۷۳	۰/۹۶	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۱۹ ^a	۰/۱۹ ^a	mm	dg
۰/۱۱	۰/۱۲	۲/۸۵	۲/۹۰	۲/۴۲	۲/۳۴	۲/۶۸	۲/۶۷	۲/۶۵ ^a	۲/۶۶ ^a	—	بعد فرکتال (D)
۰/۱۴	۰/۱۸	۱/۶۹	۱/۷۶	۱/۰۷	۱/۰۲	۱/۴۹	۱/۴۵	۱/۴۶ ^a	۱/۴۰ ^a	Mg m ⁻³	جرم ویژه ظاهری
۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۴۰	۰/۳۹	۰/۴۲ ^a	۰/۴۱ ^a	cm ³ cm ⁻³	θ_0
۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۲۴ ^a	۰/۲۶ ^a	cm ³ cm ⁻³	θ_{10}
۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۵۰	۰/۵۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۲۹	۰/۳۰	۰/۲۶ ^a	۰/۲۷ ^a	cm ³ cm ⁻³	θ_{33}
۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۳ ^a	۰/۲۳ ^a	cm ³ cm ⁻³	θ_{50}
۱/۱۱	۰/۱۱	۰/۴۴	۰/۵۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۲۳ ^a	۰/۲۵ ^a	cm ³ cm ⁻³	θ_{100}
۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۵ ^a	۰/۲۴ ^a	cm ³ cm ⁻³	θ_{300}
۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۴۷	۰/۴۶	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۲۲ ^a	۰/۲۱ ^a	cm ³ cm ⁻³	θ_{500}
۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۲۶	۰/۴۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۱۲ ^a	۰/۲۰ ^a	cm ³ cm ⁻³	θ_{1500}

dg میانگین هندسی قطر ذرات خاک و θ رطوبت در مکش‌های مختلف می‌باشد. حروف یکسان در ستون میانگین عدم معنی‌داری تفاوت دو گروه داده در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد.

در صورتی که به دلیل ماهیت توابع نمایی، مقدار رطوبت برآورد شده با مقادیر متفاوت بعد فرکتال (از حداقل صفر تا حداکثر ۳) هیچگاه منفی یا صفر نخواهد شد که از مزایای این نوع توابع در برابر توابع رگرسیونی ساده به شمار می‌رود.

هم پراکنش داده‌ها و هم مقدار R^2 دو مدل این برداشت را تأیید می‌کنند. قنبریان و میلان (۳) نیز نشان دادند یک رابطه نمایی بین بعد فرکتال و رطوبت نقطه‌ی پژمردگی وجود دارد. در بیشتر حالات در مقادیر D کمتر از ۲/۴ رابطه‌ی خطی رطوبت حجمی را منفی برآورد می‌کند که منطقی نیست.



شکل ۲- نمودارهای پراکنش رطوبت در نقاط مختلف منحنی رطوبتی در مقابل بعد فرکتال بافت خاک به همراه یک رابطه‌ی خطی ($\theta=b_0+b_1D$) و یک رابطه‌ی نمایی ($\theta=\exp(b_0+b_1D)$) که به هر نمودار تحمیل شده است.

جدول ۲- توابع پیش‌بینی رطوبت حجمی در هشت مکش خاک (نقاط منحنی رطوبتی)

توابع	آماره‌ها	اندازه‌ی نمونه
$\theta_0 = \exp(-1.475 + 0.574 D - 0.648 BD)$	$R^2 = 0.81$, $SSE = 0.116$, $p < 0.01$	n=84
$\theta_{10} = \exp(-9.026 + 3.102 D - 0.450 BD)$	$R^2 = 0.82$, $SSE = 0.466$, $p < 0.01$	n=152
$\theta_{33} = \exp(-8.352 + 2.838 D - 0.399 BD)$	$R^2 = 0.71$, $SSE = 0.631$, $p < 0.01$	n=160
$\theta_{50} = \exp(-12.455 + 4.107 D)$	$R^2 = 0.85$, $SSE = 0.166$, $p < 0.01$	n=84
$\theta_{100} = \exp(-13.151 + 4.285 D)$	$R^2 = 0.81$, $SSE = 0.236$, $p < 0.01$	n=82
$\theta_{300} = \exp(-12.789 + 4.139 D)$	$R^2 = 0.86$, $SSE = 0.060$, $p < 0.01$	n=40
$\theta_{500} = \exp(-11.888 + 3.812 D)$	$R^2 = 0.83$, $SSE = 0.117$, $p < 0.0$	n=65
$\theta_{1500} = \exp(-15.006 + 4.825 D)$	$R^2 = 0.85$, $SSE = 0.143$, $p < 0.01$	n=165

θ درصد رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف، BD جرم ویژه ظاهری، D بعد فرکتال بافت خاک و SSE مجموع مربعات خطا است.

جدول ۳- توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) برای برآورد نقاط منحنی رطوبتی

تابع	R ²
$\theta_0 = 0.876 - 0.32 BD + 0.002 CI$	۰/۷۸
$\theta_{10} = 0.565 - 0.0202 dg - 0.132 BD + 0.002 CI - 0.001 Sa$	۰/۸۵
$\theta_{33} = 0.401 - 0.165 dg - 0.079 BD + 0.002 CI - 0.001 Sa$	۰/۸۶
$\theta_{50} = 0.352 - 0.150 dg - 0.069 BD + 0.003 CI - 0.001 Sa$	۰/۸۶
$\theta_{100} = 0.283 - 0.125 dg - 0.061 BD + 0.004 CI - 0.001 Sa$	۰/۸۶
$\theta_{300} = 0.207 - 0.110 dg - 0.058 BD + 0.005 CI$	۰/۸۵
$\theta_{500} = 0.188 - 0.089 dg - 0.058 BD + 0.005 CI$	۰/۸۵
$\theta_{1000} = 0.172 - 0.072 dg - 0.054 BD + 0.005 CI$	۰/۸۳
$\theta_{1500} = 0.170 - 0.072 dg - 0.052 BD + 0.004 CI$	۰/۷۹

θ درصد رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف، dg میانگین هندسی قطر ذرات خاک، BD جرم ویژه ظاهری، CI و Sa به ترتیب درصد‌های رس و شن خاک است.

توابع معنی‌دار نبود ($p > 0.05$). توابع پیشنهادی پیش‌بینی رطوبت حجمی در هشت مکش خاک (نقاط منحنی رطوبتی) در جدول ۲ و توابع خطی قنبریان-میلان (۴) در برآورد همین نقاط رطوبتی در جدول ۳ داده شده است.

یکی از مشخصات توابع قنبریان-میلان (۴) فرض خطی بودن روابط متغیرهای مستقل با رطوبت است که همیشه درست نیست ولی مشخصه دیگر آن‌ها علامت صحیح متغیر در رابطه‌ها است. ما در جای دیگر نشان داده‌ایم که θ با رس رابطه‌ی مثبت و خطی، با dg رابطه‌ی منفی و غیر خطی و با جرم ویژه ظاهری نیز رابطه‌ی منفی دارد.

جدول ۴ نتایج آماره‌های صحت و اعتبارسنجی توابع استخراج شده را نشان می‌دهد. مقدار R^2 داده‌های اعتبارسنجی گاهی از R^2 اولیه هم بزرگ‌تر است و تنها در θ_{50} مقدار R^2 اعتبارسنجی حدود ۰/۰۵ از R^2 اولیه کمتر است. در داده‌های اولیه مقدار ضریب تعیین (R^2) از ۰/۷۱ در رطوبت ظرفیت مزرعه تا ۰/۸۶ در θ_{300} متغیر است. در آزمون اعتبارسنجی کمترین R^2 نیز در رطوبت ظرفیت مزرعه ($R^2 = 0.74$) و بیشترین R^2 در θ_{300} ($R^2 = 0.92$) مربوط بود. مقادیر R^2 توابع پیشنهادی به غیر از θ_{33} در سایر مکش‌ها با مقادیر R^2 توابع قنبریان-میلان (۴) برابری می‌کند و گاهی از آن‌ها بهتر است. به خصوص در رطوبت اشباع و θ_{1500} مقدار R^2 در توابع پیشنهادی از تابع قنبریان-میلان (جدول ۳) بهتر است.

به نظر می‌رسد با افزایش مکش و کاهش رطوبت رابطه بین بعد فرکتال با رطوبت قوی‌تر می‌شود (شکل ۲). در مکش‌های کم رطوبت خاک بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های ساختمانی (جرم ویژه ظاهری یا تخلخل) و در مکش‌های زیاد تحت تأثیر ویژگی‌های بافتی خاک (رس، بعد فرکتال) است.

از آنجائی که بعد فرکتال بافت بیشتر تحت تأثیر درصد رس خاک است (۳ و ۶) طبیعی است که توابع توسعه داده شده بر مبنای بعد فرکتال در مکش‌های زیاد کارایی بیشتری داشته باشند تا در مکش‌های پائین. طبق نظر توماسلا و همکاران (۱۲) و قنبریان و میلان (۴) ساختمان بیشتر در رطوبت نزدیک اشباع و بافت (به ویژه رس) خاک در رطوبت‌های کم تأثیرگذارتر هستند.

دقت و توانایی توابع $\theta = \exp(b_0 + b_1 D)$ در برآورد رطوبت حجمی سنجیده شدند. توابع پیش‌بینی θ_0 ، θ_{10} و θ_{33} در مقایسه با توابع پنج-گانه‌ی دیگر کارایی ضعیف‌تری داشتند. از این رو، توابعی به شکل $\theta = \exp(b_0 + b_1 D + b_2 BD)$ که در آن BD جرم ویژه ظاهری خاک است به داده‌ها برازش داده شد. این توابع برخلاف توابع قبلی فقط در پیش‌بینی θ_0 ، θ_{10} و θ_{33} موفق‌تر بودند. به عبارت دیگر، توابع اخیر توانستند صحت و دقت پیش‌بینی را به صورت چشمگیری در پیش‌بینی θ_0 ، θ_{10} و θ_{33} افزایش دهند ولی نتوانستند کارایی توابع پیش‌بینی θ_{50} ، θ_{100} ، θ_{300} ، θ_{500} و θ_{1500} را افزایش دهند. علاوه بر این، ضریب BD در سه تابع θ_0 ، θ_{10} و θ_{33} معنی‌دار ($p < 0.05$) و در بقیه‌ی

جدول ۴ - نتایج آماره‌های توابع پیشنهادی برای برآورد رطوبت خاک در مکش‌های مختلف بر اساس داده‌های اولیه و داده‌های اعتبارسنجی

داده‌های اعتبارسنجی			داده‌های اولیه			نقطه‌ی رطوبتی
RMSE(cm ³ cm ⁻³)	ME (cm ³ cm ⁻³)	R ²	RMSE(cm ³ cm ⁻³)	ME (cm ³ cm ⁻³)	R ²	
۰/۰۳۷	۰/۰۰۰	۰/۸۴	۰/۰۳۶	۰/۰۰۰	۰/۸۱	θ ₀
۰/۰۶۲	۰/۰۰۷	۰/۸۰	۰/۰۵۵	۰/۰۰۱	۰/۸۲	θ ₁₀
۰/۰۶۲	۰/۰۰۶	۰/۷۴	۰/۰۶۲	۰/۰۰۱	۰/۷۱	θ ₃₃
۰/۰۵۷	۰/۰۰۷	۰/۸۰	۰/۰۴۵	۰/۰۰۰	۰/۸۵	θ ₅₀
۰/۰۵۶	۰/۰۰۴	۰/۷۸	۰/۰۵۲	۰/۰۰۱	۰/۸۱	θ ₁₀₀
۰/۰۳۱	-۰/۰۰۲	۰/۹۲	۰/۰۴۵	۰/۰۰۰	۰/۸۶	θ ₃₀₀
۰/۰۳۵	۰/۰۰۶	۰/۹۱	۰/۰۴۲	۰/۰۰۲	۰/۸۳	θ ₅₀₀
۰/۰۲۶	۰/۰۰۴	۰/۸۵	۰/۰۲۸	۰/۰۰۰	۰/۸۵	θ ₁₅₀₀

۳۳ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال بین ۰/۴ تا ۱/۲ درصد نسبت به نظیر داده‌های اولیه بیشتر است. در مجموع تفاوت پیش‌بینی‌های داده‌های اعتبارسنجی با داده‌های اولیه قابل چشم‌پوشی است.

در شکل ۳، مقادیر اندازه‌گیری‌شده رطوبت داده‌های اولیه در مکش‌های مختلف با تخمین آن‌ها توسط توابع انتقالی استخراج شده و توابع قنبریان-میلان (۴) مقایسه شده است. در همه مکش‌ها توابع پیشنهادی تخمین قابل قبولی در مقایسه با توابع قنبریان-میلان (۴) نشان می‌دهند. در مکش‌های کم، رطوبت بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های ساختی خاک است (۱۲) و از آنجائی که بعد فرکتال بافت خاک بیشتر متأثر از ذرات رس خاک است، لذا کارائی توابع پیشنهادی در برآورد رطوبت اشباع در مقایسه با سایر نقاط منحنی رطوبتی پایین‌تر است. جدول ۵ مقادیر عرض از مبدأ و شیب خطوط رگرسیونی بین مقادیر اندازه‌گیری شده در داده‌های اولیه با برآورد رطوبت توسط توابع پیشنهادی و توابع قنبریان و میلان (۴) را نشان می‌دهد.

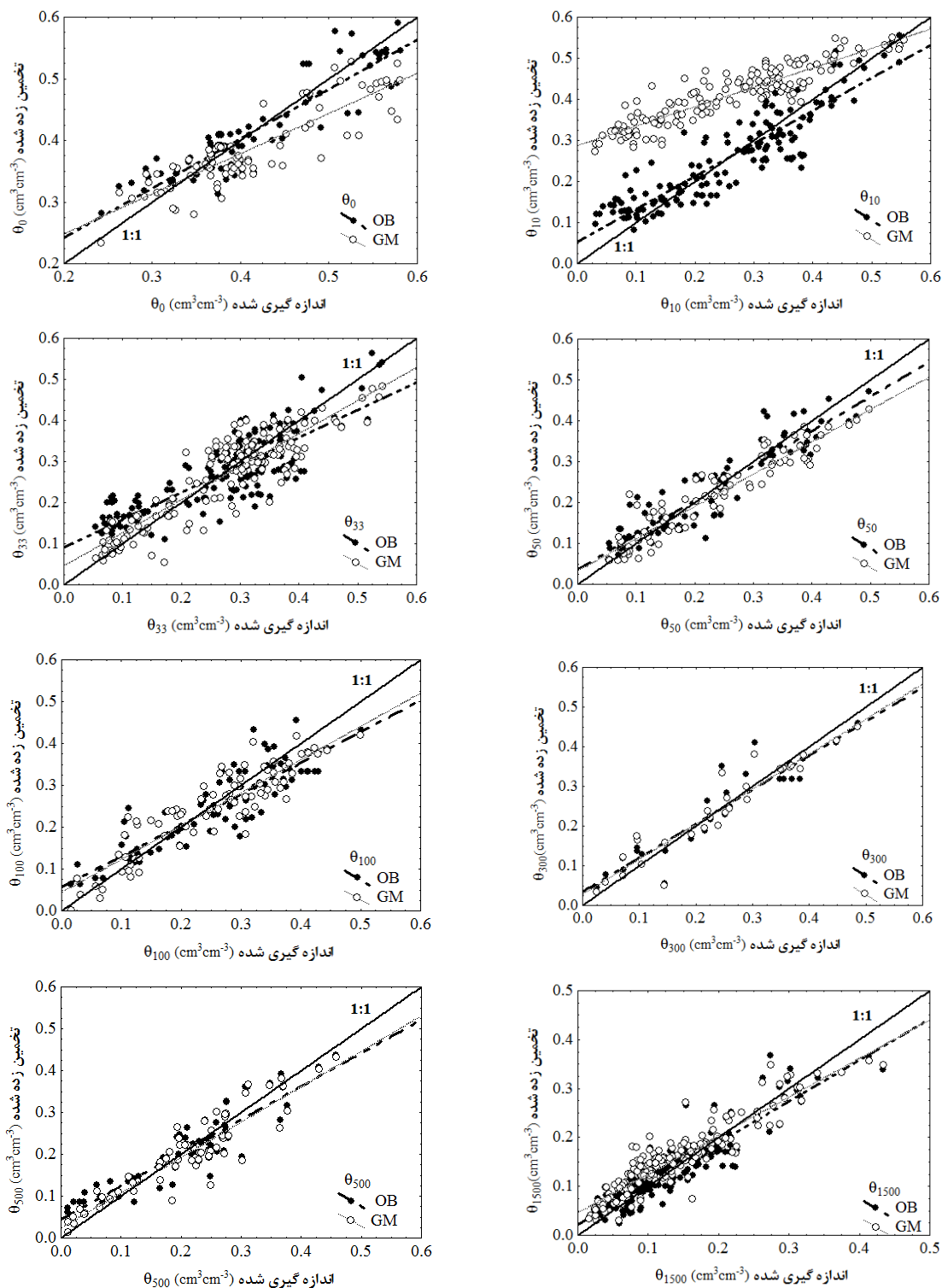
آماره ME نشان‌دهنده وجود اریبی است (۱۰). مقادیر مثبت آن تخمین بیش از مقدار واقعی و مقادیر منفی آن تخمین کمتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد. هراندازه آماره ME به صفر نزدیک‌تر باشد پیش‌بینی از اریبی کمتری برخوردار است (۱۰). به نظر می‌رسد ME داده‌های اعتبارسنجی اندکی بزرگ‌تر از ME داده‌های اولیه است، ولی در مجموع بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی اندک بوده و قابل چشم‌پوشی است.

مقدار RMSE در حالت بهینه یا حالتی که مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند صفر است. هراندازه مقدار RMSE کوچکتر باشد تخمین از صحت بیشتری برخوردار است. خطای RMSE توابع با داده‌های اولیه بین ۲/۸ تا ۶/۲ درصد و با داده‌های اعتبارسنجی بین ۲/۶ تا ۷/۱ درصد متغیر است. در آزمون اعتبارسنجی نیز همانند داده‌های اولیه، کمترین مقدار ریشه‌ی میانگین خطا (RMSE=۰/۰۲۶) در θ₁₅₀₀ و بیشترین آن (RMSE= ۰/۰۶۲) در θ₃₃ دیده شد. خطای برآورد با داده‌های اعتبارسنجی در مکش‌های

جدول ۵- مقادیر عرض از مبدأ و شیب خطوط رگرسیونی مقادیر اندازه‌گیری شده- برآورد شده رطوبت در داده‌های اولیه در مکش‌های مختلف توابع پیشنهادی و قنبریان- میلان (۲۰۱۰)

نقطه‌ی رطوبتی	عرض از مبدأ		شیب	
	قنبریان- میلان	پیشنهادی	قنبریان- میلان	پیشنهادی
θ ₀	۰/۱۱۸°	۰/۰۸۲°	۰/۶۵۳°	۰/۸۰۳°
θ ₁₀	۰/۲۷۸°	۰/۰۵۰°	۰/۴۸۶°	۰/۸۰۵°
θ ₃₃	۰/۰۴۸°	۰/۰۹۲°	۰/۸۵۶°	۰/۶۸۴°
θ ₅₀	۰/۰۳۴°	۰/۰۳۶°	۰/۷۹۰°	۰/۸۴۶°
θ ₁₀₀	۰/۰۴۵°	۰/۰۵۶°	۰/۷۹۴°	۰/۷۶۴°
θ ₃₀₀	۰/۰۲۹ ^{ns}	۰/۰۳۴ ^{ns}	۰/۸۸۳°	۰/۸۷۸°
θ ₅₀₀	۰/۰۲۵°	۰/۰۴۴°	۰/۸۴۵°	۰/۷۹۵°
θ ₁₅₀₀	۰/۰۵۹°	۰/۰۲۷°	۰/۷۲۵°	۰/۸۱۶°

*- تفاوت معنی‌دار عرض از مبدأ را نسبت به صفر و شیب را نسبت به ۱ نشان می‌دهد. ns عدم تفاوت معنی‌دار عرض از مبدأ با صفر و شیب با ۱ را نشان می‌دهد.



شکل ۳ - مقایسه برآورد رطوبت در مکش‌های مختلف توسط دو گروه توابع انتقالی با مقادیر اندازه‌گیری شده برای داده‌های اولیه. خط ممتد خط ۱:۱ است. OB توابع پیشنهادی و GM توابع فبیریان - میلان (۲۰۱۰) است.

جدول ۶ - آماره‌های ارزیابی جهت مقایسه صحت توابع استخراج شده و مدل قنبریان- میلان (۲۰۱۰)

آماره‌های خطا	تابع	θ_0	θ_{10}	θ_{33}	θ_{50}	θ_{100}	θ_{300}	θ_{500}	θ_{1500}
RMSE	پیشنهادی	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳
($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	قنبریان-میلان	۰/۰۵	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴
ME	پیشنهادی	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰
($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	قنبریان-میلان	۰/۰۰۳	۰/۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸
GMER	پیشنهادی	۱/۰۰	۱/۰۷	۱/۰۷	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۵	۱/۰۳	۱/۰۰
	قنبریان-میلان	۰/۹۴	۱/۸۷	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۶	۱/۰۴	۱/۰۳	۱/۲۲
AIC	پیشنهادی	-۵۵۶	-۸۷۳	-۸۸۰	-۵۱۶	-۴۷۶	-۱۷۵	-۴۰۷	-۱۱۵۶
	قنبریان-میلان	-۴۹۲	-۵۲۸	-۹۴۰	-۵۱۶	-۴۸۷	-۱۷۹	-۳۳۱	-۱۰۹۰

توابع انتقالی استخراج شده در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی در مقایسه با توابع قنبریان-میلان نشان می‌دهد. پراکنندگی نقاط حول خط ۱:۱ در همه مکش‌ها در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی (شکل ۴) شبیه به پراکنندگی نقاط حول خط ۱:۱ در مجموعه داده‌های اولیه (شکل ۳) است. جدول ۷ مقادیر عرض از مبدأ و شیب خطوط رگرسیونی شکل ۴ را خلاصه کرده است. در رطوبت اشباع داده‌های اعتبارسنجی، برخلاف داده‌های اولیه، تابع قنبریان-میلان (۴) نسبت به تابع پیشنهادی عرض از مبدأ کمتر و شیب بیشتری دارد.

در داده‌های اعتبارسنجی عرض از مبدأ و شیب تابع پیشنهادی در θ_{10} از قنبریان-میلان (۴) کمتر است در حالی که در داده‌های اولیه مقدار شیب در تابع پیشنهادی بیشتر از قنبریان-میلان (۴) بوده است. در مکش‌های بیشتر از ۳۰۰ کیلوپاسکال در داده‌های اعتبارسنجی مقادیر عرض از مبدأ توابع پیشنهادی کمتر و مقادیر شیب آن‌ها بیشتر از توابع قنبریان-میلان (۴) بود که کارایی بهتر توابع انتقالی را نشان می‌دهد (شکل ۴، جدول ۷).

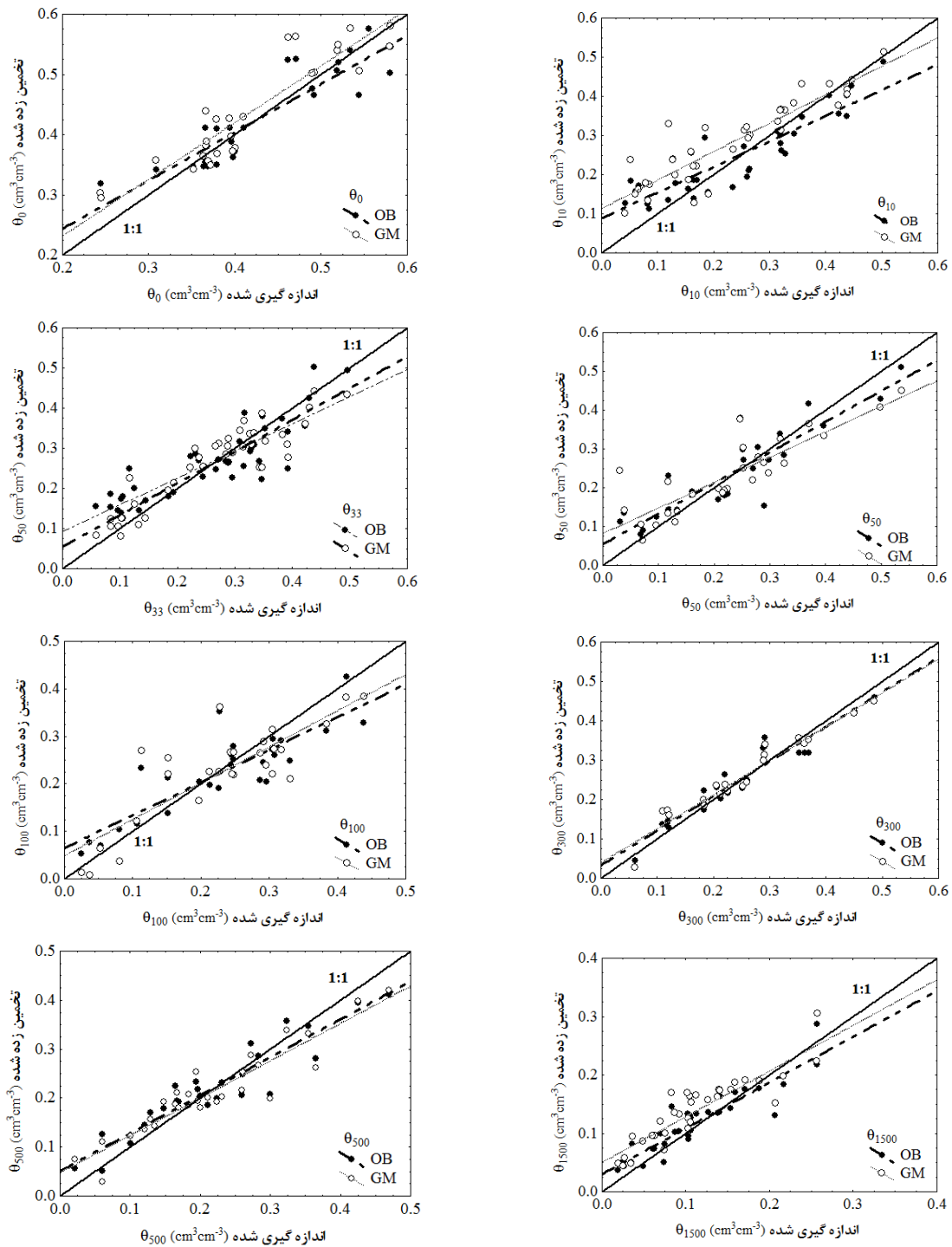
جدول ۸ آماره‌های ارزیابی توابع استخراج شده و مقایسه آن‌ها با توابع قنبریان‌علویجه و میلان (۴) در برآورد رطوبت در داده‌های اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی مقدار RMSE توابع پیشنهادی به جز در θ_{33} در سایر مکش‌ها از توابع قنبریان-میلان (۴) برابر و یا کمتر است. بر اساس آماره‌ها در رطوبت‌های اشباع، θ_{10} ، θ_{300} و θ_{1500} برتری توابع پیشنهادی واضح است. مقدار ME کمتر، GMER نزدیک به ۱ و شاخص AIC کمتر نشان از برتری توابع پیشنهادی بر توابع قنبریان-میلان دارد (جدول ۸). در نقاط θ_{50} و θ_{100} عموماً آماره‌های توابع پیشنهادی با آماره‌های توابع قنبریان-میلان (۴) برابری می‌کند یا برتری نشان می‌دهند (جدول ۸). تنها در θ_{33} تابع قنبریان-میلان اندکی نسبت به تابع پیشنهادی برتری دارد (جدول ۸). چنانچه مشخص است آماره‌های ارزیابی داده‌های اعتبارسنجی نتایج داده‌های اولیه را تأیید می‌نماید. در هر دو مجموعه داده‌ها اولیه و اعتبارسنجی توابع پیشنهادی به جز در θ_{33} در سایر مکش‌ها از توابع قنبریان-میلان (۴) کارایی بهتر و دقیق‌تری در برآورد رطوبت دارند.

در مکش‌های صفر و ۱۰ کیلوپاسکال مقادیر بزرگ‌تر عرض از مبدأ و کمتر شیب، دقت کمتر دو تابع قنبریان-میلان را در برآورد این دو نقطه نسبت به توابع پیشنهادی نشان می‌دهد (جدول ۵). شکل ۳ نیز بیش‌برآوردی زیاد دو تابع قنبریان-میلان (۴) را در مکش‌های صفر و بخصوص در مکش ۱۰ نشان می‌دهد. در رطوبت ظرفیت مزرعه (θ_{33} کیلوپاسکال) تابع قنبریان-میلان برآورد بهتری نسبت به تابع پیشنهادی دارد که از عرض از مبدأ نزدیک‌تر به صفر و شیب نزدیک‌تر به ۱ آن استنباط می‌شود. به طور کلی، در سایر مکش‌ها توابع پیشنهادی نسبت به توابع قنبریان-میلان یا قابل مقایسه هستند یا کارایی بهتری در برآورد رطوبت دارند.

در جدول ۶ آماره‌های خطا جهت مقایسه صحت توابع پیشنهادی و توابع قنبریان-میلان در برآورد رطوبت نشان داده شده است. بر اساس RMSE و ME همه توابع پیشنهادی بهتر از توابع قنبریان-میلان (۴) عمل می‌کنند. مقدار آماره GMER برابر ۱ نشان‌دهنده تطابق دقیق مقدار پیش-بینی شده و مشاهده شده می‌باشد. مقدار GMER کمتر از یک دلالت بر کم‌برآوردی و GMER بیشتر از ۱ دلالت بر بیش‌برآوردی مدل دارد (۲). بر اساس GMER توابع پیشنهادی کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی ناچیزی داشته و نسبت به توابع قنبریان-میلان کارایی بهتر دارند.

به طور کلی بر اساس همه آماره‌ها برتری توابع پیشنهادی در برآورد θ_0 ، θ_{10} ، θ_{500} و θ_{1500} واضح است. در نقاط θ_{50} و θ_{300} عموماً آماره‌های توابع پیشنهادی با آماره‌های توابع قنبریان-میلان (۴) برابری می‌کند یا برتری نشان می‌دهد (جدول ۶). در θ_{33} مقدار RMSE در تابع پیشنهادی (RMSE=۰/۰۶) به مقدار ناچیزی از تابع قنبریان-میلان (RMSE=۰/۰۵) بیشتر است. در این رطوبت تابع پیشنهادی دارای بیش‌برآوردی ناچیز و تابع قنبریان-میلان دارای کم‌برآوردی است (جدول ۶، شکل ۳). ولی در مجموع تابع قنبریان-میلان (۴) ممکن است اندکی بر تابع پیشنهادی برتری داشته باشد، اگرچه به نظر نمی‌رسد این برتری محسوس باشد (جدول ۶).

شکل ۴ مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رطوبت را با استفاده از



شکل ۴- مقایسه برآورد رطوبت در مکش‌های مختلف توسط دو گروه توابع انتقالی با مقادیر اندازه‌گیری شده برای داده‌های اعتبارسنجی. خط ممتد خط ۱:۱ است. OB تابع پیشنهادی و GM تابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) است.

جدول ۷ - مقادیر عرض از مبدأ و شیب خطوط رگرسیونی در داده‌های اعتبارسنجی (n=۳۰) بین مقادیر اندازه‌گیری شده با برآورد شده رطوبت در مکش‌های مختلف توسط توابع انتقالی پیشنهادی و توابع قنبریان-میلان (۴)

شیب	عرض از مبدأ		نقطه‌ی رطوبتی	
	قنبریان-میلان	پیشنهادی		
پیشنهادی	قنبریان-میلان	پیشنهادی	قنبریان-میلان	
۰/۸۰۲°	۰/۹۴۳°	۰/۰۸۳°	۰/۰۴۳ ^{NS}	θ ₀
۰/۶۵۴°	۰/۷۲۷°	۰/۰۸۹°	۰/۱۱۴°	θ ₁₀
۰/۶۷۳°	۰/۷۸۹°	۰/۰۹۱°	۰/۰۵۵°	θ ₃₃
۰/۷۹۰°	۰/۶۵۵°	۰/۰۵۴°	۰/۰۸۳*	θ ₅₀
۰/۶۸۸°	۰/۷۶۴°	۰/۰۶۵°	۰/۰۴۹ ^{NS}	θ ₁₀₀
۰/۸۸۱°	۰/۸۶۳°	۰/۰۳۳ ^{NS}	۰/۰۴۱°	θ ₃₀₀
۰/۷۷۶°	۰/۷۶۳°	۰/۰۵۰°	۰/۰۴۸°	θ ₅₀₀
۰/۷۸۴°	۰/۷۸۳°	۰/۰۳۱°	۰/۰۵۱°	θ ₁₅₀₀

*- تفاوت معنی‌دار عرض از مبدأ را نسبت به صفر و شیب را نسبت به ۱ نشان می‌دهد. NS عدم تفاوت معنی‌دار عرض از مبدأ با صفر و شیب با ۱ را نشان می‌دهد.

جدول ۸- آماره‌های ارزیابی توابع استخراج شده و توابع قنبریان-میلان (۴) در داده‌های اعتبارسنجی (n=۳۰)

آماره‌ی خطا	تابع	θ ₀	θ ₁₀	θ ₃₃	θ ₅₀	θ ₁₀₀	θ ₃₀₀	θ ₅₀₀	θ ₁₅₀₀
RMSE (cm ³ cm ⁻³)	پیشنهادی	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳
	قنبریان-میلان	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴
ME (cm ³ cm ⁻³)	پیشنهادی	۰/۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	-۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳
	قنبریان-میلان	۰/۰۱۹	۰/۰۵۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۴	-۰/۰۰۵	-۰/۰۴۱	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۳
GMER	پیشنهادی	۱/۰۱	۱/۱۶	۱/۱۰	۱/۱۲	۱/۰۵	۱/۰۲	۱/۰۸	۱/۱۳
	قنبریان-میلان	۱/۰۴	۱/۳۶	۱/۰۳	۱/۱۳	۰/۹۲	۱/۰۲	۱/۰۴	۱/۱۶
AIC	پیشنهادی	-۱۷۸	-۱۸۸	-۲۲۰	-۱۵۰	-۱۵۱	-۱۳۳	-۱۷۸	-۲۴۳
	قنبریان-میلان	-۱۷۲	-۱۷۱	-۲۳۶	-۱۳۸	-۱۴۱	-۱۳۳	-۱۷۲	-۲۱۴

نتیجه‌گیری

فرکتال و جرم ویژه را با علامت صحیح، به ترتیب مثبت و منفی، در بر دارند. توابع پیشنهادی ما در مقایسه با توابع قنبریان-میلان (۴) در برآورد رطوبت، به جز نقطه‌ی ۳۳ کیلوپاسکال، صحت و دقت بیشتری داشت. باید در نظر داشت که در تمامی توابع قنبریان-میلان (۴) در برآورد نقاط از جرم ویژه ظاهری به عنوان متغیر مستقل استفاده شده است که سادگی اندازه‌گیری آن یا موجودیت داده‌های آن جای بحث دارد. در صورتی که توابع پیشنهادی از جرم ویژه ظاهری تنها در تخمین رطوبت در نقاط صفر، ۱۰ و ۳۳ کیلوپاسکال استفاده می‌کند. پیشنهاد می‌شود که توابع پیشنهادی با داده‌های دیگر ارزیابی شوند.

توابعی به شکل نمایی برای برآورد رطوبت حجمی در نقاط مختلف منحنی رطوبتی ارائه شد. در این توابع اساساً از برآورد بعد فرکتال خاک استفاده شده است که با استفاده از اجزای سه‌گانه‌ی بافت محاسبه شده بودند. در نقاط ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال برآورد این توابع بسیار خوب بود. برای افزایش دقت برآورد در سه نقطه‌ی صفر، ۱۰ و ۳۳ کیلوپاسکال از جرم ویژه ظاهری نیز استفاده شد. توابع پیشنهادی ما شکل ساده‌تری دارند و برآورد معقولی از رطوبت ارائه می‌کنند، ضمن آن که هر یک از دو متغیر مستقل بعد

منابع

- ۱- علیزاده ا. ۱۳۸۳. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ص ۴۸.
- 2- Abbasi Y., Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A. M. and 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.
- 3- Ghanbarian-Alavijeh B. and Millán H. 2009. The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point. *Geoderma* 151:224-23.
- 4- Ghanbarian-Alavijeh B. and Millán H. 2010. Point pedotransfer functions for estimating soil water retention curve.

- Int. Agrophys. 24, 243-251.
- 5- Hodnett M.G. and Tomasella J. 2002. Marked differences between van Genuchten soil water retention parameters for temperate and tropical soils: a new water retention pedotransfer function developed for tropical soils. *Geoderma* 108:155-180.
 - 6- Huang G. and Zhang R. 2005. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma* 127:52-61.
 - 7- Kravchenko A. and Zhang R. 1998. Estimating the soil water retention from particle-size distributions: A fractal approach. *Soil Sci.* 163:171-179.
 - 8- Lal R. 1978. Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. *Geoderma* 21:209-22.
 - 9- Pachepsky Y. and Rawls W.J. (Editors). 2004. *Developments in Soil Science. Volume 30: Development of pedotransfer functions in soil hydrology.* Elsevier Science.
 - 10- Schaap M.G. 2004. Accuracy and uncertainty in PTF predictions. Chapter 3 In: Pachepsky Y and Rawls W.J (Editors). *Developments in Soil Science. Volume 30. Development of pedotransfer functions in soil hydrology.* Elsevier Science. Pp: 33-46.
 - 11- Sepaskhah A.R. and Tafteh A. 2013. Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution. *Archives of Agronomy and Soil Science* 59(1): 93-103.
 - 12- Tomasella J., Pachepsky Y.A., Crestana S. and Rawls W.J. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 67: 1085-1092.



Pedotransfer Functions for Estimating Soil Volumetric Moisture Content Based on Soil Fractal Dimension

Y. Ostovari^{1*} -H. Beigi Harchegani²

Received:27-01-2013

Accepted:09-06-2013

Abstract

Estimation of soil moisture content at different soil suctions is preferred to its determination due to required cost and time. The aim of the present work was to explore the relationship between soil texture fractal dimension and soil volumetric water content. A dataset of 195 soil samples from UNSODA database was selected. A pedotransfer developed by Sepaskhah & Tafteh (2013) was used to estimate soil fractal dimension. Exponential functions better describe the fractal-water content relationship than linear functions. A set of exponential pedotransfer functions using texture fractal dimension or additionally soil bulk density is proposed for predicting water content at several suctions across soil water retention curve. These pedotransfer functions, generally, function well or better than the most recent pedotransfer functions proposed by Ghanbarian-Millan (2010).

Keywords: Fractal dimension, Soil texture, Pedotransfer functions, Water content estimation, Exponential relationship, UNSODA

1,2- PhD Student and Assistant Professor, Department of Soil Science, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran
(*-Corresponding Author Email: Yaser.ostovary@gmail.com)