

برآورد پارامترهای مدل منحنی رطوبتی فردلاند و ژیانگ با استفاده از یک نقطه اندازه‌گیری شده

علی اصغر ذوالفقاری^{1*}، مهدی شرفاء، محمدحسین محمدی و حسن عباسپور

دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران؛ azolfaghari@ut.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران؛ mshorafa@ut.ac.ir

استادیار گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه زنجان؛ mohammadi@znu.ac.ir

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه تهران؛ abaspour_hassan@yahoo.com

چکیده

آگاهی کمی از خصوصیات هیدرولیکی خاک مانند منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک در شبیه‌سازی جریان و پدیده‌های انتقال در کشاورزی و هیدرولوژی ضروری می‌باشد. روش‌های مستقیم زیادی برای اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی خاک وجود دارند. اما متأسفانه بیشتر روش‌های موجود وقت گیر و پرهزینه می‌باشند. چاین و همکاران روش تک پارامتری را برای تخمین پارامترهای منحنی رطوبتی فردلاند و ژیانگ با استفاده از آنالیز رگرسیونی بدست آوردند. این روش برای برآورد پارامترهای معادله منحنی رطوبتی به یک نقطه اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی (نقطه پایه‌ای) نیاز دارد. تحقیق حاضر به منظور بررسی کارایی روش مذکور در پیش‌بینی منحنی رطوبتی خاک و آب قابل استفاده گیاه صورت گرفت. 45 خاک از بانک داده UNSODA و 42 خاک، از خاک‌های مورد مطالعه در کشور با خصوصیات هیدرولیکی متفاوت انتخاب شد. کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) روش مذکور در برآورد رطوبت در مکش‌های مختلف در خاک‌های UNSODA و ایران زمانی بود که مکش 33 کیلوپاسکال به عنوان نقطه پایه منحنی رطوبتی مورد استفاده قرار گرفت. ضریب تبیین بالا ($R^2 = 0/96$) و RMSE پایین ($RMSE = 0/026$) بین رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده در خاک‌های ایران نشان داد که روش به خوبی قادر به پیش‌بینی منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. خطای پایین ($RMSE = 0/038$) و همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r = 0/732^{**}$) بین رطوبت قابل استفاده پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده نشان داد که روش فوق‌الذکر علاوه بر منحنی رطوبتی به خوبی قادر به پیش‌بینی رطوبت قابل استفاده گیاه در تمام خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد. مقایسه نتایج نشان داد که روش تک پارامتری مذکور نسبت به برخی از توابع انتقالی ارائه شده در کشور دارای کارایی بالاتری در برآورد منحنی رطوبتی خاک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب قابل استفاده، مدل منحنی رطوبتی فردلاند و ژیانگ، نقطه مشخص منحنی رطوبتی، مدل تک پارامتری

منحنی رطوبتی

مقدمه

سازگی جریان آب و املاح و پیش‌بینی انتقال جرم در خاک ضروری می‌باشد. هرچند روش‌های مستقیم زیادی

آگاهی کمی از خصوصیات هیدرولیکی خاک مانند منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک در شبیه

¹ نویسنده مسئول، آدرس: البرز، کرج، خیابان دانشکده، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی علوم خاک

* دریافت: مهر 1391 و پذیرش: آبان 1391

همبستگی خوبی را بین رطوبت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان می‌دهند. آن‌ها رطوبت قابل استفاده (AW^3) را نیز با استفاده از توابع انتقالی مختلف تعیین کردند و اظهار داشتند که تابع تبدیلی کمبل (1985) بهترین تابع در تعیین رطوبت قابل استفاده می‌باشد. قنبریان علویچه و لیاقت (2009) با مقایسه توابع انتقالی مختلف در 72 خاک جمع‌آوری شده از سه بانک داده، نشان دادند که تابع تبدیلی سکستن و همکاران (1986) نسبت به توابع دیگر از قبیل راولز و براکنسیک (1989) و کمبل (1985) برآورد دقیق‌تری از منحنی رطوبتی را نشان می‌دهند. خداوردیلو و همکاران (2011) توابع انتقالی پارامتری استوار بر معادله ون گنوختن را در خاک‌های آهکی اطراف کرج مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها متوسط ریشه میانگین مربعات خطای ($RMSE^4$) برابر با 0/107 را بین رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مکش‌های مختلف بدست آوردند. آن‌ها همچنین ذکر نمودند که توابع انتقالی پارامتری دقت مناسبی در برآورد رطوبت قابل استفاده خاک‌ها ندارد.

به طور کلی توابع انتقالی به دلیل ماهیت کاملاً تجربی آن‌ها غالباً در خاک‌هایی کارایی دارند که با استفاده از ویژگی‌های آن‌ها مشتق شده‌اند و در صورت تغییر خصوصیات زمانی و مکانی خاک‌ها قابل استفاده نبوده و یا کارایی کمی خواهند داشت.

در چند دهه گذشته معادلات زیادی برای توصیف منحنی رطوبتی خاک پیشنهاد شده است. معروفترین معادلات منحنی رطوبتی، معادلات بروکز و کوری (1964)، ون گنوختن (1980) و فردلاند و ژیانگ (1994) هستند. معادله فردلاند و ژیانگ (1994) به صورت زیر توصیف می‌شود:

(1)

$$\theta_w = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \frac{\theta_s}{\left\{ \ln\left[e^1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n \right] \right\}^m}$$

θ_w رطوبت خاک ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)، ψ مکش ماتریک خاک (kPa)، e عدد نپر (برابر 2/718)، ψ_r مکش ماتریک متناظر با رطوبت باقی مانده (kPa) و a ، n ، m پارامترهای حاصل از برازش می‌باشند. لئونگ و رهااردجو (1997)، نیم و همکاران (2009) و فردلاند و همکاران (2011) نشان دادند که مدل منحنی رطوبتی

برای اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی خاک وجود دارند (دن و تاپ 2002)، اما بیشتر آن‌ها وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشند (عباسی و همکاران 2011). بعلاوه بعلت تغییرپذیری مکانی و زمانی بالای این خصوصیات، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق این خصوصیات در شرایط مزرعه نیاز است (خداوردیلو و همکاران 2011). به همین دلیل روش‌های غیر مستقیم تخمین منحنی رطوبتی بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی روش‌های برآورد غیر مستقیم منحنی رطوبتی را می‌توان به چهار دسته زیر تقسیم بندی نمود (جوهری و همکاران 2006):

1- روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های رگرسیونی و آماری برای تعیین رطوبت در یک مکش مشخص مانند روش های گوپتا و لارسن (1979) و ساکستن و همکاران (1986).

2- تعیین پارامترهای معادلات منحنی رطوبتی با توجه به برخی از خصوصیات زود یافت خاک با استفاده از آنالیز رگرسیونی مانند روش های زاپتا (1999) و پورا (2003).

3- تخمین منحنی رطوبتی با استفاده از مدل مفهومی- فیزیکی مانند روش‌های آریا و پاریس (1981)، محمدی و ونکلاستر (2011).

4- روش‌های هوش مصنوعی از قبیل شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک مانند روش‌های پاجچسکی و همکاران (1996)، جوهری و همکاران (2006)

به طور کلی روش‌های 1 و 2 به ترتیب جزء توابع انتقالی نقطه‌ای¹ و پارامتری² طبقه‌بندی می‌شوند. مطالعات زیادی در زمینه تخمین نقطه‌ای و پارامتری منحنی رطوبتی خاک در ایران و دنیا صورت گرفته است. فولادمند (2011) توابع انتقالی نقطه‌ای را برای تخمین نقاط مختلف منحنی رطوبتی خاک‌های استان فارس مورد استفاده قرار داد. این محقق به ترتیب همبستگی‌های 0/76، 0/608، 0/606، 0/58، 0/64، 0/64، 0/64، 0/63، 0/62 و 0/61 را برای رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مکش‌های 3، 6، 9، 12، 30، 100، 500، 1000 و 1500 کیلوپاسکال بدست آورد. عباسی و همکاران (2011) توابع انتقالی مختلف را در 68 خاک شور و شور و سدیمی جنوب تهران مورد آزمون قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که تمامی توابع به طور قابل توجهی رطوبت خاک را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. عباسی و همکاران (2011) همچنین نشان دادند که توابع انتقالی نقطه‌ای ارائه شده توسط قربانی دشتکی و همایی (2004)

3. Available Water

4. Root Mean Square Error

1. Point pedotransfer function

2. Parametric pedotransfer function

آن را در شرایط متفاوت از آن چیزی که معادلات رگرسیونی از آن مشتق شده‌اند را نیز امکان‌پذیر می‌سازد. چاین و همکاران (2010) با استفاده از روش مذکور معادلات 2 الی 5 را برای تعیین پارامترهای منحنی رطوبتی فردلاند و ژیانگ (1994) در خاک‌هایی که بیش از 30% جرمی ذرات آن کوچکتر از 75 میکرون هستند ($p_{200} \geq 30\%$)، بدست آوردند:

$$a = -2.4(x) + 722 \quad (2)$$

$$n = 0.07(x)^{0.4} \quad (3)$$

$$m = 0.015(x)^{0.7} \quad (4)$$

$$\psi_r = 914 \exp[-0.002(x)] \quad (5)$$

که a و ψ_r بر حسب کیلوپاسکال (kPa) و n و m پارامترهای بدون بُعد هستند. x یک متغیر تنظیم کننده می‌باشد. این متغیر سبب نزدیک شدن منحنی رطوبتی برآورد شده به یک نقطه اندازه‌گیری شده منحنی می‌شود. این محققین روش پیشنهادی خود را در 31 خاک مستخرج از بانک داده SoilVision (2002) مورد آزمون قرار دادند. آنها مقادیر 0/02 و 0/92 را به ترتیب برای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) بین رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده بدست آوردند.

در بسیاری از موارد، هدف از برآورد منحنی رطوبتی تخمین رطوبت قابل استفاده خاک است ولی به گزارش بسیاری از محققین، دقت توابع انتقالی موجود در برآورد رطوبت قابل استفاده کمتر از حالتی است که جهت برآورد رطوبت در یک مکش مشخص بکار می‌رود (عباسی و همکاران 2011، خداوردیلو و همکاران 2011). لذا بکارگیری تابعی گویا و دقیق در برآورد آب قابل استفاده و نیز مقایسه و ارزیابی تابع مذکور با سایر توابع موجود ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به سادگی و جدید بودن روش چاین و همکاران (2010) و دقت بالای مدل پایه (فردلاند و ژیانگ 1994) استفاده شده در آن و نیز تعداد کم متغیرهای ورودی مورد نیاز، لازم است دقت این مدل در تخمین رطوبت قابل استفاده، ارزیابی گردد. لذا هدف از این مطالعه بررسی کارایی روش چاین و همکاران (2010) در برآورد منحنی رطوبتی خاک و آب قابل استفاده گیاهان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

خاک‌های مورد مطالعه

در این مطالعه 87 خاک مشتمل بر طیف وسیعی از خصوصیات فیزیکی خاک که مقادیر p_{200} آنها بیشتر از 30% بود، مورد آزمون قرار گرفت (جداول 1، 2 و جدول

فردلاند و ژیانگ (1994) از دقت بالایی در توصیف منحنی رطوبتی خاک برخوردار است.

چاین و همکاران (2010) با استفاده از روش‌های رگرسیونی و یک نقطه مشخص از منحنی رطوبتی، پارامترهای معادله فردلاند و ژیانگ (1994) را بر آورد نمودند. این محققین ابتدا همبستگی بین خصوصیات خاک از قبیل D_{30} ، D_{10} ، درصد ذرات عبور یافته از الک 75 میکرون (200 مش، p_{200})، ضریب یکنواختی² (D_{60}/D_{10})، و نسبت پوکی (e_v) را با پارامترهای معادله منحنی رطوبتی، مورد آزمون قرار دادند. آنها همچنین همبستگی دیگر متغیرهای محتمل از قبیل $e_v \times p_{200}$ ، $e_v \times D_{60}$ ، $e_v \times D_{50}$ و غیره را نیز با پارامترهای معادله منحنی رطوبتی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به بالاتر بودن همبستگی بین پارامترهای معادله با حاصل ضرب $e_v \times p_{200}$ ، آنها پارامترهای معادله را به عنوان تابعی از $e_v \times p_{200}$ بدست آورده و معادلات رگرسیونی را برای تعیین پارامترهای معادله منحنی رطوبتی مشخص کردند. آنها به ترتیب ضرایب تبیین برابر با 0/06، 0/027، 0/14، و 0/012 را بین متغیر $e_v \times p_{200}$ و پارامترهای a ، n و m بدست آوردند. مقادیر کم ضرایب تبیین بین متغیر $e_v \times p_{200}$ و پارامترهای منحنی رطوبتی خاک نشان می‌دهد که استفاده از متغیر مذکور، در برآورد منحنی رطوبتی خاک با خطای زیادی همراه خواهد بود. این محققین به منظور کاهش خطای برآورد و نزدیکتر شدن منحنی اندازه‌گیری به برآورد شده، متغیر $e_v \times p_{200}$ را با متغیر دیگری به نام متغیر تنظیم کننده³ (x) جایگزین کردند. این متغیر جایگزین، قابلیت بهینه شدن داشته به طوری که با تغییر مقدار عددی آن در یک بازه معین، منحنی برآورد شده به یک نقطه اندازه‌گیری شده نزدیک شده و خطای برآوردها کاهش می‌یابد.

به منظور برآورد متغیر تنظیم کننده نیاز به یک نقطه اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. به عبارت دیگر مقدار بهینه متغیر تنظیم کننده متأثر از یک نقطه اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی خاک است. این وابستگی سبب می‌شود که دقت معادلات رگرسیونی که دارای متغیر تنظیم کننده می‌باشند، در برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک افزایش یابد. از طرف دیگر این متغیر سبب انعطاف روش مذکور شده و قابلیت استفاده از

¹ قطری از ذرات که 10 درصد ذرات قطری کمتر از آن را دارند

² Coefficient of uniformity

³ Adjustable variable

مذکور در برآورد منحنی رطوبتی خاک می‌تواند با خطای زیادی همراه باشد. بنابراین محققین مذکور به منظور کاهش خطای برآورد در روش ارائه شده، متغیر $e_v \times p_{200}$ را در معادلات رگرسیونی مربوطه با متغیری جایگزین نمودند که در یک بازه عددی مشخص (0 تا 350) قابلیت بهینه شدن داشت. آنها این متغیر را متغیر تنظیم کننده نامیدند. در تحقیق حاضر تعیین متغیر تنظیم کننده در برآورد منحنی رطوبتی به شرح زیر انجام شد.

الف) به منظور یافتن بهترین متغیر تنظیم کننده می‌بایست ابتدا یک نقطه مشخص از منحنی رطوبتی خاک (نقطه پایه‌ای) انتخاب شود. بدین منظور در این مطالعه، هر یک از مکش‌های 33، 500، 1000 و 1500 کیلو پاسکال به عنوان نقطه مشخص منحنی رطوبتی انتخاب و جهت یافتن بهترین متغیر تنظیم کننده مورد آزمون قرار گرفتند (نمودار 1).

ب) مطالعات چاین و همکاران (2010) نشان داد که بهترین مقدار x در بازه 0 تا 350 قرار دارد. بنابراین در هر یک از نقاط پایه‌ای، پارامترهای معادله منحنی رطوبتی خاک با استفاده از معادلات 2 تا 5، در مقادیر مختلف x (از صفر الی 350 با فواصل 0/1) بدست آمد و سپس با استفاده از معادله (1) مقدار رطوبت در نقطه پایه‌ای منحنی رطوبتی در هر مقدار x برآورد گردید (نمودار 1).

ج) در هر x ، قدر مطلق بین رطوبت اندازه‌گیری شده (θ_m) و برآورد شده (θ_p) در نقطه پایه محاسبه گردید بدیهی است بهترین مقدار x زمانی است که اختلاف بین رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده به کمترین مقدار خود می‌رسد که در مطالعه حاضر این مقدار کمتر از 0/1 درصد رطوبت در نظر گرفته شد. (معادله 6).

$$\left| \theta_p - \theta_m \right| \leq 0.1\% \quad (6)$$

د) در انتها با استفاده از بهترین مقدار محاسبه شده x ، پارامترهای معادله منحنی رطوبتی تعیین و مقادیر رطوبت در مکش‌های مختلف (منحنی رطوبتی) مشخص گردید (نمودار 1).

از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تعیین بهترین نقطه پایه‌ای استفاده شد (چاین و همکاران 2010). بدین منظور در هر یک از نقاط پایه‌ای، منحنی رطوبتی خاک‌ها تعیین و سپس شاخص RMSE با توجه به مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده و به صورت زیر محاسبه گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\theta_i - \theta_{i(p)}]^2} \quad (7)$$

پیوست). خاکهای مورد مطالعه شامل دو سری متشکل از 45 خاک از بانک داده UNSODA (نمز و همکاران 2000) (جدول 1 و جدول پیوست) و 42 خاک از خاک‌های مناطق مرکزی ایران می‌باشد (خالق پناه 1384، محمدی 1385). 42 خاک سری دوم از جنوب تهران (17 نمونه)، کرج (8 نمونه) و دشت قزوین (17 نمونه) انتخاب شد. جدول 2 برخی از دامنه تغییرات مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. در خاک‌های مورد مطالعه، نمونه‌های دست خورده پس از هوا خشک شدن و عبور از غربال دو میلی‌متری برای انجام آزمایشات آماده شدند. به منظور تعیین توزیع اندازه ذرات خاک، حذف مواد آلی در نمونه‌هایی که بیش از 2 درصد ماده آلی داشتند با استفاده از محلول 30 درصد آب اکسیژنه (H_2O_2) صورت گرفت سپس جرم معینی از هر یک از این نمونه‌ها با محلول پراکنش (هگزامتافسفات سدیم 5%) تیمار شدند و توزیع اندازه ذرات خاک با استفاده از روش هیدرومتری تعیین شد (گی و بادر 1986). البته در اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتر ضرورتی به حذف مواد آلی خاک نیست، اما حذف مواد آلی خاک سبب ایجاد خطایی در اندازه‌گیری بافت خاک نخواهد شد. در این مطالعه جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از روش استوانه و کلوخه اندازه‌گیری شد (بلک و هارتج 1986). همچنین برای اندازه‌گیری جرم مخصوص حقیقی از روش پیکنومتر استفاده شد.

مقادیر رطوبت جرمی در 17 خاک جنوب تهران و 8 خاک کرج، در مکش‌های 0، 10، 33، 100، 300، 500، 1000 و 1500 کیلو پاسکال و با استفاده از صفحات فشاری در سه تکرار تعیین شد. همچنین رطوبت جرمی 17 خاک دشت قزوین در مکش‌های 0، 0/5، 1/5، 2، 2/5، 3، 3/5، 4، 4/5، 5، 10، 20، 30، 50، 100، 500، 1000 و 1500 کیلو پاسکال با استفاده از جعبه شن¹ و صفحات فشاری در سه تکرار تعیین گردید.

تعیین پارامتر تنظیم کننده (x)

در این تحقیق از روش چاین و همکاران (2010) در برآورد منحنی رطوبتی خاک استفاده شد. این محققین ضرایب تبیینی (R^2) برابر با 0/06، 0/027، 0/14، 0/12 و 0/012 را بین متغیر $e_v \times p_{200}$ و پارامترهای m ، n و a مدل منحنی رطوبتی فردلاند و ژیانگ بدست آوردند. همان گونه که مشاهده می‌شود مقادیر کوچک ضرایب تبیین به دست آمده نشان داد که استفاده مستقیم از متغیر

¹ Sand box

در این مکش اندازه‌گیری می‌شود، انتخاب مکش 33 کیلوپاسکال به عنوان نقطه پایه‌ای منحنی رطوبتی، حائز اهمیت می‌باشد. لذا منطقی به نظر می‌رسد که در روش مذکور، تنها با تعیین این نقطه از منحنی رطوبتی تمام منحنی رطوبتی را برآورد نمود.

ارزیابی کارایی روش

با توجه به اینکه مکش 33 کیلوپاسکال به عنوان بهترین نقطه پایه‌ای انتخاب گردید، از این نقطه جهت ارزیابی کارایی روش در سایر قسمت‌های این مطالعه استفاده شد. کمترین و بیشترین مقدار برآورد شده پارامترهای منحنی رطوبتی فردلاند و ژیانگ (1994) در خاک‌های UNSODA به ازای نقطه پایه‌ای مذکور در جدول 5 آمده است. دامنه وسیع مقدار رس، شن و سیلت در خاک‌های مورد استفاده سبب ایجاد دامنه تغییرات وسیع در پارامتر a (بین $1/04 - 289/59$) شده است. همچنین دامنه تغییرات مقادیر x نیز بین $300/4 - 180/2$ متغیر می‌باشد (جدول 4).

نمودار (2) منحنی رطوبتی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده دو نمونه از خاک‌های بانک اطلاعاتی UNSODA را نشان می‌دهد. تطابق مناسب منحنی رطوبتی برآورد شده بر داده‌های اندازه‌گیری شده در تمام دامنه مکش‌های مورد مطالعه موید این مطلب است که روش پیشنهادی به خوبی قادر به پیش‌بینی منحنی رطوبتی خاک می‌باشد.

نمودار 3 رابطه کلی بین کلیه مقادیر رطوبت‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده در خاک‌های UNSODA را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه مقادیر رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، معادله خط رگرسیون بین این دو، با خط 1:1 مقایسه گردید. شیب خط رگرسیون برابر $0/98$ و عرض از مبدأ این خط برابر $0/004$ می‌باشد. نزدیک بودن خط رگرسیون به خط 1:1 نشان می‌دهد که مدل به خوبی قادر به پیش‌بینی رطوبت در مکش‌های مختلف بوده است و نیز ضریب تبیین بالا ($R^2 = 0/95$) بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده نیز موید دقت بالای این روش می‌باشد. چاین و همکاران (2010) در ارزیابی دقت روش پیشنهادی خود در 31 خاک از بانک اطلاعاتی SoilVision (2002)، ضریب تبیین $0/929$ را بین رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بدست آوردند.

جدول 5 مقادیر پارامترهای معادله فردلاند و ژیانگ (1994) را در خاک‌های ایران نشان می‌دهد. بیشترین و کمترین مقدار a به ترتیب برابر $30/8$ و $0/56$ بدست آمد که موکد وجود تنوع بالا در ویژگی‌های

که N تعداد نقاط منحنی رطوبتی، θ_i رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش i ام و $\theta_{i(p)}$ رطوبت برآورد شده در مکش i ام می‌باشد.

همچنین به منظور بررسی تفاوت نقاط پایه‌ای مختلف در برآورد منحنی رطوبتی آزمون آماری t دو طرفه مورد استفاده قرار گرفت (زار 2006). در پژوهش حاصل برنامه کامپیوتری هوشمند در محیط برنامه نویسی Matlab (7.10) تهیه شد و تمامی مراحل (الف) تا (د) با استفاده از این برنامه به انجام رسید.

نتایج و بحث

تعیین مناسبترین نقطه اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی

جدول 3 میانگین RMSE رطوبت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به وسیله روش چاین و همکاران (2010) را در نقاط پایه‌ای مورد آزمون نشان می‌دهد. بطور کلی در کلیه خاک‌ها، کمترین مقدار خطای روش زمانی بود که مکش 33 کیلوپاسکال به عنوان نقطه پایه منحنی رطوبتی مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه میانگین RMSE در خاک‌های UNSODA نشان‌داد که انتخاب هر یک از نقاط پایه‌ای 33 و 500 کیلوپاسکال نتیجه یکسان و قابل قبولی در برآورد منحنی رطوبتی دارد ولی با توجه به RMSE کمتر بدست آمده در نقطه پایه‌ای 33 کیلوپاسکال، استفاده از این نقطه به عنوان نقطه پایه‌ای در این روش پیشنهاد می‌شود. در خاک‌های ایران انتخاب نقطه پایه‌ای 33 کیلو پاسکال نتایج بهتری را در پیش‌بینی روش نسبت به سایر نقاط نشان دهد. انتخاب نقاط پایه‌ای در مکش‌های 500، 1000 و 1500 کیلوپاسکال سبب افزایش معنی‌دار میانگین RMSE در خاک‌های ایران گردید (جدول 3). چاین و همکاران (2010) بهترین نقطه مشخص منحنی رطوبتی را نقطه 500 کیلوپاسکال تعیین کردند. هرچند این محققین بیان کردند که نقطه 100 کیلوپاسکال نیز می‌تواند به عنوان نقطه پایه منحنی رطوبتی خاک مورد استفاده قرار گیرد. کاتانا و همکاران (2006) بیان داشتند که بهترین نقطه اندازه‌گیری شده جهت برآورد منحنی رطوبتی به روش تک نقطه‌ای در محدوده مکش‌های 50 الی 500 کیلو پاسکال قرار دارد. نتایج مطالعه حاضر مبنی بر صحت بیشتر مکش 33 کیلوپاسکال به عنوان نقطه پایه‌ای، تا حدودی متفاوت از مطالعات چاین و همکاران (2010) و کاتانا و همکاران (2006) می‌باشد. نظر به اینکه در بسیاری از مطالعات علوم خاک و هیدرولوژی مکش 33 کیلو پاسکال به عنوان ضریب ظرفیت مزرعه¹ در نظر گرفته شده و مقدار رطوبت خاک

¹ Field Capacity

این که مقدار رطوبت در این نقطه، تابعی از خصوصیات اولیه خاک مورد نظر (مانند وزن مخصوص ظاهری، توزیع اندازه ذرات خاک و غیره) است، بی‌تردید متغیر تنظیم‌کننده نیز متأثر از برخی ویژگی‌های اولیه خاک خواهد بود. این متغیر سبب انعطاف روش مذکور شده و قابلیت استفاده از آن را در شرایط متفاوت نیز امکان‌پذیر می‌سازد. وجود متغیر تنظیم‌کننده در معادلات رگرسیونی سبب شد که روش مذکور در خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق که شرایطی متفاوت از آن چیزی که معادلات از مشتق شده‌اند را داشتند نیز، به خوبی قادر به برآورد منحنی رطوبتی باشد.

بین خطای مدل (RMSE) و جرم مخصوص ظاهری خاک به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر منحنی رطوبتی، همبستگی منفی و معنی‌داری ($0/33^*$) مشاهده شد. اما رابطه معنی‌داری بین خطای مدل با مقادیر جداگانه رس و سیلت خاک مشاهده نشد. لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که احتمالاً روش چاین و همکاران (2010) در خاک‌های رسی نیز دارای دقت بالایی می‌باشد. در حالیکه بسیاری از مدل‌های ارائه شده در برآورد منحنی رطوبتی، از قبیل مدل آریا و پاریس (1981)، هاورکمپ و پارالانژ (1986) و محمدی و ونکلاستر (2011)، در خاک‌های رسی دارای دقت کمتری می‌باشند.

در این مطالعه بین مقدار رس و پارامتر a منحنی رطوبتی همبستگی مثبت و معنی‌داری ($0/433^*$) و بین رس و پارامترهای m ($0/43^*$) و n ($0/426^*$) منحنی رطوبتی همبستگی منفی و معنی‌دار بدست آمد. این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش رس در یک مکش معین مقدار رطوبت خاک افزایش می‌یابد. همچنین همبستگی بین رس و ψ_r ($0/428^*$) مثبت و معنی‌دار بود. به عبارت دیگر با افزایش رس رطوبت باقی مانده، در مکش بالاتری حاصل می‌شود.

رطوبت قابل استفاده گیاه (AW) از تفاضل رطوبت در مکش 33 (ظرفیت مزرعه) و 1500 (پژمردگی دائم) کیلوپاسکال تعیین شد. خط‌آپاین $0/038 =$ (RMSE) و همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال 1 درصد ($0/732^*$) بین رطوبت قابل استفاده پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده نشان‌داد که روش به خوبی قادر به پیش‌بینی رطوبت قابل استفاده گیاه در تمام خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد (نمودار 6). عباسی و همکاران (2011) رطوبت قابل استفاده را بوسیله توابع انتقالی بدست آمده توسط قربانی دشتکی و همایی (2004) تخمین زدند. این محققین مقادیر RMSE برابر $0/117$ را بین رطوبت قابل استفاده برآورد شده و اندازه‌گیری شده،

فیزیکی خاک‌های انتخابی است. بیشترین و کمترین مقدار x نیز به ترتیب برابر $300/6$ و 288 بود.

نمودار 4 منحنی رطوبتی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را در دو خاک لوم رسی سیلتی و لوم شنی را نشان می‌دهد. تطابق مناسب منحنی رطوبتی برآورد شده بر داده‌های اندازه‌گیری شده در تمام دامنه مکش‌های مورد مطالعه در این دو خاک بیانگر دقت روش پیشنهادی در پیش‌بینی منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. بخشی از دقت روش حاضر احتمالاً ناشی از قابلیت انعطاف بالای مدل پایه‌ای بکار رفته (مدل فردلاند و ژیانگ 1994) و بخشی از آن به وجود متغیر تنظیم‌کننده در آن می‌باشد.

نمودار 5 رطوبت‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در خاک‌های ایران را نشان می‌دهد. شیب خط رگرسیون برابر $0/92$ و عرض از مبدا برابر $0/028$ حاصل گردید که به ترتیب به مقادیر 1 و صفر مربوط به خط 1:1 بسیار نزدیک می‌باشند. همچنین ضریب تبیین برابر $0/96$ بین رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده نیز نشان‌داد که روش به خوبی قادر به پیش‌بینی منحنی رطوبتی در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.

مقایسه بین روش چاین و همکاران (2010) و برخی از توابع انتقالی پارامتری استفاده شده در خاک‌های ایران در جدول 6 ارائه شده است. جدول 6 نشان می‌دهد روش تک پارامتری چاین و همکاران (2010) نسبت به توابع انتقالی 3 پارامتری قربانی دشتکی و همایی (2004) و 4 پارامتری خداوردیلو و همکاران (2011) نتایج دقیق‌تری در برآورد منحنی رطوبتی و آب قابل استفاده، نشان می‌دهد. مقایسه تعداد پارامترهای ورودی سه روش مذکور نیز بیانگر ارجحیت روش چاین و همکاران (2010) متکی بر راهکار ارائه شده در مطالعه حاضر نسبت به دو روش دیگر است.

از آنجا که منحنی رطوبتی هر خاکی تابعی از ویژگی‌هایی مانند جرم مخصوص ظاهری، توزیع اندازه ذرات خاک و غیره می‌باشد لذا توسعه و اشتقاق توابع انتقالی که تنها مبتنی بر رگرسیون‌گیری بین خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه و پارامترهای منحنی رطوبتی مشاهده‌ای می‌باشد، در تخمین توابع هیدرولیکی خاک، محدود به شرایط و ویژگی‌های نمونه‌های خاک در منطقه مورد مطالعه خواهند بود. به همین دلیل کاربرد این توابع در شرایط متفاوت ممکن است با خطای زیادی همراه باشد. اما در روش مورد استفاده در این تحقیق، مقدار بهینه متغیر تنظیم‌کننده به شدت متأثر از رطوبت خاک در یک نقطه اندازه‌گیری شده‌ی معین، می‌باشد. با توجه به

برای برآورد پارامترهای معادله منحنی رطوبتی فردلاندر و ژیانگ (1994) به یک نقطه اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی نیاز دارد. نتایج نشان‌داد که بهترین نقطه اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی برای تخمین پارامترهای معادله در مکش 33 کیلوپاسکال قرار دارد. مقایسه نتایج روش تک پارامتری مذکور در برآورد منحنی رطوبتی و آب قابل استفاده گویای آن است که این روش از برخی از توابع انتقالی که برای تخمین منحنی رطوبتی نیاز به 3 و یا 4 پارامتر دارند دارای دقت بالاتری است. بررسی RMSE و ضریب همبستگی نشان‌داد که دقت این روش در تخمین منحنی رطوبتی خاک بهتر از برآورد آب قابل استفاده می‌باشد هرچند که دقت این روش در برآورد آب قابل استفاده نیز قابل قبول است. دقت بالای این روش در برآورد منحنی رطوبتی خاک بیشتر مربوط به وجود متغیر تنظیم کننده در معادلات رگرسیونی می‌باشد. وجود این متغیر سبب می‌شود که خصوصیات منحنی رطوبت خاک پیش‌بینی شده در مقدار این متغیر نمایان شده و انعطاف روش را افزایش دهد. دقت بالا در برآورد آب قابل استفاده تا حدودی مربوط به انتخاب نقطه 33 کیلو پاسکال به عنوان نقطه مشخص منحنی رطوبتی خاک است. بنابراین خطای روش در برآورد آب قابل استفاده بیشتر مرتبط با خطای این روش در برآورد رطوبت در مکش 1500 کیلوپاسکال می‌باشد.

بدست آوردند. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج عباسی و همکاران (2011) نشان می‌دهد که روش مذکور حتی نسبت به توابع انتقالی مشتق شده از خاک‌های ایران نیز دارای دقت بالاتری می‌باشد. یکی از دلایل ضعف توابع انتقالی در برآورد آب قابل استفاده مربوط به وجود خطای غیر یکسان در برآورد رطوبت ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم با استفاده از معادلات رگرسیونی می‌باشد. بنابراین خطاهای برآورد در این دو (ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم) با هم جمع شده و سبب افزایش خطا در برآورد AW می‌شود. با توجه به این که در این مطالعه نقطه 33 کیلو پاسکال (ظرفیت مزرعه) به عنوان نقطه اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی خاک مورد استفاده قرار گرفت بنابراین اختلاف رطوبت قابل استفاده برآورد شده و اندازه‌گیری شده غالباً مربوط به خطا در برآورد رطوبت در نقطه پژمردگی دائم می‌باشد. لذا اگر چه انتخاب نقطه 33 کیلو پاسکال به عنوان نقطه پایه‌ای منحنی رطوبتی در روش حاضر سبب کاهش خطا در برآورد منحنی رطوبتی خاک می‌شود اما این انتخاب سبب فاصله گرفتن رطوبت برآورد شده در مکش 1500 کیلوپاسکال نسبت به رطوبت اندازه‌گیری شده در این مکش می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه روش تک پارامتری چاین و همکاران (2010) برای تخمین منحنی رطوبتی خاک و مقدار آب قابل استفاده مورد آزمون قرار گرفت. این روش

جدول 1- دامنه تغییرات برخی مشخصات فیزیکی خاک‌های بانک اطلاعات UNSODA

انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	خصوصیات
0/268	1/38	1/97	0/73	BD
22/3	30	71/1	1	شن*
17/69	43/5	79/9	7/1	سیلت
14/97	28	58/1	6/6	رس

* اندازه ذرات شن، سیلت و رس بر اساس طبقه بندی USDA می‌باشد. BD جرم مخصوص ظاهری

خاک بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد.

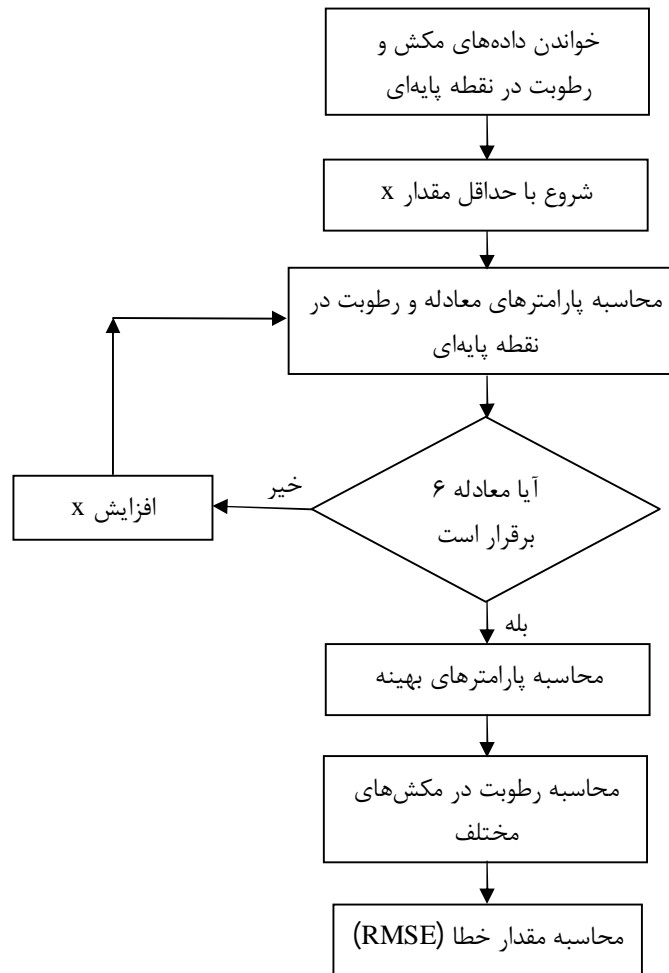
جدول 2- دامنه تغییرات برخی مشخصات فیزیکی خاک‌های سری دوم مورد استفاده (خاک‌های ایران)

(به نقل از محمدی (1385) و خالقی‌پناه (1384))

داده‌های دشت قزوین (N=17)				داده‌های کرج (N=8)				داده‌های جنوب تهران (N=17)				عوامل*
SD	Mean	Max	Min	SD	Mean	Max	Min	SD	Mean	Max	Min	
0/25	1/56	1/77	1/08	0/10	1/68	1/85	1/52	0/1	1/55	1/81	1/43	BD
13/25	21/43	45/5	2	17/10	49	65	33	7/74	46/72	58/29	26/62	شن
7/82	52/31	70/2	41	9/08	24/5	33	16	17/34	20/44	63/82	1	سیلت
8/79	26/25	43/4	8	8/01	26/5	34	19	12/59	32/83	58	9/5	رس

* SD انحراف معیار و N تعداد داده‌ها می‌باشد. BD جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. Max, Min و Mean به

ترتیب نشان دهنده مینیمم، ماکزیمم و میانگین داده‌ها می‌باشد. * اندازه ذرات شن، سیلت و رس بر اساس طبقه بندی USDA می‌باشد.



نمودار 1- فلوجات الگوریتم تعیین متغیر تنظیم کننده و برآورد منحنی رطوبتی خاک

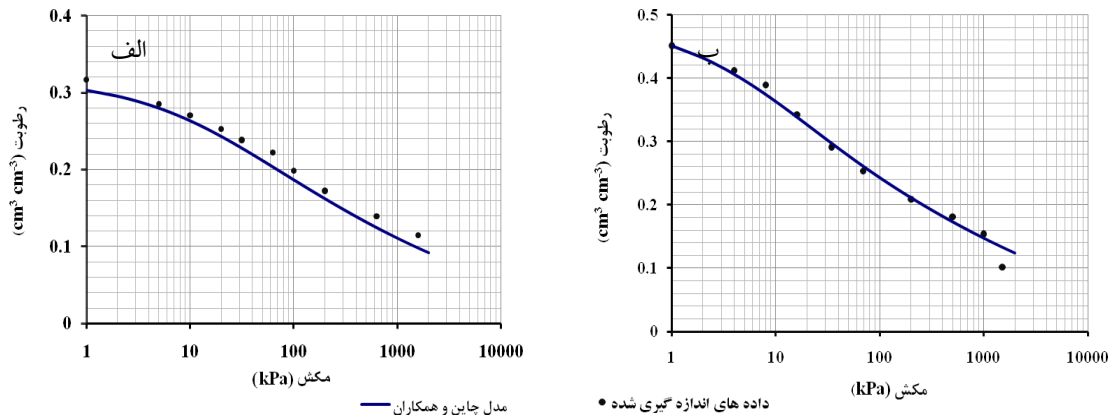
جدول 3- میانگین RMSE تخمین منحنی رطوبتی به روش تک نقطه‌ای به ازاء نقاط پایه‌ای مختلف*

میانگین RMSE				مکش نقطه پایه (kPa)
1500	1000	500	33	
0/03852 ^c	0/04556 ^b	0/02850 ^a	0/0256 ^a	خاک‌های UNSODA
0/065 ^d	0/04246 ^c	0/0361 ^b	0/02689 ^a	خاک‌های ایران

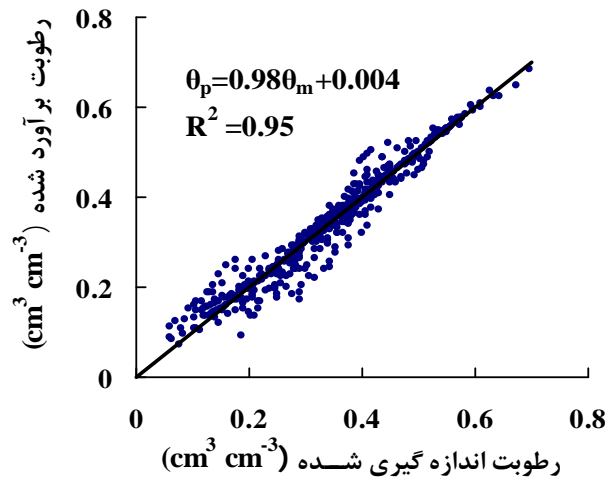
* حروف متفاوت در هر ردیف جدول نشان دهنده وجود اختلاف معنی دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال 5% (با آزمون t دو طرفه) می‌باشد.

جدول 4- میانگین، بیشترین و کمترین پارامترهای برآورد شده مدل فردلاند و ژیانگ در خاک‌های UNSODA زمانی که نقطه پایه‌ای برابر مکش 33 کیلو پاسکال فرض می‌شود.

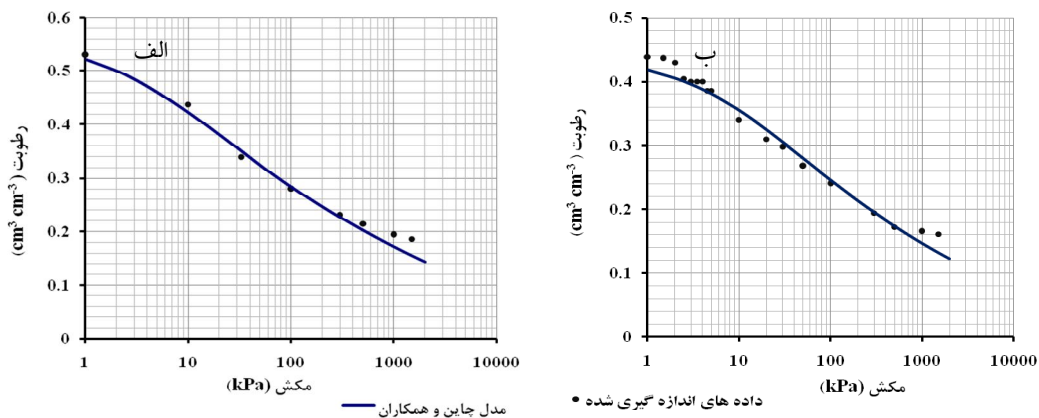
پارامتر	x	a (kPa)	m	n	ψ_r (kPa)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)
کمترین	180/2	1/04	0/569	0/559	501/21	0/0049
بیشترین	300/4	289/59	0/8137	0/6858	637/52	0/044
میانگین	277/73	56/43	0/769	0/663	525/26	0/0256



نمودار 2- تطابق منحنی رطوبتی بدست آمده بوسیله روش چاین و همکاران (2010) بر داده‌های تجربی دو خاک انتخابی از بانک اطلاعاتی UNSODA (الف: خاک شماره 1381 با $RMSE=0/0281$ و ب: خاک شماره 2711 با $RMSE=0/025$)



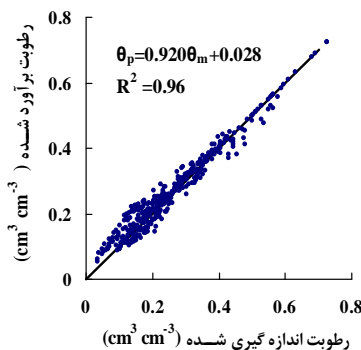
نمودار 3- رابطه کلی بین رطوبت‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده در کلیه خاک‌های انتخابی از بانک اطلاعاتی UNSODA با استفاده از نقطه پایه‌ای 33 کیلو پاسکال (خط ممتد خط 1:1 را نشان می‌دهد).



نمودار 4- تطابق منحنی رطوبتی بدست آمده بوسیله روش چاین و همکاران (2010) بر داده‌های تجربی دو خاک انتخابی از ایران (الف: لوم رسی سیلتی $RMSE=0/015$ و ب: لوم شنی $RMSE=0/017$)

جدول 5- میانگین، کمترین و بیشترین پارامترهای برآورد شده مدل فردلاند و ژیانگ در خاک‌های ایران با استفاده از نقطه پایه‌ای 33 کیلوپاسکال

پارامتر	x	a (kPa)	m	n	ψ_r (kPa)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)
کمترین	288	0/56	0/790	0/674	501/01	0/0088
بیشترین	300/6	30/8	0/814	0/686	513/79	0/046
میانگین	297/16	8/81	0/807	0/682	504/47	0/0268



نمودار 5- رابطه کلی بین رطوبت‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده در خاک‌های با استفاده از نقطه پایه‌ای 33 کیلو پاسکال (خط ممتد خط 1:1 را نشان می‌دهد).

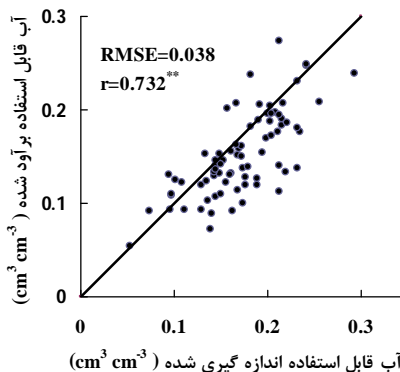
جدول 6- خصوصیات برخی از توابع انتقالی پارامتری استفاده شده در برآورد منحنی رطوبتی برخی از خاک‌های ایران

توضیحات	روش چین و همکاران (2010)	قربانی دشتکی و همایی (2004)	خداوردی لو و همکاران (2011)
مدل منحنی رطوبتی پایه	فردلاند و ژیانگ (1994)	ون گنختن (1980)	ون گنختن (1980)
تعداد پارامترهای برآورد شده	4	4	3
متغیرهای مورد استفاده*	متغیر تنظیم کننده (x)	d_g, δ_g, BD	$\theta_{1500}, \theta_{33}, CaCO_3\%, \delta_g$
RMSE** رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده	0/026	0/192	0/107
RMSE** در برآورد آب قابل استفاده	0/038	0/117	گزارش نشده

*BD: جرم مخصوص ظاهری خاک، % CaCO₃ درصد کربنات کلسیم خاک، θ_{33} رطوبت در مکش 33 کیلوپاسکال، θ_{1500} رطوبت در مکش 1500

کیلوپاسکال، δ_g انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک و d_g میانگین هندسی قطر ذرات خاک

** مدل چین و همکاران (2010) خاک‌های کرج، تهران و دشت قزوین (مطالعه حاضر)، قربانی دشتکی و همایی (2004) خاک‌های جنوب تهران (به نقل از عباسی و همکاران 2011)، خداوردی لو و همکاران (2011) در خاک‌های کرج



نمودار 6 - رابطه بین آب قابل استفاده برآورد شده و اندازه‌گیری شده در خاک‌های UNSODA و ایران. (خط ممتد خط 1:1 را نشان می‌دهد.)

14. Gee, G.W., and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis, In: Klute, A., et al. (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part1, Physical and mineralogical methods*, seconded. ASA, Inc., Madison, WI, pp. 383–411.
15. Ghanbarian-Alavijeh, B., and A.M. Liaghat. 2009. Evaluation of soil texture data for estimating soil water retention curve. *Can. J. Soil Sci.* 89:461–471.
16. Ghorbani Dashtaki, Sh. and M. Homae. 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.
17. Gupta, S.C., and W.E. Larson. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resour Res.* 15(6):1633–1635.
18. Haverkamp, R., and J.Y. Parlange. 1986. Predicting the water retention curve from particle size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Sci.* 142: 325–339.
19. Johari, A., G. Habibagahi, and A. Ghahramani. 2006. Prediction of soil– water characteristic curve using genetic programming. *J Geotech Geoenviron.* 132(5): 661–665.
20. Khodaverdiloo, H., M. Homae, M. TH. van Genuchten, and Sh. Ghorbani Dashtaki. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *J Hydrol.* 399: 93–99.
21. Leong, E. C., and H. Rahardjo. 1997. Review of soil-water characteristic curve equations. *J Geotech Geoenviron.* 123(12): 1106– 117.
22. Mohammadi, M.H., and M. Vanclouster. 2011. Predicting the soil moisture characteristic curve from particle size distribution with a simple conceptual model. *VZJ.* 10(2): 594–602.
23. Nam, S., M. Gutierrez, P. Diplas, J. Petrie, A. Wayllace, N. Lu, and J.J. Munoz, 2009. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWC of riverbank soils. *Eng Geol.* 110:1–10.
24. Nemes, A., M.G. Schaap, and F.J. Leij. 2000. The UNSODA unsaturated soil hydraulic property database, version 2.0. Available at www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8967 (verified 28 Mar. 2011). U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
25. Pachepsky, Ya. A., D. Timlin, and G. Varallyay. 1996. Artificial neural network to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60(3): 727–733.
26. Perera, Y.Y. 2003. Moisture equilibria beneath paved area. Ph.D. dissertation, Arizona State University, Tempe, Ariz.
27. Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In Morel-Seytoux, H.J.(ed.) *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling-Theory and Practice*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht.
28. Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger, and R.I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Transactions of the ASAE.* 50:1031–1035.
29. SoilVision. 2002. *SoilVision.Version3*[computer program]. Soil Vision Systems Limited, Saskatoon, Sask.
30. van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892–898.
31. Zapata, C.E. 1999. Uncertainty in soil-water characteristic curve and impacts on unsaturated shear strength predictions. Ph.D. dissertation, Arizona State University, Tempe, Ariz.
32. Zar, J.H. 2006. *Biostatistical Analysis*. Fourth edition. Pearson Education. UK.