

ارزیابی و مقایسه دو مجموعه توابع انتقالی در برآورد برخی نقاط منحنی مشخصه رطوبتی خاک

یاسر استواری، ارسلان فاریابی^{۱*} و علی اکبر موسوی

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت.

Yaser.ostovary@gmail.com

استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه جیرفت.

faryabi.arsalan@ujiroft.ac.ir

دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.

aamousavi@gmail.com

چکیده

منحنی مشخصه رطوبتی خاک در پژوهش‌های آب و خاک مربوط به آبیاری و زهکشی، حفاظت خاک و انتقال املاح اهمیت فراوانی دارد. از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی از خاک، وقت‌گیر و هزینه‌بر است، می‌توان با برآورد نقاط منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از توابع انتقالی و ویژگی‌های زود یافت خاک، در زمان و هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد. هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی و مقایسه توابع انتقالی استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) که هر دو از یک بانک اطلاعاتی یکسان (UNSODA) استخراج شده‌اند، در برآورد هشت نقطه از منحنی مشخصه رطوبتی می‌باشد. برای این منظور، از داده‌های ۱۱۹ نمونه خاک‌های بانک اطلاعات خاک HYPRES استفاده شد. نتایج نشان که توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) در مکش‌های کم، کارآیی خوب و مشابه با توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) دارد. در مکش‌های زیاد و نزدیک به نقطه پژمردگی دائم، توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) که از بعد فرکتال اجزای بافت خاک به عنوان متغیر مستقل ورودی استفاده می‌کنند، کارآیی بیشتری نسبت به توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) دارند. در برخی از مکش‌ها نیز هر دو تابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) کارآیی مناسبی در برآورد رطوبت خاک نداشتند. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) (با یک پارامتر ورودی، بعد فرکتال) در تخمین نقاط منحنی رطوبتی کارآیی مشابه و گاهی بهتر نسبت به توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) (با تعداد زیاد متغیرهای ورودی) دارد.

واژه‌های کلیدی: تابع استواری-بیگی، بعد فرکتال، تابع قنبریان-میلان، منحنی رطوبتی، HYPRES.

۱- آدرس نویسنده مسئول: جیرفت، گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه جیرفت.

*- دریافت: تیر ۱۳۹۵ و پذیرش: آذر ۱۳۹۵

مقدمه

منحنی مشخصه رطوبتی خاک کاربردهای فراوانی در آبیاری و مطالعات خاک و آب دارد (علیزاده، ۱۳۸۳). اندازه‌گیری نقاط این منحنی وقت‌گیر و پرهزینه بوده و مستلزم وجود ابزار و امکانات لازم است. از این رو، پژوهشگران به دنبال روابطی هستند که بتوان آن‌ها را از ویژگی‌های موجود یا زودیافت خاک تخمین زد. این روابط که ویژگی‌های دیر یافت خاک (مانند نقاط منحنی مشخصه رطوبتی) را با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک (مانند اجزای تشکیل دهنده بافت خاک و جرم مخصوص ظاهری) برآورد می‌کنند را توابع انتقالی (PTF^2) می‌نامند (قربانی‌دشتکی و همایی، ۲۰۰۴؛ خداوردلو و همکاران، ۲۰۱۱؛ قربانی‌دشتکی و همکاران، ۲۰۱۱). عموماً داده‌های زودیافت خاک مانند درصد اجزای بافت خاک (شن، سیلت و رس)، میانگین هندسی قطر ذرات (d_g) ، انحراف معیار هندسی قطر ذرات (σ_g) ، درصد ماده آلی و جرم ویژه ظاهری برای برآورد نقاط منحنی رطوبتی مورد استفاده قرار می‌گیرند (قنبریان و میلان، ۲۰۱۰؛ مصدقی و محبوبی، ۲۰۱۱). قابل ذکر است که این توابع همیشه موفق عمل نمی‌کنند. برخی از این توابع از داده‌های خاصی استخراج شده‌اند و احتمالاً در همان محدوده جغرافیایی قابل استفاده و مفید خواهند بود (عباسی و همکاران، ۲۰۱۱؛ استواری و بیگی، ۱۳۹۲).

توماسلا و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از ۸۳۸ مجموعه داده ویژگی‌های زودیافت اقدام به مقایسه‌ی توابع انتقالی نقطه‌ای در برآورد PWP نمودند. ایشان دریافتند که اجزای بافت خاک (درصد رس)، در معادلات تأثیر معنی‌داری دارد و یکی از ورودی‌های مهم در تخمین نقطه‌ای PWP است. قربانی‌دشتکی و همایی (۲۰۰۴) از d_g و σ_g مربوط به ۳۴ نمونه خاک با توزیع متفاوت اندازه ذرات برای ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای و پیوسته در برآورد نقاط منحنی مشخصه رطوبتی استفاده کردند. نتایج آن‌ها

نشان داد که استفاده از d_g و σ_g به جای اجزای بافت خاک، محتوای آب خاک را در پتانسیل‌های ۳۰۰- تا ۱۵۰۰- کیلوپاسکال بهتر برآورد می‌کند. قنبریان و میلان (۲۰۱۰) با استفاده از درصد اجزای بافت خاک، d_g و جرم مخصوص ظاهری ۳۱۵ نمونه خاک از بانک اطلاعات خاک UNSODA و با استفاده از روش رگرسیون خطی به توسعه توابع انتقالی برای برآورد برخی نقاط منحنی مشخصه رطوبتی (از رطوبت اشباع تا نقطه پژمردگی دائم) پرداختند و بر اساس آماره RMSE بیان کردند که توابع توسعه در برآورد نقاط منحنی رطوبتی از مدل رزتا کارآیی بیشتری دارد. رضانی و همکاران (۱۳۹۰) به توسعه توابع انتقالی به منظور تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاکهای شور و شور-سدیمی جنوب تهران پرداختند. آن‌ها از روش رگرسیون خطی چند متغیره جهت توسعه توابع برآورد نقاط منحنی رطوبتی استفاده کردند. نتایج نشان داد توابع انتقالی توسعه یافته، رطوبت را در مکش‌های ۱۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به طور قابل توجهی بهتر از مدل رزتا تخمین می‌زند، اگرچه مدل رزتا رطوبت را در مکش ۳۳ کیلوپاسکال بهتر از توابع انتقالی پیش‌بینی می‌کند.

استواری و بیگی (۱۳۹۲) با استفاده از داده‌های UNSODA به توسعه توابع انتقالی جهت برآورد رطوبت در هشت مکش از منحنی مشخصه رطوبتی پرداختند. این توابع از رابطه‌ی برآورد بعد فرکتال پیشنهادی سپاسخواه و تفته (۲۰۱۳) به عنوان متغیر مستقل استفاده و با توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) مقایسه شدند. ابتدا نوع رابطه بین بعد فرکتال با رطوبت در نقاط مختلف منحنی مشخصه رطوبتی (از اشباع تا پژمردگی دائم) به صورت نموداری بررسی و بر اساس نوع روابط، توابع انتقالی توسعه یافت. نتایج نشان داد رابطه بعد فرکتال- رطوبت بیشتر از یک روند نمایی پیروی می‌کند. توابع نمایی بر مبنای بعد فرکتال و جرم مخصوص ظاهری برای برآورد رطوبت در دامنه منحنی رطوبتی خاک ارائه شد. توابع پیشنهادی به

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از داده‌های ویژگی‌های هیدرولیکی ۱۱۹ نمونه خاک مربوط به بانک اطلاعات خاک HYPRES جهت مقایسه و ارزیابی توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) و استواری-بیگی (۱۳۹۲) در برآورد رطوبت مربوط به هشت نقطه از منحنی مشخصه رطوبتی استفاده شد. داده‌های مربوط به ۱۱۹ نمونه خاک استفاده شده دارای اطلاعات کافی برای استخراج بعد فرکتال بافت و رطوبت حجمی در مکش‌های صفر، ۱۰، ۳۳، ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال بودند. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب توابع انتقالی پیشنهادی استواری و بیگی (۱۳۹۲) و توابع انتقالی پیشنهادی قنبریان-میلان (۲۰۱۰) برای برآورد رطوبت در هشت مکش از منحنی مشخصه رطوبتی مربوط به خاک‌های بانک اطلاعاتی UNSODA نشان داده شده است.

طور کلی کارایی خوب، قابل مقایسه و در برخی موارد کارایی بهتری در مقایسه با توابع رگرسیونی خطی قنبریان-میلان (۲۰۱۰) نشان دادند. با توجه به اهمیت منحنی مشخصه رطوبتی در مطالعات آب و خاک، پژوهشگران زیادی اقدام به توسعه توابع انتقالی (روابط رگرسیونی با استفاده از خصوصیات زود یافت خاک) برای تخمین نقاط این ویژگی مهم خاک نموده‌اند. از آنجا که توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) و استواری-بیگی (۱۳۹۲) در برآورد نقاط منحنی رطوبتی از یک بانک اطلاعاتی یکسان (UNSODA) استخراج شده است، از این رو، مقایسه کارایی توابع نامبرده در تخمین منحنی رطوبتی خاک با یک سری داده متفاوت، بسیار مفید خواهد بود. لذا هدف از این پژوهش، مقایسه و ارزیابی توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) و استواری-بیگی (۱۳۹۲) در برآورد رطوبت در هشت نقطه از منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از داده‌های بانک اطلاعات خاک HYPRES است.

جدول ۱- توابع انتقالی پیشنهاد شده توسط استواری و بیگی (۱۳۹۲) برای پیش‌بینی رطوبت حجمی در هشت مکش از منحنی مشخصه رطوبتی مربوط به خاک‌های بانک اطلاعاتی UNSODA*

| تابع | آماره‌ها | اندازه 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 |
| $\theta_{500} = \exp(-11.888 + 3.812 D)$ | $R^2 = 0.83$, $SSE = 0.117$, $p < 0.01$ | 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 خاک در مکش‌های مختلف، BD جرم مخصوص ظاهری خاک، D بعد فرکتال بافت خاک محاسبه شده از رابطه ارائه شده توسط سپاسخواه و تفته (۲۰۱۳) و SSE مجموع مربعات خطا است.

$$d_g = \exp[0.01 (P_{sand} \cdot \ln 1 + P_{silt} \cdot \ln 0.025 + P_{clay} \cdot \ln 0.001)] \quad (2)$$

که در آن:

P_{sand} ، P_{clay} و P_{silt} به ترتیب درصد‌های شن، سیلت و رس، و d_g نیز میانگین هندسی قطر ذرات به میلی‌متر است. از معیارهای ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطا (ME)، میانگین مربعات خطا (RMSE)، نسبت میانگین هندسی خطا (GMER) و معیار اطلاعات آکائیک (AIC) جهت آزمون اعتبار سنجی توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲)

جهت محاسبه بعد فرکتال از رابطه‌ی سپاسخواه و تفته

(۲۰۱۳) به صورت زیر 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.

میانگین هندسی قطر ذرات (d_g) نیز از رابطه زیر محاسبه شد (شیرازی و بروسما، ۱۹۸۴):

و مقایسه این توابع با توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) استفاده شد.

جدول ۲- توابع انتقالی پیشنهاد شده توسط قنبریان و میلان (۲۰۱۰) برای پیش‌بینی رطوبت حجمی در هشت مکش از منحنی مشخصه رطوبتی مربوط به خاک‌های بانک اطلاعاتی UNSODA*

| 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 |
| $\theta_{1500} = 0.170 - 0.072 dg - 0.052 BD + 0.004 CI$ | ۰/۷۹ |

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

کلاس مثلث بافت خاک قرار می‌گیرند. همان‌گونه که شکل ۱ نشان می‌دهد کلاس بافتی خاک‌های مورد استفاده از مجموعه داده‌های HYPRES نیز پراکنش مشابهی با نمونه‌های UNSODA در مثلث بافت خاک دارند. اغلب خاک‌های استفاده شده از مجموعه داده‌های HYPRES در مرکز مثلث بافت خاک یعنی در بافت‌های متوسط تا سنگین قرار دارند. خلاصه آماری ویژگی‌های بافتی، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت حجمی مربوط به خاک‌های استفاده شده از مجموعه داده‌های HYPRES در مکش-های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

نرمال بودن مقادیر رطوبت در پتانسیل‌های مختلف و سایر پارامترها با آزمون نیکویی برازش کلموگرف-اسمیرنف بررسی گردید. همچنین مقدار میانگین و میانه متغیرها نزدیک بوده که حاکی از نرمال بودن توزیع داده‌ها است (استواری و بیگی، ۱۳۹۲). سیلت با میانگین ۳۹/۴٪ بیشترین و شن با میانگین ۲۹/۴٪ کمترین مقدار را در اجزای بافت خاک دارد (شکل ۱ و جدول ۳). حداقل مقدار D برابر ۲/۴۷ و حداکثر آن ۲/۸۷ بود. در مجموعه داده‌های استفاده شده در این پژوهش نیز مشابه با پژوهش استواری و بیگی (۱۳۹۲) و توماسلا همکاران (۲۰۰۳)، مقادیر کم D در بافت‌های شنی و مقادیر بزرگ D در بافت‌های رسی مشاهده شد.

ضریب تعیین مستقیماً از نرم‌افزار استخراج شد و سایر آماره‌ها با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید:

$$ME = \sum[(P_i - O_i)/n] \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{(\sum[(P_i - O_i)^2]/n)} \quad (۴)$$

$$GMER = \exp[\sum \ln(P_i / O_i)] \quad (۵)$$

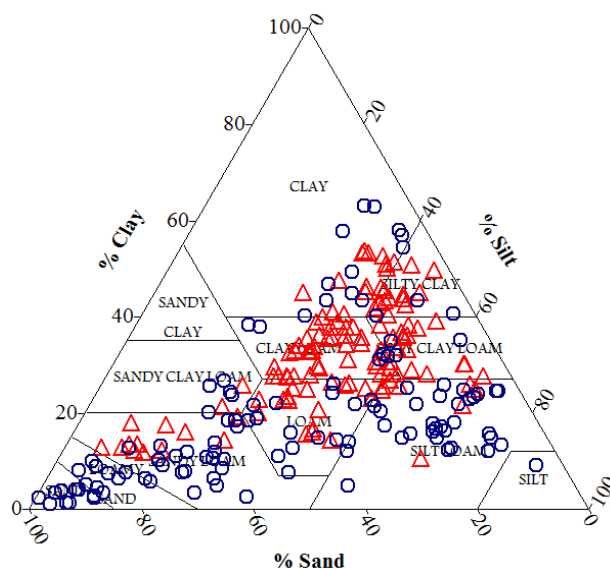
$$AIC = n \ln[\sum(P_i - O_i)^2/n] + 2k \quad (۶)$$

که در آن‌ها:

P_i مقادیر رطوبت برآورد شده، O_i مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌ها و k تعداد پارامترهای مدل است. علاوه بر این، برای ارزیابی توابع و مقایسه آن‌ها از خطوط ۱:۱ استفاده شد. تفاوت عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون مقادیر مشاهده شده-برآورد شده رطوبت در هر مکش به وسیله هر یک از توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و توابع نظیر قنبریان-میلان (۲۰۱۰) با صفر و یک محاسبه و برای مقایسه به کار رفت. محاسبات آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA 8.0 انجام شد.

نتایج و بحث

شکل ۱ توزیع بافتی خاک‌های مورد استفاده از مجموعه داده‌های UNSODA و HYPRES را نشان می‌دهد. نمونه‌های UNSODA در ۱۱ کلاس از ۱۲



شکل ۱- توزیع بافتی خاک‌های استفاده شده از مجموعه داده‌های UNSODA و HYPRES (مثلث‌ها و دایره‌ها به ترتیب مربوط به نمونه‌های خاک HYPRES و UNSODA می‌باشد)

مقدار رطوبت از حداقل $0.06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ در مکش ۱۵۰۰ تا حداکثر $0.60 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ در مکش صفر متغیر بود (جدول ۳).

مقدار dg از حداقل 0.005 میلی‌متر تا حداکثر 0.34 میلی‌متر متغیر بود. همچنین مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک‌ها از $1/17$ تا $1/88$ گرم بر سانتی‌متر مکعب و

جدول ۳- خلاصه آماری ویژگی‌های بافتی، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف مربوط به خاک‌های استفاده شده از مجموعه داده‌های HYPRES

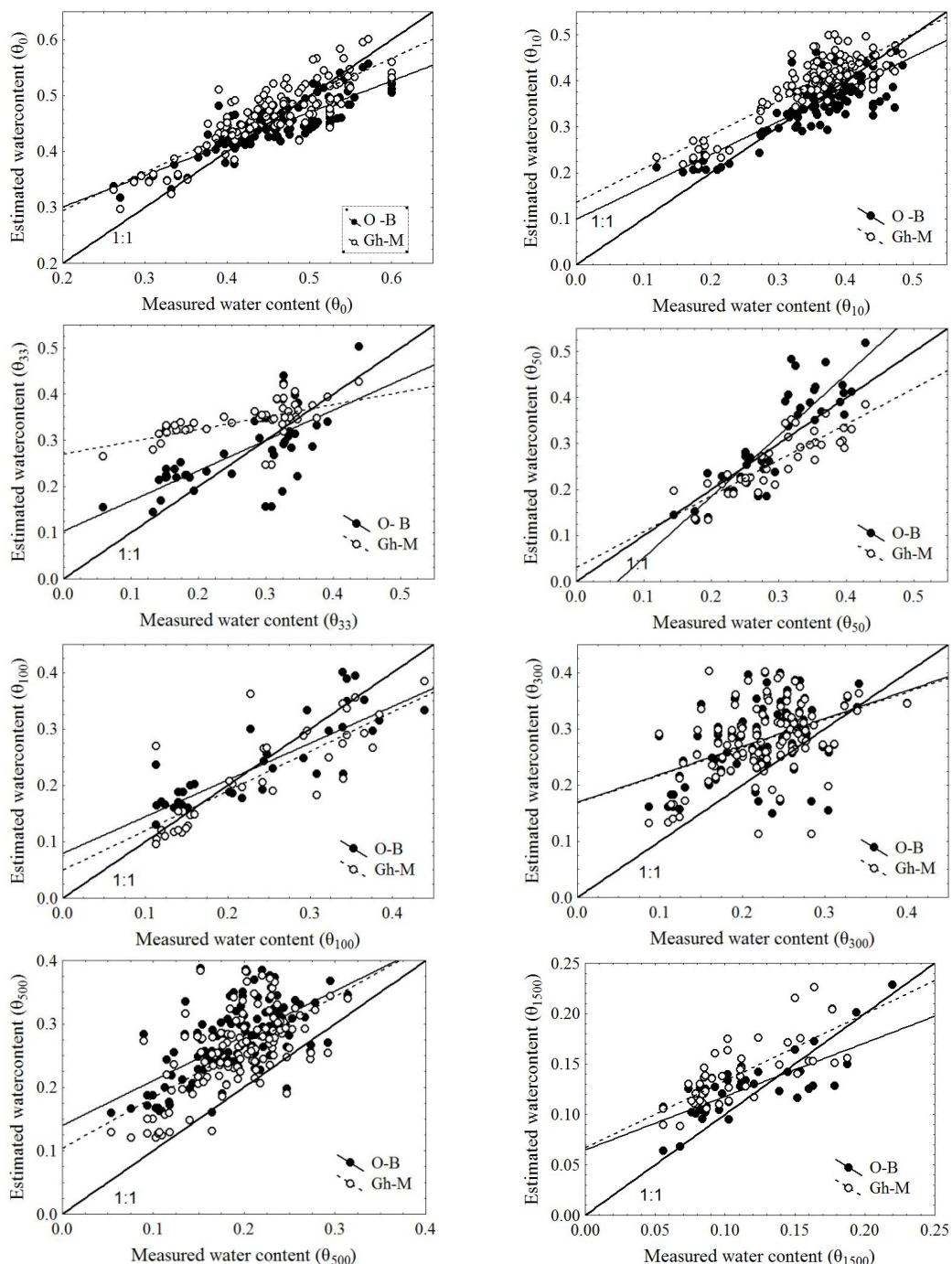
| واحد | تعداد نمونه | میانگین | میانگین | حدداقل | حداکثر | انحراف معیار | ضریب تغییرات (%) |
|-----------------|-------------|---------|---------|--------|--------|--------------|------------------|
| شن | ۱۱۹ | ۲۹/۴ | ۲۵/۷ | ۳/۲ | ۸۱/۰ | ۱۷/۹ | ۶۱/۱ |
| سیلت | ۱۱۹ | ۳۹/۴ | ۳۹/۲ | ۶/۸ | ۶۷/۵ | ۱۲/۲ | ۳۰/۱ |
| رس | ۱۱۹ | ۳۱/۱ | ۳۰/۴ | ۱۰/۰ | ۵۲/۱ | ۱۰/۷ | ۳۴/۴ |
| بعد فرکتال (D) | ۱۱۹ | ۲/۶۸ | ۲/۶۸ | ۲/۴۷ | ۲/۸۷ | ۰/۰۶ | ۲/۱ |
| dg | ۱۱۹ | ۰/۰۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۰۵ | ۰/۳۴ | ۰/۰۷ | ۱۴۱/۲ |
| جرم مخصوص ظاهری | ۱۱۹ | ۱/۴۴ | ۱/۴۴ | ۱/۱۷ | ۱/۸۸ | ۰/۱۴ | ۹/۴۰ |
| θ_0 | ۱۱۹ | ۰/۴۶ | ۰/۴۶ | ۰/۲۶ | ۰/۶۰ | ۰/۰۷ | ۱۵/۸ |
| θ_{10} | ۱۱۴ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | ۰/۱۲ | ۰/۴۹ | ۰/۰۷ | ۲۰/۱ |
| θ_{33} | ۴۵ | ۰/۲۷ | ۰/۳۰ | ۰/۰۶ | ۰/۴۴ | ۰/۰۹ | ۳۳/۳ |
| θ_{50} | ۴۰ | ۰/۳۰ | ۰/۳۰ | ۰/۱۴ | ۰/۴۳ | ۰/۰۷ | ۲۴/۴ |
| θ_{100} | ۴۱ | ۰/۲۴ | ۰/۲۳ | ۰/۱۱ | ۰/۴۴ | ۰/۰۹ | ۳۹/۰ |
| θ_{300} | ۱۱۸ | ۰/۲۳ | ۰/۲۳ | ۰/۰۹ | ۰/۴۰ | ۰/۰۶ | ۲۴/۷ |
| θ_{500} | ۱۱۸ | ۰/۱۹ | ۰/۲۰ | ۰/۰۵ | ۰/۳۱ | ۰/۰۵ | ۲۶/۴ |
| θ_{1500} | ۴۹ | ۰/۱۲ | ۰/۱۱ | ۰/۰۶ | ۰/۲۲ | ۰/۰۴ | ۳۴/۵ |

حاصل از توابع استواری- بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان- میلان (۲۰۱۰) روند مشابهی دارند (شکل ۲). در رطوبت اشباع (مکش صفر کیلوپاسکال) هر دو تابع قنبریان- میلان (۲۰۱۰) و استواری- بیگی (۱۳۹۲) تخمین مناسبی از رطوبت خاک داشتند (پراکندگی داده‌های حاصل از دو

شکل ۲ نمودار ۱:۱ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر رطوبت برآورد شده با استفاده از توابع انتقالی ارائه شده توسط استواری- بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان- میلان (۲۰۱۰) را نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد تقریباً در همه مکش‌ها پراکندگی نقاط

قنبریان- میلان (۲۰۱۰) برآورد قابل قبولی از رطوبت اشباع خاک داشتند.

مدل حول خط ۱:۱ کم است). در مطالعه استواری و بیگی (۱۳۹۲) نیز، هم در داده‌های صحت‌سنجی و هم در داده‌های اعتبارسنجی، توابع استواری- بیگی (۱۳۹۲) و



شکل ۲- مقایسه مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و مقادیر رطوبت برآورد شده توسط توابع استواری- بیگی (O-B) و Ghanbarian and Millan (Gh-M) در مکش‌های مختلف با یکدیگر و با خط ۱:۱

و تفته (۲۰۱۳) بعد فرکتال برآورد شده، خود تابع درصد رس خاک است (معادله ۱).

در مکش‌های ۱۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، هر دو دسته توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) و استواری-بیگی (۱۳۹۲) کارآیی نسبتاً خوبی در برآورد رطوبت داشتند (شکل ۲). در مکش‌های ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال، هر دو دسته توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) و استواری-بیگی (۱۳۹۲) کارآیی اندکی در برآورد رطوبت حجمی خاک داشتند و رطوبت خاک را مقداری بیشتر از مقادیر اندازه-گیری شده برآورد نمودند (شکل ۲). در حالی که در مطالعه استواری و بیگی (۱۳۹۲) هم در داده‌های صحت‌سنجی و هم در داده‌های اعتبارسنجی توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) کارآیی مطلوبی در برآورد رطوبت حجمی خاک در مکش‌های ۱۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال داشتند.

در جدول ۴، نتایج آماره‌های اعتبارسنجی توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) در برآورد میزان رطوبت حجمی در هشت مکش از منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از مجموعه داده‌های مربوط به بانک اطلاعات خاک HYPRES نشان داده شده است.

جدول ۴ - آماره‌های مربوط به اعتبارسنجی توابع انتقالی ارائه شده توسط استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) با استفاده از

| داده‌های مربوط به بانک اطلاعات خاک HYPRES | | | | | | | | تابع | آماره‌های خطا |
|---|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|------------|---------------|--------------------|
| θ_{1500} | θ_{500} | θ_{300} | θ_{100} | θ_{50} | θ_{33} | θ_{10} | θ_0 | | |
| ۰/۵۴ | ۰/۳۸ | ۰/۲۱ | ۰/۶۶ | ۰/۷۷ | ۰/۴۸ | ۰/۶۹ | ۰/۷۴ | استواری-بیگی | R^2 |
| ۰/۵۶ | ۰/۴۰ | ۰/۲۰ | ۰/۶۵ | ۰/۷۳ | ۰/۳۶ | ۰/۷۱ | ۰/۷۲ | قنبریان-میلان | |
| ۰/۰۳ | ۰/۰۹ | ۰/۰۸ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۰/۰۱ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴ | استواری-بیگی | RMSE |
| ۰/۰۴ | ۰/۰۸ | ۰/۰۸ | ۰/۰۶ | ۰/۰۵ | ۰/۰۷ | ۰/۰۶ | ۰/۰۴ | قنبریان-میلان | ($cm^3 cm^{-3}$) |
| ۰/۰۰۹ | ۰/۰۸۳ | ۰/۰۵۵ | -۰/۰۰۴ | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۱۱ | -۰/۰۰۵ | -۰/۰۱۰ | استواری-بیگی | ME |
| ۰/۰۲۶ | ۰/۰۸۵ | -۰/۰۰۲ | -۰/۰۲۱ | -۰/۰۳۵ | ۰/۰۷۴ | ۰/۰۴۰ | ۰/۰۱۲ | قنبریان-میلان | ($cm^3 cm^{-3}$) |
| ۱/۱۱ | ۱/۳۶ | ۱/۲۵ | ۱/۰۲ | ۱/۰۲ | ۱/۰۷ | ۰/۹۹ | ۰/۹۸ | استواری-بیگی | GMER |
| ۱/۲۶ | ۱/۳۴ | ۱/۲۴ | ۰/۹۲ | ۰/۸۸ | ۱/۳۶ | ۱/۱۲ | ۱/۰۳ | قنبریان-میلان | |
| -۳۴۴ | -۵۴۸ | -۵۸۶ | -۲۳۵ | -۲۲۱ | -۲۳۷ | -۷۰۹ | -۷۵۴ | استواری-بیگی | AIC |
| -۳۱۱ | -۵۸۲ | -۵۸۱ | -۲۲۳ | -۲۲۷ | -۱۹۵ | -۶۴۵ | -۷۶۰ | قنبریان-میلان | |

یکدیگر ندارند. در مطالعه استواری و بیگی (۱۳۹۲) نیز، هم در داده‌های اعتبارسنجی و هم در داده‌های صحت-سنجی، R^2 برای توابع پیشنهادی استواری-بیگی (۱۳۹۲)

در تابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) برای برآورد رطوبت در مکش‌های اشباع تا ۱۰۰ کیلوپاسکال، از شن به عنوان پارمتر ورودی استفاده شده است (جدول ۲). اثر درصد شن بر رطوبت ظرفیت مزرعه معنی‌دار و منفی است (شیرانی و رفیع‌نژاد، ۱۳۹۰). زیرا وجود شن به دلیل ذرات درشت، باعث ایجاد خلل و فرج بزرگ‌تر در خاک شده که مناسب برای نگهداری هوا هستند (شیرانی و رفیع‌نژاد، ۱۳۹۰). قربانی دشتکی و همکاران (۲۰۱۱) نیز اثر معنی‌دار و منفی درصد شن را در توابع انتقال رگرسیونی ایجاد شده برای تخمین رطوبت در مکش ۳۰ کیلوپاسکال (ظرفیت مزرعه) نشان دادند. با این وجود، در مطالعه راولز و پاچفسکی (۲۰۰۲)، تأثیر مثبت مقدار رس بر رطوبت FC درحدی بود که دیگر پارامترها تحت تأثیر مقدار آن، اثر خود را از دست دادند. همچنین مصدقی و محبوبی (۲۰۱۱) طی پژوهشی، توابع رگرسیونی برای نگهداشت آب در خاک را در مکش‌های مختلف ایجاد کرده و گزارش نمودند که مقدار رس، تأثیر معنی‌دار مثبتی بر رطوبت نگهداری شده از جمله رطوبت ظرفیت مزرعه توسط خاک دارد. بنابراین کارآیی بالاتر تابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) در رطوبت FC به دلیل استفاده از بعد فرکتال اجزای بافت خاک است. زیرا که در تابع سپاسخواه

به طور کلی می‌توان گفت مقدار ضریب تعیین (R^2) توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) در تمام مکش‌های مورد مطالعه، تفاوت زیادی با

پیش‌بینی از ارزیابی کمتری برخوردار است (اسکاپ، ۲۰۰۴). همچنین مقدار آماره GMER برابر یک نشان دهنده تطابق دقیق مقدار پیش‌بینی شده و مشاهده شده می‌باشد. مقدار GMER کمتر از یک، دلالت بر کم-برآوردی و GMER بیشتر از یک، دلالت بر بیش‌برآوردی مدل دارد (عباسی و همکاران، ۲۰۱۱). بر اساس آماره‌ی GMER در مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، هر دو دسته توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) مقدار رطوبت حجمی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کردند. البته مقدار این بیش‌برآوردی در توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) بیشتر از توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) بود (شکل ۲ و جدول ۴).

بر اساس هر دو آماره‌ی ME و GMER در مکش‌های صفر و ۱۰ کیلوپاسکال، توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) دارای کم‌برآوردی ناچیز بودند ولی توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) دارای بیش‌برآوردی بودند (شکل ۲ نیز مبین بیش‌برآوردی تابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) در تخمین رطوبت در مکش‌های صفر و ۱۰ کیلوپاسکال می‌باشد). همچنین در مکش‌های ۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال، توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) دارای بیش‌برآوردی ناچیزی بود در حالی که توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) رطوبت را مقداری کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد نمودند (شکل ۲ و جدول ۴). به طور کلی نتایج نشان داد توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) در مقایسه با توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) برای برآورد رطوبت حجمی خاک در مکش‌های مورد مطالعه، مقدار ارزیابی (بیش‌برآوردی/کم‌برآوردی) بیشتری از خود نشان می‌دهد.

شاخص آکائیک (AIC) تأثیر تعداد پارامترهای مدل را بر دقت نتایج مدل نشان می‌دهد (عباسی و همکاران، ۲۰۱۱). و هرچه مقدار این شاخص منفی‌تر باشد بیانگر کارایی بیشتر مدل است (عباسی و همکاران، ۲۰۱۱). مقدار شاخص AIC در برآورد رطوبت در مکش‌های صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال با استفاده از هر دو دسته توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان

و توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند. با این وجود، تنها در مکش ۵۰ کیلوپاسکال، مقدار ضریب تعیین تابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) ($R^2=0.77$) از ضریب تعیین تابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) ($R^2=0.73$) بیشتر است (جدول ۲). بایستی در نظر داشت که تعداد پارامترهای ورودی در توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) در برآورد همه نقاط منحنی مشخصه رطوبتی خاک از توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) کمتر است (جدول ۲ و ۳). از این رو، شاید یکی از دلایل زیادتر بودن ضریب R^2 توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) در برآورد رطوبت در برخی از مکش‌ها (۱۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) تعداد پارامترهای زیاد مدل‌ها باشد، در صورتی که در همان مکش‌ها سایر آماره‌های دیگر (ME, RMSE, GMER و AIC) کارایی کمتر توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) را در مقایسه با توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) نشان می‌دهد.

شیرانی و رفیع‌نژاد (۱۳۹۰) نیز نشان دادند که با افزایش تعداد پارامترهای ورودی اگرچه ضریب R^2 افزایش می‌یابد ولی کارایی توابع رگرسیونی خطی بهتر نخواهد شد. مقدار RMSE در حالت بهینه یا حالتی که مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده برابر باشند صفر است. هر اندازه مقدار RMSE کوچکتر باشد تخمین از صحت بیشتری برخوردار است (اسکاپ، ۲۰۰۴). مقدار RMSE نیز مانند R^2 تقریباً در تمام مکش‌ها برای هر دو دسته توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشت و تنها در رطوبت ظرفیت مزرعه (θ_{33})، در تابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) مقدار این آماره ($RMSE=0.1$) به طور چشمگیری از تابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) ($RMSE=0.07$) کمتر بود که بیانگر کارایی بیشتر تابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) در برآورد رطوبت ظرفیت مزرعه می‌باشد (جدول ۴).

آماره ME نشان‌دهنده وجود ارزیابی است (اسکاپ، ۲۰۰۴). مقادیر مثبت آن، تخمین بیش از مقدار واقعی و مقادیر منفی آن، تخمین کمتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد. هر اندازه آماره ME به صفر نزدیک‌تر باشد

۳۰۰ کیلوپاسکال، مقادیر شیب‌ها و عرض از مبدأها در هر دو دسته توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) به یکدیگر نزدیک بوده و تفاوت زیادی با یکدیگر نداشت (جدول ۳). درحالی‌که در مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، مقدار شیب در توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) از مقدار شیب در توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) بیشتر (به یک نزدیک‌تر) و مقدار عرض از مبدأ کمتر (به صفر نزدیک‌تر) است. در مکش ۵۰۰ کیلوپاسکال، کارایی تابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) در برآورد رطوبت حجمی خاک، از تابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) بیشتر است (شیب بیشتر و عرض از مبدأ کمتر) (جدول ۵).

(۲۰۱۰) اختلاف زیادی با یکدیگر نداشت (جدول ۴). ولی در برآورد رطوبت در مکش‌های ۱۰، ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و در مکش ۵۰۰ کیلوپاسکال، تابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) مقدار شاخص AIC کمتری را نشان می‌دهد (جدول ۴). جدول ۵، مقادیر عرض از مبدأ و شیب خطوط رگرسیونی مربوط به مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر رطوبت برآورد شده توسط توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان و میلان (۲۰۱۰) را در مکش‌های مختلف نشان می‌دهد. هرچه شیب به یک نزدیک‌تر و عرض از مبدأ به صفر نزدیک‌تر باشد، کارایی تابع زیادتر خواهد بود (استواری و بیگی، ۱۳۹۲). در مکش‌های صفر، ۱۰، ۵۰ و

جدول ۵- مقادیر عرض از مبدأ و شیب خطوط رگرسیونی داده‌های اعتبار سنجی بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط توابع انتقالی استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰)

| شیب | | عرض از مبدأ | | نقطه رطوبتی |
|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|
| استواری-بیگی | قنبریان-میلان | استواری-بیگی | قنبریان-میلان | |
| -0.1664° | -0.1681° | -0.188° | -0.158° | θ_0 |
| -0.1808° | -0.1805° | -0.098^{ns} | -0.015^{ns} | θ_{10} |
| -0.1654° | -0.277° | -0.103^{ns} | -0.270° | θ_{33} |
| $1/327^{\circ}$ | -0.1837° | -0.08^{ns} | -0.005^{ns} | θ_{50} |
| -0.1851° | -0.1874° | -0.087^{ns} | -0.007^{ns} | θ_{100} |
| -0.1498° | -0.1485° | -0.169° | -0.165° | θ_{300} |
| -0.1698° | -0.1789° | -0.214° | -0.115° | θ_{500} |
| -0.1745° | -0.1615° | -0.120° | -0.210° | θ_{1500} |

^{ns} تفاوت معنی‌دار عرض از مبدأ را نسبت به صفر و شیب را نسبت به یک نشان می‌دهد. عدم تفاوت معنی‌دار عرض از مبدأ با صفر و شیب با یک را نشان می‌دهد.

با توجه به آماره‌های ارزیابی بهتر و نیز شیب خطوط رگرسیونی بیشتر و عرض از مبدأ کمتر، توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) در تخمین رطوبت در مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال (به ترتیب متناظر با رطوبت‌های ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم) در مقایسه با توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) کارایی بیشتری داشتند. درحالی‌که تابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) در تخمین رطوبت در مکش ۵۰۰ کیلوپاسکال در مقایسه با تابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) کارایی بیشتری داشت. با این وجود، هر دو تابع

بر اساس آماره‌های ارزیابی (جدول ۴) و مقادیر شیب و عرض از مبدأ خطوط رگرسیون (جدول ۵) می‌توان بیان کرد که برای تخمین رطوبت حجمی خاک در مکش‌های صفر، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال، هر دو دسته توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) کارایی مشابهی دارند. در این مکش‌ها مقادیر آماره‌ها (R^2 ، RMSE، ME و GMER) تفاوت قابل ملاحظه و معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. همچنین مقادیر شیب و عرض از مبدأ توابع نیز بسیار به یکدیگر نزدیک بود.

حتی کارایی بیشتری نسبت به این توابع دارند. به طوری - که این توابع در مکش‌های کم، (از اشباع تا ۱۰۰ کیلوپاسکال) کارایی مشابه با توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) داشته و در مکش‌های زیاد (۵۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) کارایی بیشتری دارند. زیرا در مکش‌های زیاد، رطوبت خاک وابسته به بافت خاک (بعد فرکتال) و در مکش‌های کم، رطوبت بیشتر وابسته به ساختمان خاک است. این پژوهش نشان می‌دهد که در ایجاد توابع انتقالی با روش-های رگرسیونی چند متغیره، استفاده از تعداد زیاد پارامتر ورودی اگرچه مقدار ضریب تعیین (R^2) مدل را افزایش می‌دهد ولی به احتمال زیاد سبب افزایش کارایی مدل در تخمین نخواهد شد. به طور کلی می‌توان بیان داشت که توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) که با استفاده از داده‌های بانک اطلاعات خاک UNSODA (مربوط به خاک‌های آمریکا) توسعه یافته‌اند، برای خاک-های سایر نقاط دنیا (به‌ویژه اروپا) نیز قابل اعتماد و کاربردی هستند.

استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان-میلان (۲۰۱۰) برای تخمین رطوبت در مکش ۳۰۰ کیلوپاسکال کارایی بسیار کمی داشتند (R^2 کم، RMSE زیاد و میزان اریبی زیاد در هر دو تابع مبین این نکته است). در پتاسیل ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، رطوبت خاک بیشتر تحت تأثیر بافت خاک است. بنابراین کارایی بالاتر تابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) در برآورد این نقطه‌ی رطوبتی به دلیل استفاده از بعد فرکتال بافت خاک است. قنبریان-میلان (۲۰۰۹) رابطه‌ی بعد فرکتال را با رطوبت نقطه‌ی پژمردگی بررسی و تأثیر بسیار معنی‌دار بعد فرکتال را با این نقطه‌ی رطوبتی گزارش نمودند.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که توابع انتقالی استواری-بیگی (۱۳۹۲) در برآورد رطوبت در برخی نقاط منحنی مشخصه رطوبتی، قابل مقایسه با توابع انتقالی ارائه شده بوسیله قنبریان-میلان (۲۰۱۰) بوده و در برخی موارد

فهرست منابع

۱. استواری، ی. و بیگی، ح. ۱۳۹۲. پیشنهاد توابع انتقالی تخمین رطوبت خاک بر اساس بعد فرکتال بافت خاک. نشریه آب و خاک مشهد. ۲۷(۳): ۶۴۱-۶۳۰.
۲. رضانی، م.، قنبریان، ب.، و لیاقت، ع. ۱۳۹۰. برآورد توابع انتقالی به منظور تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاکهای شور و شور - سدیمی. مجله مدیریت آب و آبیاری. ۱(۱): ۹۹-۱۱۰.
۳. شیرانی، ح.، و رفیع‌نژاد، ن. ۱۳۹۰. برآورد برخی ویژگی‌های دیریافت خاک‌های استان کرمان با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). ۲۵(۴): ۳۵۹-۳۴۹.
۴. علیزاده، ا. ۱۳۸۳. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۴۳۹ صفحه.
5. Abbasi, Y., B. Ghanbarian-Alavijeh., A.M. Liaghat., and M. Shorafa. 2011. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran. *Pedosphere*. 21: 230-237.
6. Ghanbarian-Alavijeh, B., and H. Millán. 2009. The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point. *Geoderma*. 151: 224-23.
7. Ghanbarian-Alavijeh, B., and H. Millan. 2010. Point pedotransfer functions for estimating soil water retention curve. *International Agrophysics*. 24: 243-251.
8. 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.) *Euro Soil*. September 4-12, 2004. Freiburg, Germany. 10: 1-10.

9. Ghorbani-Dashtaki, Sh., M. Homaei., and H. Khodaverdiloo. 2011. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*. 26: 68–74.
10. Khodaverdiloo, H., M. Homaei., M.T. Van Genuchten., and Sh. Ghorbani Dashtaki. 2011. Deriving and Validating Pedotransfer Functions for some Calcareous Soils. *Journal of Hydrology*. 399: 93-99.
11. Mosaddeghi, M.R., and A.A. Mahboubi. 2011. Point pedotransfer functions for prediction of water retention of selected soil series in a semi-arid region of western Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 57: 327-342.
12. Rawls, W.J. and Y.A. Pachepsky. 2002. Soil consistence and structure as predictors of Schaap MG, Leij FJ and Van Genuchten M Th. (2001) Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Hydrology*. 251: 163-176.
13. Schaap, M.G. 2004. Accuracy and uncertainty in PTF predictions. Chapter 3 In: Pachepsky, Y. and Rawls, W.J. (Eds). *Developments in Soil Science*. Volume 30. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Elsevier Science, Pp: 33-46.
14. Sepaskhah, A.R. and A. Tafteh. 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: 93-103.
15. Shirazi, M.A., and L. Boersma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*. 48: 142–147.
16. Tomasella, J., Y.A. Pachepsky., S. Crestana., and W.J. Rawls. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal*. 67: 1085-1092.