



دانشگاه گورگان و منابع طبیعی

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد نوزدهم، شماره دوم، ۱۳۹۱  
<http://jwfst.gau.ac.ir>

## اعتبارسنجی و مقایسه چند تابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک برای پیش‌بینی میزان رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک مختلف

امیر حق‌وردی<sup>۱</sup>، \*بیژن قهرمان<sup>۲</sup>، علی اصغر خشنود یزدی<sup>۳</sup>، محمد جلیلی<sup>۴</sup> و زهرا عربی<sup>۵</sup>  
<sup>۱</sup> دانشجوی دوره دکتری گروه آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه فردوسی مشهد، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی  
مشهد، <sup>۲</sup> مربی گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۳</sup> استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی،  
<sup>۴</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران  
تاریخ دریافت: ۸۸/۱۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۷/۲۰

### چکیده

استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مستقیم عوامل هیدرولوژیک خاک، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. یکی از مهم‌ترین راه‌کارهای موجود برای حل این مشکل ایجاد یک رابطه ریاضی بین تعدادی از خصوصیات زودیافت خاک مانند بافت خاک، چگالی ظاهری و میزان ماده آلی با خصوصیات دیر یافت هیدرولیکی خاک می‌باشد. این روابط توابع انتقالی نام دارند. در این پژوهش از ۸ تابع نقطه‌ای و ۴ تابع پارامتریک برای پیش‌بینی میزان رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک مختلف در ۱۲۲ نمونه خاک از شمال و شمال‌شرقی ایران استفاده گردید. توابع انتقالی پارامتریک ضرایب چهار رابطه نگه‌داشت آب خاک و نگونختن، هاستون و کاس، کمپل و بروکس و کوری را برآورد می‌کردند. بهترین نتایج توابع نقطه‌ای مربوط به روش بی.اس.اس خاک سطحی (با متغیرهای ورودی عمق نمونه‌برداری، درصد ذرات خاک، میزان کربن آلی و وزن مخصوص ظاهری) با ضریب همبستگی ( $r$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب برابر ۰/۷۵ و ۰/۰۳۳ و ضعیف‌ترین نتایج در روش هاستون (با متغیرهای ورودی عمق نمونه‌برداری، درصد ذرات خاک و وزن مخصوص ظاهری) با  $r$  و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۵۹ و ۰/۰۶۱ به دست آمد. بهترین نتایج توابع پارامتریک در روش کمپل با  $r$  و RMSE به ترتیب برابر با

\* مسئول مکاتبه: [bijanghahreman@yahoo.com](mailto:bijanghahreman@yahoo.com)

۰/۹۰ و ۰/۳۷ و ضعیف‌ترین نتایج در روش وریکن با  $r$  و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۵۲ و ۰/۱۲ مشاهده شد. علاوه بر این تحلیل‌ها نشان دادند که استفاده از میزان کربن آلی به عنوان عامل ورودی در توابع انتقالی می‌تواند منجر به بهبود نتایج پیش‌بینی میزان رطوبت خاک شود. همچنین به‌طور تقریبی در همه توابع بررسی شده با افزایش پتانسیل ماتریک عملکرد توابع بهبود یافت.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، شمال و شمال شرق ایران، منحنی مشخصه رطوبتی

#### مقدمه

عوامل هیدرولوژیکی خاک برای بیش‌تر مدل‌هایی که در علوم مرتبط با آب، خاک و کشاورزی تهیه شده و توسعه یافته‌اند، جزو نمایه‌های ورودی مهم و مورد نیاز می‌باشد (دوناتولی و اکوتیس، ۲۰۰۱). از آنجایی که روش‌های معمول آزمایشگاهی تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است، از سال‌ها پیش پژوهش‌گران در پی ارائه روش‌های کم‌هزینه‌تر بوده‌اند (فولادمند و همکاران، ۲۰۰۴). توابع انتقالی می‌توانند خصوصیات دیریافت خاک را با استفاده از خصوصیات ساده‌تری که به آسانی و با هزینه کم و در مدت زمان کم قابل استحصال می‌باشند، تعیین نمایند (مک‌برانتی و همکاران، ۲۰۰۲). نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که تخمین کارکرد توابع انتقالی به‌طور عموم به برآورد نقاط نگهداشت آب و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک محدود می‌شود (نمس و همکاران، ۲۰۰۳).

توابع نقطه‌ای میزان رطوبت را در نقاط پتانسیلی خاصی برآورد می‌کنند. از طرف دیگر توابع پارامتریک عوامل یک رابطه تحلیلی با فرم بسته مانند معادله بروکس و کوری (۱۹۶۴) و معادله ونگنوختن (۱۹۸۰) را تعیین می‌نمایند که با کمک آن‌ها می‌توان میزان رطوبت را در هر میزان مکش برآورد نمود. در سالیان گذشته کوشش‌های زیادی شده است تا توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک توسط روش‌های گوناگونی همانند روش‌های رگرسیون (مردون و همکاران، ۲۰۰۶؛ میناسنی و همکاران، ۱۹۹۹؛ وستن و همکاران، ۱۹۹۹؛ کرن، ۱۹۹۵؛ آمبروزی و همکاران، ۱۹۹۲) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (بیکر و الیسون، ۲۰۰۸؛ مردون و همکاران، ۲۰۰۶؛ نمس و همکاران، ۲۰۰۶؛ شاپ و همکاران، ۱۹۹۹؛ شاپ و لچی، ۱۹۹۸a؛ شاپ و همکاران، ۱۹۹۸b) مدل‌سازی شوند. کیفیت

پیش‌بینی توابع انتقالی وابسته به مجموعه داده‌هایی است که برای اشتقاق آن‌ها استفاده می‌شود (شاپ و لچی، ۱۹۹۸b). بنابراین باید کارایی توابعی که در نقاط مختلف دنیا ارایه شده‌اند برای داده‌های محلی مورد سنجش قرار گیرد. بررسی منابع نشان می‌دهد که بسیاری از پژوهش‌هایی که به بررسی توابع انتقالی پرداخته‌اند تحلیل جامعی را که شامل مقایسه توابع نقطه‌ای و پارامتریک باشد ارایه نداده‌اند. به این معنی که در بیش‌تر آن‌ها برای اشتقاق توابع پارامتریک به‌طور عمده رابطه ونگنوختن در نظر گرفته شده است و سایر روابط نگه‌داشت آب خاک هم‌چون هاستون و کاس، کمپل و بروکس و کوری کم‌تر مورد استفاده قرار گرفته است. از طرفی به‌طور عمده مقایسه‌ای بین کارکرد توابع نقطه‌ای و پارامتریک انجام نشده است و در بیش‌تر محدود به‌میزان رطوبت‌ها در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دایم می‌باشد (مانیاما و همکاران، ۲۰۰۷؛ گیوی و همکاران ۲۰۰۴). از این نظر انجام تحلیلی جامع که توابع انتقالی برآوردکننده عوامل چندین رابطه نگهداشت آب خاک را در پتانسیل‌های مختلف در نظر بگیرد و کارایی آن‌ها را با توابع معروف نقطه‌ای موجود نیز مقایسه نماید ضروری می‌باشد. به این دلیل هدف اصلی این پژوهش انجام تحلیلی جامع بر روی نمونه خاک‌های شمال و شمال‌شرق کشور می‌باشد به‌گونه‌ای که مقایسه بین توابع نقطه‌ای موجود و توابع پارامتریک چندین رابطه در پتانسیل‌های مختلف انجام شود.

به‌طورکلی، ارزش‌گذاری عملکرد توابع پارامتریک به دو روش عمده و متفاوت صورت می‌پذیرد که به هر دو روش دارای اشکالاتی جدی است. در روش اول میزان هم‌خوانی ضرایب به‌دست آمده از تابع انتقالی با ضرایب به‌دست آمده از یک فرایند بهینه‌سازی مبنای قضاوت قرار می‌گیرد. اشکال عمده این روش توجه نداشتن به تفاوت رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط ضرایب مربوطه می‌باشد. به‌عبارت بهتر هیچ دلیلی وجود ندارد که نزدیکی ضرایب به ضرایب بهینه به معنی پیش‌بینی دقیق میزان رطوبت خاک باشد. در روش دوم، تفاوت رطوبت به‌دست آمده توسط ضرایب به‌دست آمده از توابع انتقالی با میزان اندازه‌گیری شده ملاک قضاوت قرار می‌گیرد. اشکال این روش آن است که کارکرد واقعی روابط نگه‌داشت آب خاک با ضرایب بهینه‌سازی شده را در نظر نمی‌گیرد. از این نظر نکته‌ای که باید در هنگام استفاده از یک تابع انتقالی برآوردکننده عوامل یک مدل تحلیلی به آن توجه داشت، کارکرد واقعی خود آن رابطه می‌باشد. به‌عنوان نمونه هرگاه رابطه ونگنوختن برای یک نمونه خاک با ضرایبی که از روش‌های بهینه‌سازی تعیین شده است عملکردی خوب نداشته باشد

هیچ‌گاه نمی‌توان انتظار داشت که استفاده از یک تابع انتقالی که خصوصیات پایه‌ای خاک را به ضرایب رابطه ونگنوختن مرتبط می‌سازد برای آن نمونه خاک نتیجه خوبی را در بر داشته باشد. به عبارت دیگر این تابع ممکن است عملکردی بسیار مطلوب در برآورد ضرایبی نزدیک به ضرایب به دست آمده از روش‌های بهینه‌سازی داشته باشد، ولی پیش‌بینی‌های خوبی از میزان رطوبت خاک ارائه نکند. بنابراین هدف دوم این مقاله پیشنهاد روشی نوین برای ارزش‌گذاری و رتبه‌بندی توابع انتقالی پارامتریک می‌باشد که براساس تفاوت عملکرد رابطه یاد شده با ضرایب بهینه‌سازی شده و با ضرایب به دست آمده از توابع انتقالی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

نمونه‌های خاک مورد استفاده: ۱۲۲ نمونه خاک برای انجام این پژوهش از مناطق آمل و بابل (۱۸ نمونه)، کرج (۳۲ نمونه) و بجنورد (۷۲ نمونه) انتخاب شد (خوشنود یزدی، ۱۹۹۱؛ عربی، ۲۰۰۴). از زمین‌های مختلف مناطق آمل، بابل و کرج ۵۰ نمونه خاک دست‌نخورده و دست‌خورده افق سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) انتخاب شد. نمونه‌برداری‌ها در نیمه دوم فصل بهار و به صورت چهار گوشه‌بندی معمولی انجام گرفت. نمونه‌های دست‌خورده خاک پس از خشک شدن در هوا و عبور از الک ۲ میلی‌متری برای انجام آزمایش‌ها آماده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری و میزان ماده آلی به روش اکسایش تر پس از حذف آهک و مواد آلی تعیین شد (یو.اس.دی.ای، ۱۹۸۲). رطوبت وزنی خاک‌های دست‌نخورده در پتانسیل‌های ماتریک ۱۵۰۰-، ۵۰۰-، ۱۰۰-، ۳۳- و ۵- کیلوپاسکال با استفاده از صفحات فشاری در ۳ تکرار اندازه‌گیری شد. جرم مخصوص حقیقی همه نمونه‌های خاک ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. علاوه بر این ۷۲ سری داده نیز از شمال شرق کشور مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌برداری‌ها به صورت زیگزاگ انجام شد و بافت خاک به روش هیدرومتری و میزان رطوبت با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در ۳ تکرار و در مکش‌های ۱۵۰۰-، ۱۰۰۰-، ۷۰۰-، ۴۰۰-، ۱۰۰- و ۳۳- کیلوپاسکال تعیین گردیده بود (عربی، ۲۰۰۴). جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک‌ها را به صورت آماری نشان می‌دهد. میزان کربن آلی معادل ۵۸ درصد کل مواد آلی در نظر گرفته شد (شاماچر، ۲۰۰۲).

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده.

| عوامل*      | داده‌های کرج (n=32) |      |      |     | داده‌های آمل و بابل (n=18) |      |      |     | داده‌های بجنورد (n=22) |      |      |     |
|-------------|---------------------|------|------|-----|----------------------------|------|------|-----|------------------------|------|------|-----|
|             | Mean                | Min  | Max  | SD  | Mean                       | Min  | Max  | SD  | Mean                   | Min  | Max  | SD  |
| شن          | ۴۰/۲                | ۲۲/۰ | ۵۶/۸ | ۸/۰ | ۳۴/۳                       | ۱۴/۷ | ۵۰/۰ | ۹/۳ | ۳۹/۲                   | ۱۰/۲ | ۷۷/۲ | ۹/۳ |
| سیلت        | ۳۴/۰                | ۲۷/۴ | ۵۰/۰ | ۵/۱ | ۳۴/۷                       | ۲۷/۲ | ۵۷/۰ | ۶/۱ | ۴۲/۱                   | ۱۴/۶ | ۵۹/۶ | ۶/۱ |
| رس          | ۲۵/۹                | ۱۴/۰ | ۴۰/۸ | ۶/۶ | ۳۰/۳                       | ۱۸/۰ | ۵۶/۰ | ۸/۷ | ۱۸/۷                   | ۸/۲  | ۳۳/۲ | ۸/۷ |
| کربن آلی    | ۰/۲                 | ۰/۲  | ۱/۰  | ۰/۲ | ۱/۲                        | ۰/۷  | ۱/۸  | ۰/۳ | ۰/۶                    | ۰/۱  | ۱/۴  | ۰/۳ |
| چگالی ظاهری | ۱/۵                 | ۱/۴  | ۱/۶  | ۰/۱ | ۱/۵                        | ۱/۴  | ۱/۵  | ۰/۰ | ۱/۴                    | ۱/۴  | ۱/۵  | ۰/۰ |
| ۰.۰۱        | ۵۴/۶                | ۴۶/۶ | ۶۶/۳ | ۵/۱ | ۶۲/۲                       | ۵۴/۶ | ۷۸/۵ | ۶/۴ | -                      | -    | -    | -   |
| ۰.۰۵        | ۴۰/۷                | ۳۳/۰ | ۴۹/۱ | ۳/۹ | ۴۴/۰                       | ۳۷/۱ | ۵۵/۳ | ۴/۲ | -                      | -    | -    | -   |
| ۰.۱۳        | ۲۹/۵                | ۲۰/۰ | ۳۵/۷ | ۳/۶ | ۳۳/۲                       | ۲۵/۲ | ۳۹/۷ | ۴/۱ | ۳۰/۳                   | ۲۲/۲ | ۳۸/۱ | ۴/۱ |
| ۰.۲۵        | ۳۳/۸                | ۱۶/۳ | ۳۱/۳ | ۳/۱ | ۲۷/۴                       | ۲۲/۳ | ۳۵/۱ | ۳/۷ | ۳۶/۶                   | ۱۹/۲ | ۳۶/۲ | ۳/۷ |
| ۰.۴۰        | -                   | -    | -    | -   | -                          | -    | -    | -   | ۲۲/۲                   | ۱۶/۱ | ۲۷/۸ | -   |
| ۰.۵۰        | ۱۸/۱                | ۱۱/۵ | ۳۳/۹ | ۲/۷ | ۲۰/۷                       | ۱۵/۲ | ۲۷/۶ | ۳/۰ | -                      | -    | -    | -   |
| ۰.۷۰        | -                   | -    | -    | -   | -                          | -    | -    | -   | ۱۷/۲                   | ۱۱/۱ | ۳۳/۱ | -   |
| ۰.۱۰۰       | -                   | -    | -    | -   | -                          | -    | -    | -   | ۱۵/۷                   | ۹/۶  | ۲۱/۵ | -   |
| ۰.۱۵۰       | ۱۵/۴                | ۹/۳  | ۳۰/۹ | ۴/۱ | ۱۸/۶                       | ۱۴/۷ | ۳۶/۹ | ۳/۰ | ۱۴/۶                   | ۸/۴  | ۲۰/۱ | ۳/۰ |

SD: انحراف استاندارد، Max: بیش‌ترین، Min: کم‌ترین، Mean: میانگین (درصد) و n: تعداد نمونه‌های خاک می‌باشد.  
 \*\* منظور از  $\sigma_p$  میزان رطوبت خاک در پتانسیل  $p$  کیلوپاسکال می‌باشد.

توابع نقطه‌ای و پارامتریک مورد استفاده: برای انجام این پژوهش توابع انتقالی برای چهار رابطه متفاوت: ونگنوختن (رابطه ۱)، کمپل (۱۹۷۴) (رابطه ۲)، هاستون-کاس (۱۹۸۷) (مشهور به بروکس و کوری بهبودیافته؛ نقل از گیوی و همکاران، ۲۰۰۴) (رابطه‌های ۳، ۴ و ۵) و بروکس و کوری (رابطه‌های ۶ و ۷) در نظر گرفته شدند.

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right)^m \quad (1)$$

که در آن،  $\theta(h)$ : میزان رطوبت (مترمکعب بر مترمکعب) در پتانسیل ماتریک  $h$ ،  $\theta_r$ : رطوبت باقی‌مانده،  $\theta_s$ : رطوبت اشباع و  $m$  و  $n$  ضرایب رابطه می‌باشند.

$$\theta(h) = \frac{\theta_s}{\sqrt[b]{h_m/h_e}} \quad (2)$$

که در آن،  $h_m$ : پتانسیل ماتریک و  $h_e$ : مکش ورود هوا و  $b$ : ضریب رابطه می‌باشد. رابطه برای  $h < h_e$  استفاده می‌شود.

$$(a) \quad \theta = \theta_i, \quad \theta_i = \frac{\gamma b \theta_s}{1 + \gamma b} \quad (3)$$

$$(b) \quad \theta \leq \theta_i, \quad \theta = \theta_s \left( \frac{h}{a} \right)^{-\gamma/b} \quad (4)$$

$$(c) \quad \theta \geq \theta_i, \quad \theta = \theta_s - \left[ \frac{\theta_s h^\gamma (1 - (\theta_i/\theta_s))}{a^\gamma (\theta_i/\theta_s)^{-\gamma b}} \right] \quad (5)$$

که در آن،  $\theta_i$ : میزان رطوبت در یک نقطه تطابق و  $a$  و  $b$  ضرایب برازش می‌باشند.

$$(a) \quad h \geq h_b, \quad \theta(h) = \theta_s \quad (6)$$

$$(b) \quad h < h_b, \quad \theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) (h_b/h)^\lambda \quad (7)$$

که در آن،  $h_b$ : مکش ورود هوا و  $\lambda$ : نمایه توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد.

توابع پارامتریک و نقطه‌ای مورد استفاده برای برآورد عوامل رابطه‌های گفته شده و همچنین عوامل مورد نیاز برای هر تابع انتقالی و خروجی آن تابع در جدول ۲ نشان داده شده است. در تمامی آن‌ها از فن‌آوری رگرسیون خطی چندگانه برای برآورد مؤلفه‌های مختلف استفاده شده است. میزان رطوبت در مقادیر ظرفیت مزرعه<sup>۱</sup> و نقطه پژمردگی دائم<sup>۲</sup> برابر رطوبت در پتانسیل‌های ۳۳- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال فرض شد. در توابع نقطه‌ای میزان رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد. همچنین برای آن دسته از توابع نقطه‌ای که در مکش‌های دیگری نیز میزان رطوبت را شبیه‌سازی می‌کردند، با توجه به پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده در مناطق مختلف، حالت‌های خاصی در نظر گرفته شد. به این ترتیب که علاوه بر رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم رطوبت در پتانسیل ۱۰۰- کیلوپاسکال در روش‌های هاستون و براکنسیک و رطوبت در پتانسیل ۵- کیلوپاسکال در روش‌های بی.اس.اس خاک زیرین و بی.اس.اس خاک سطحی و همچنین رطوبت در پتانسیل ۱۰۰۰- کیلوپاسکال در روش براکنسیک، شبیه‌سازی گردید. در توابع پارامتریک برای همه پتانسیل‌های موجود شبیه‌سازی انجام شد. پس از تعیین مؤلفه‌های توابع پارامتریک و به‌منظور سنجش میزان کارایی توابع انتقالی موجود در برآورد مؤلفه‌های مختلف این رابطه‌ها، با استفاده از داده‌های واقعی نیز این مؤلفه‌ها طی یک فرایند بهینه‌سازی تعیین شدند و نتایج به‌دست آمده با یکدیگر مقایسه گردیدند.

از شاخص‌های کمی، ریشه میانگین مربعات خطا (رابطه ۸) و ضریب همبستگی (رابطه ۹) برای مقایسه توابع مختلف استفاده شد. علاوه بر این برای تحلیل هم‌زمان بر روی همه نمونه‌ها، شیب و عرض از مبدا خط برازش داده شده و آماره‌های اریب شبیه‌سازی شده (رابطه ۱۰) و میانگین مربعات خطای نرمال شده (رابطه ۱۱) نیز تعیین شدند. برای ارزیابی عملکرد توابع پارامتریک از نمایه «باقی‌مانده»<sup>۳</sup> (رابطه ۱۲) استفاده شد که بیانگر تفاوت بین میزان رطوبت پیش‌بینی شده توسط ضرایب به‌دست آمده از توابع انتقالی و همچنین رطوبت به‌دست آمده از ضرایب به‌دست آمده توسط بهینه‌سازی می‌باشد. در تعریف این آماره فرض شده است که بهترین نتایجی که از هر رابطه نگه‌داشت آب خاک می‌تواند به‌دست آید با استفاده از ضرایب تعیین شده در روش بهینه‌سازی می‌باشد. بنابراین

- 
- 1- Field Capacity, FC
  - 2- Permant Wilting Point, PWP
  - 3- Residual, RES

میزان نزدیکی نتایج توابع انتقالی به این نتایج باید ملاک ارزیابی عملکرد توابع پارامتریک باشد. به عبارت بهتر با استفاده از این آماره مشخص می‌شود که یک تابع انتقالی پارامتریک تا چه حد توانسته است به عملکرد بیشینه رابطه مربوطه نزدیک شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad (9)$$

که در آن،  $M$ : بیانگر مقادیر واقعی رطوبت در مکش‌های مختلف،  $E$ : مقادیر تخمینی،  $\bar{M}$ : میانگین مقادیر واقعی،  $\bar{E}$ : میانگین مقادیر تخمینی،  $n$ : تعداد داده‌ها،  $i$ : شمارشگر،  $R$ : ضریب همبستگی و  $RMSE$ : ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد.

$$SB = (\bar{E} - \bar{M})^2 \quad (10)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n E_i M_i} \quad (11)$$

$$RES = \theta_{PTF} - \theta_{Opt} \quad (12)$$

که در آن،  $SB$ : بیانگر اریب شبیه‌سازی شده،  $NMSE$ : میانگین مربعات خطای نرمال شده،  $\theta_{PTF}$ : میزان رطوبت پیش‌بینی شده به وسیله هر رابطه نگاه‌داشت آب خاک با استفاده از ضرایب به دست آمده توسط توابع انتقالی و  $\theta_{Opt}$  با استفاده از ضرایب به دست آمده از حالت بهینه‌سازی می‌باشند. برای توسعه و بررسی توابع انتقالی موجود و همچنین انجام فرایند بهینه‌سازی به منظور مشخص نمودن ضرایب رابطه‌ها از نرم‌افزارهای  $SOILPAR2$  و  $IRENE.1$  به ترتیب ارایه شده توسط دوناتلی و آکوئیس (۲۰۰۱) و فیلا و همکاران (۲۰۰۲) و نرم‌افزار Excel استفاده شد.



جدول ۲- توابع انتقالی مورد استفاده در این پژوهش.

| منبع                   | نام تابع            | نوع تابع  | متغیرهای مورد نیاز*  | عوامل تخمینی**                    |
|------------------------|---------------------|-----------|----------------------|-----------------------------------|
| آکوتیس و دوناتلی، ۲۰۰۳ | باومار              | نقطه‌ای   | D, SSC, OC           | $\rho_b, FC, PWP$                 |
| هاستون و واگنت، ۱۹۹۲   | براکنسیک            | نقطه‌ای   | D, SSC, OC, $\rho_b$ | SWC                               |
| هاستون و واگنت، ۱۹۹۲   | بی.اس.اس خاک زیرین  | نقطه‌ای   | D, SSC, OC, $\rho_b$ | SWC                               |
| هاستون و واگنت، ۱۹۹۲   | بی.اس.اس خاک سطحی   | نقطه‌ای   | D, SSC, OC, $\rho_b$ | SWC                               |
| آکوتیس و دوناتلی، ۲۰۰۳ | ای.پی.ای.سی         | نقطه‌ای   | D, SSC, $\rho_b$     | FC, PWP                           |
| هاستون و واگنت، ۱۹۹۲   | هاستون              | نقطه‌ای   | D, SSC, $\rho_b$     | SWC                               |
| آکوتیس و دوناتلی، ۲۰۰۳ | مانریک              | نقطه‌ای   | D, SSC, $\rho_b$     | FC, PWP                           |
| آکوتیس و دوناتلی، ۲۰۰۳ | راولز- آی.اس. دیلیو | نقطه‌ای   | D, SSC               | $\rho_b, FC, PWP$                 |
| کمپل، ۱۹۸۵             | کمپل                | پارامتریک | D, SSC, $\rho_b$     | Ks, a, b, FC, PWP                 |
| مایر و جارویس، ۱۹۹۹    | مایر                | پارامتریک | D, SSC, OC, $\rho_b$ | a, b (modified)                   |
| راولز و براکنسیک، ۱۹۸۹ | راولز               | پارامتریک | D, SSC, $\rho_b$     | $\lambda, h, \theta_r$            |
| وریکن و همکاران، ۱۹۸۹  | وریکن               | پارامتریک | D, SSC, $\rho_b$     | m, n, $\alpha, \theta_r, FC, PWP$ |

\* OC: میزان کربن آلی (درصد)، SSC: درصد شن، سیلت و رس، D: عمق نمونه‌برداری (سانتی‌متر) و  $\rho_b$ : جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) خاک می‌باشند.

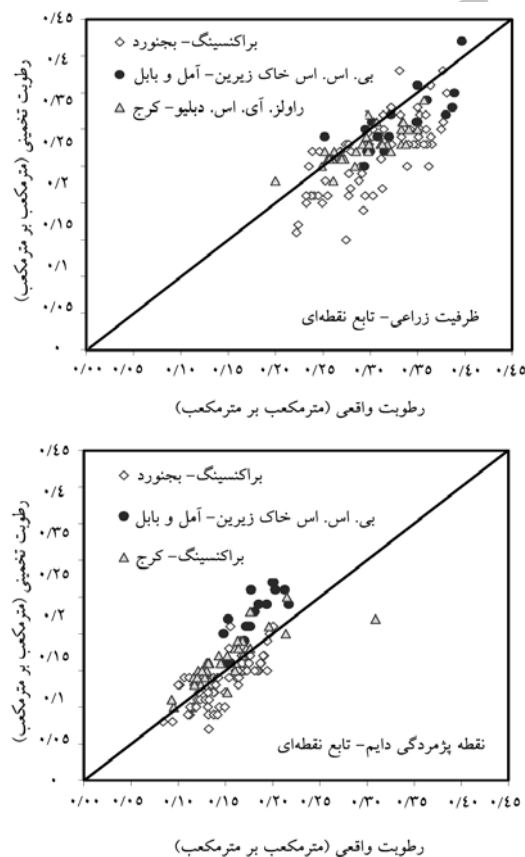
\*\* FC: میزان رطوبت در ظرفیت زراعی (درصد)، PWP: در نقطه پژمردگی دائم (درصد)، SWC: رطوبت در مکش‌های مختلف (درصد)، a و b: عوامل معادله کمپل، a, b (modified): معادله هاتسون و کاس،  $\theta_r, h$  و  $\lambda$ : معادله بروکس و کوری و m, n,  $\alpha$  و  $\theta_r$ : معادله ونگنوختن می‌باشند.

### نتایج و بحث

توابع انتقالی نقطه‌ای: نتایج به‌دست آمده از به‌کارگیری توابع انتقالی نقطه‌ای مختلف در نمونه‌های خاک مناطق ذکر شده در جدول ۳ و همچنین پراکنش بهترین نتایج حول خط ۱:۱ در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. نتایج نمایان‌گر هماهنگی روابط و توابع ارایه شده در تعیین میزان رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم خاک‌های مناطق مورد مطالعه است. همچنین بهترین نتایج پیش‌بینی رطوبت خاک در پتانسیل‌های ۱۰۰- کیلوپاسکال به‌وسیله توابع انتقالی نقطه‌ای در آمل و بابل به‌وسیله روش هاستون با ضریب همبستگی ۰/۸۱ و خطای ۰/۰۳ و در کرج به‌وسیله روش براکنسیک با ضریب همبستگی ۰/۸۴ و خطای ۰/۰۲ به‌دست آمد. روش هاستون در هر دو منطقه در پتانسیل

۱۰۰- کیلوپاسکال بیش برآورد داشت. هر دو تابع بی.اس.اس خاک زیرین و بی.اس.اس خاک سطحی در پتانسیل ۵- کیلوپاسکال نتایج ضعیفی در مناطق مورد آزمایش آمل و بابل و کرج داشتند. در داده‌های بجنورد در پتانسیل ۱۰۰- روش براکنسیک با ضریب همبستگی  $0/63$  و خطای  $0/63$  بهترین نتیجه را داشت و در پتانسیل ۱۰۰۰- روش براکنسیک ضریب همبستگی  $0/78$  و خطای  $0/23$  را داشت. همچنین در میان توابع انتقالی نقطه‌ای مورد استفاده برای پیش‌بینی میزان رطوبت خاک، نظر به میزان خطا و ضریب همبستگی (جدول ۳) در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دایم در آمل و بابل بهترین نتایج متعلق به تابع بی.اس.اس خاک زیرین و بدترین نتایج متعلق به توابع هاستون و مانریک بود، هر چند بی.اس.اس خاک زیرین تا حدی بیش برآورد داشت (شکل ۱). در منطقه کرج در نقطه ظرفیت زراعی به‌طور تقریبی همه توابع نتایج مناسب و یکسانی داشتند و تنها مانریک نتایج ضعیفی داشت. در نقطه پژمردگی دایم نیز به‌طور تقریبی همه توابع عملکرد مناسبی داشتند و تنها در روش هاستون نتایج ضعیف‌تری نسبت به سایر روش‌ها داشت. در منطقه بجنورد روش براکنسیک بهترین نتایج و روش هاستون ضعیف‌ترین نتایج را در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دایم از خود نشان داد. میانگین نتایج همه توابع به‌کار رفته نشان داد که در ظرفیت زراعی بهترین نتایج در منطقه کرج و در نقطه پژمردگی دایم در مناطق آمل- بابل به‌دست آمد و به‌طور کلی نتایج مناطق آمل- بابل و کرج از بجنورد بهتر بود. همچنین میانگین نتایج هر کدام از روش‌ها در هر دو نقطه پتانسیلی ظرفیت زراعی و پژمردگی دایم در هر سه منطقه مشخص نمود که بهترین نتایج در روش‌های بی.اس.اس خاک زیرین و بی.اس.اس خاک سطحی و براکنسیک و ضعیف‌ترین نتایج در هاستون و مانریک به‌دست آمدند. عملکرد مطلوب توابع بی.اس.اس خاک زیرین و بی.اس.اس خاک سطحی و براکنسیک برای تخمین رطوبت خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دایم توسط گیوی و همکاران (۲۰۰۴) نیز گزارش شده بود به‌گونه‌ای که میزان همبستگی در نقطه پژمردگی دایم در سه روش گفته شده به‌صورت میانگین  $0/73$  و در نقطه ظرفیت زراعی برابر با  $0/49$  بود. نتایج برتر این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط گیوی و همکاران (۲۰۰۴) به‌طور احتمالی مرتبط با شباهت بیش‌تر خاک‌های استفاده شده در توسعه توابع یاد شده با نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که هرچه خاک‌ها همگن‌تر باشند نتایج بهتر خواهد شد. همچنین به‌نظر می‌رسد قوت و ضعف نتایج توابع نقطه‌ای تا حد زیادی وابسته به نمایه کرین آلی به‌عنوان ورودی باشد. به‌عبارت بهتر، توابعی که از میزان کرین آلی به‌عنوان ورودی بهره گرفته بودند (جدول ۲)، به‌طور عموم نتایج بهتری نسبت

به دیگر توابع داشتند (جدول ۳). این امر در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است (کرن، ۱۹۹۵؛ آمبروزی و همکاران ۱۹۹۲). در مناطق مورد مطالعه حدود ۸۵ درصد از خاک‌های مناطق آمل، بابل و کرج لومی رسی و لومی بود در حالی‌که در نمونه‌های خاک بجنورد ۴۵ درصد لومی سیلتی و لومی شنی و ۲۴ درصد لومی بود. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که تفاوت در بافت خاک‌ها می‌تواند عامل مهمی در نتایج متفاوت در مناطق مختلف باشد. به‌عنوان مثال در تابع باومار در نقطه ظرفیت زراعی در منطقه بجنورد ضریب همبستگی،  $0/71$  است (جدول ۳) در حالی‌که تفکیک بافت خاک‌ها، مقادیر  $0/3$  و  $0/56$  را به ترتیب برای بافت‌های لومی شنی و لومی سیلتی نشان می‌دهد.



شکل ۱- پراکنش بهترین نتایج برای توابع نقطه‌ای در مناطق آمل و بابل، کرج و بجنورد در نقاط FC و PWP حول خط ۱:۱.

جدول ۳- نتایج برآورد رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم با استفاده از توابع انتقالی منطقه‌ای انتخابی.

| نوع انتقالی*         | منطقه کرج    |       |             |       |              |       | منطقه آمل و بابل |       |              |       |             |       |
|----------------------|--------------|-------|-------------|-------|--------------|-------|------------------|-------|--------------|-------|-------------|-------|
|                      | پژمردگی دائم |       | ظرفیت زراعی |       | پژمردگی دائم |       | ظرفیت زراعی      |       | پژمردگی دائم |       | ظرفیت زراعی |       |
|                      | r            | RMSE  | r           | RMSE  | r            | RMSE  | r                | RMSE  | r            | RMSE  | r           | RMSE  |
| پاوماز               | ۰/۷۱         | ۰/۰۳۱ | ۰/۷۰        | ۰/۰۴۷ | ۰/۷۶         | ۰/۰۳۷ | ۰/۷۶             | ۰/۰۳۱ | ۰/۹۱         | ۰/۱۵۸ | ۰/۶۹        | ۰/۰۲۵ |
| براکسیک              | ۰/۷۴         | ۰/۰۲۴ | ۰/۷۱        | ۰/۰۵۲ | ۰/۷۶         | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۲۷            | ۰/۸۹  | ۰/۱۵۵        | ۰/۷۱  | ۰/۰۳۳       | ۰/۰۳۳ |
| بی.اس.اس خاک زیرین   | ۰/۷۲         | ۰/۰۳۰ | ۰/۷۰        | ۰/۰۵۷ | ۰/۷۹         | ۰/۰۵۹ | ۰/۰۳۰            | ۰/۹۲  | ۰/۱۲۷        | ۰/۷۶  | ۰/۰۳۴       | ۰/۰۳۴ |
| بی.اس.اس خاک سطحی    | ۰/۷۱         | ۰/۰۲۶ | ۰/۷۰        | ۰/۰۳۴ | ۰/۷۹         | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۴۱            | ۰/۹۲  | ۰/۱۶۹        | ۰/۷۱  | ۰/۰۳۹       | ۰/۰۳۹ |
| ای.بی.ای.سی          | ۰/۶۸         | ۰/۰۳۲ | ۰/۷۱        | ۰/۰۴۳ | ۰/۷۳         | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۲۵            | ۰/۸۹  | ۰/۱۵۳        | ۰/۶۷  | ۰/۰۳۱       | ۰/۰۳۱ |
| هاستون               | ۰/۵۸         | ۰/۰۸۹ | ۰/۴۹        | ۰/۰۴۲ | ۰/۷۱         | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۳۲            | ۰/۵۸  | ۰/۱۴۸        | ۰/۶۵  | ۰/۰۳۱       | ۰/۰۳۱ |
| مانتریک              | ۰/۷۱         | ۰/۰۵۶ | ۰/۶۲        | ۰/۰۹۵ | ۰/۴۶         | ۰/۰۴۲ | ۰/۰۸۴            | ۰/۷۱  | ۰/۰۴۸        | ۰/۵۴  | ۰/۱۰۶       | ۰/۱۰۶ |
| راولز- آی. اس. دبلیو | ۰/۷۱         | ۰/۰۵۳ | ۰/۷۰        | ۰/۰۵۲ | ۰/۷۹         | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۲۸            | ۰/۸۸  | ۰/۱۲۰        | ۰/۷۲  | ۰/۰۴۰       | ۰/۰۴۰ |

\* نمادها براساس جدول ۲ می‌باشد.

**توابع انتقالی پارامتریک:** نتایج به‌دست آمده از به‌کارگیری توابع انتقالی پارامتریک در شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در مکش‌های مختلف در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده در مناطق آمل و بابل و کرج بهترین نتایج توسط توابع کمپل و راولز به‌دست آمد. ضعیف‌ترین نتایج در هر سه منطقه در روش وریکن مشاهده شد. به‌صورت کلی در هر سه منطقه با منفی‌تر شدن (کاهش) پتانسیل ماتریک نتایج بهبود یافتند که این امر در توابع نقطه‌ای نیز وجود داشت. ضعیف‌تر بودن نتایج در مکش‌های بالاتر توسط دیگر مؤلفان نیز گزارش شده است (نمس و همکاران، ۲۰۰۶). دو دلیل می‌تواند به‌صورت بالقوه باعث این امر شود. اول این‌که مقادیر رطوبت در میزان ظرفیت زراعی بیش‌تر از نقطه پژمردگی دایم می‌باشد و دیگر این‌که میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی بیش‌تر از نقطه پژمردگی دایم تحت‌تأثیر ساختمان خاک می‌باشد و ساختمان خاک در بیش‌تر مدل‌های بررسی شده تنها در عامل چگالی ظاهری منعکس می‌شوند. همچنین نتایج کلی نشان می‌دهند که توابع پارامتریک برای نمونه‌های خاک مناطق آمل و بابل کارایی بهتری در مقایسه با کرج و بجنورد داشتند که تحلیل ارایه شده در ارتباط با تأثیر بافت خاک برای توابع نقطه‌ای در این مورد نیز صادق می‌باشد. بررسی‌های بیش‌تر نشان داد که نتایج ضعیف تابع وریکن به این دلیل بود که در بیش‌تر نمونه‌های خاک ضریب  $n$  رابطه ونگنوختن صفر به‌دست آمده بود که با توجه به این‌که تابع وریکن رابطه ونگنوختن را با فرض  $m$  مساوی ۱ حل می‌کند در تمامی نمونه‌هایی که نمایه  $n$  برابر صفر به‌دست آمده بود میزان رطوبت در تمامی مکش‌ها برابر با رطوبت اشباع خاک شد که این امر باعث کاهش شدید عملکرد این روش در تحلیل نمونه‌ها گردید. نتایج به‌دست آمده در توابع انتقالی پارامتریک در این پژوهش در مجموع خوب بود، اما در پژوهش گیوی و همکاران (۲۰۰۴) این توابع نتایج خوبی از خود نشان ندادند. به‌نظر می‌رسد این تفاوت ناشی از تفاوت در نوع بافت خاک و تنوع در نمونه‌های مورد استفاده در دو پژوهش باشد.

جدول ۴- نتایج برآورد رطوبت با استفاده از توابع پارامتریک در نمونه‌های خاک مناطق آمل- بابل و کرج.

| مکان | تابع* | $\theta_{-5}$ |       | $\theta_{-10}$ |       | $\theta_{-33}$ |       | $\theta_{-100}$ |       |
|------|-------|---------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|-----------------|-------|
|      |       | r             | RMSE  | r              | RMSE  | r              | RMSE  | r               | RMSE  |
| آمل  | کمپل  | ۰/۵۴          | ۰/۰۴۹ | ۰/۷۱           | ۰/۰۲۳ | ۰/۸۲           | ۰/۰۲۳ | ۰/۸۷            | ۰/۰۲۵ |
|      | وریکن | ۰/۲۲          | ۰/۰۶۲ | ۰/۳۷           | ۰/۱۲  | ۰/۴۵           | ۰/۱۲  | ۰/۵۷            | ۰/۱۵  |
|      | راولز | ۰/۶۲          | ۰/۰۶  | ۰/۷۲           | ۰/۰۳۹ | ۰/۸            | ۰/۰۳۹ | ۰/۸۵            | ۰/۰۲  |
|      | مایر  | -۰/۰۳         | ۰/۰۶  | ۰/۲۸           | ۰/۱۴  | ۰/۷۱           | ۰/۱۴  | ۰/۸۵            | ۰/۱۵  |
| کرج  | کمپل  | ۰/۳۸          | ۰/۰۴  | ۰/۷۸           | ۰/۰۳۱ | ۰/۸۱           | ۰/۰۳۱ | ۰/۸۶            | ۰/۰۴  |
|      | وریکن | ۰/۱۴          | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۹           | ۰/۱۴  | ۰/۵۸           | ۰/۱۴  | ۰/۶۸            | ۰/۱۵  |
|      | راولز | ۰/۴۵          | ۰/۰۵۱ | ۰/۷۹           | ۰/۰۲۸ | ۰/۸۴           | ۰/۰۲۸ | ۰/۸۷            | ۰/۰۲  |
|      | مایر  | -۰/۱۷         | ۰/۰۸۵ | ۰/۱۳           | ۰/۱۳  | ۰/۸۱           | ۰/۱۳  | ۰/۸۷            | ۰/۱۱  |

\* نمادها براساس جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۵- نتایج برآورد رطوبت با استفاده از توابع پارامتریک در نمونه‌های خاک منطقه بجنورد.

| تابع* | $\theta_{-5}$ |      | $\theta_{-10}$ |      | $\theta_{-33}$ |      | $\theta_{-100}$ |      |
|-------|---------------|------|----------------|------|----------------|------|-----------------|------|
|       | r             | RMSE | r              | RMSE | r              | RMSE | r               | RMSE |
| کمپل  | ۰/۰۳۹         | ۰/۷  | ۰/۰۴۶          | ۰/۵۹ | ۰/۰۴۷          | ۰/۴۹ | ۰/۰۳۲           | ۰/۷۳ |
| وریکن | ۰/۰۷          | ۰/۶۶ | ۰/۱            | ۰/۵  | ۰/۱۳           | ۰/۴۲ | ۰/۱۶            | ۰/۷۴ |
| راولز | ۰/۰۷۵         | ۰/۷۱ | ۰/۸۴           | ۰/۶۳ | ۰/۰۷۹          | ۰/۵۳ | ۰/۰۴۱           | ۰/۷۴ |
| مایر  | ۰/۱۴۵         | ۰/۵۳ | ۰/۱۶۵          | ۰/۵۳ | ۰/۱۶۴          | ۰/۴۷ | ۰/۱۲۷           | ۰/۶۹ |

\* نمادها براساس جدول ۲ می‌باشد.

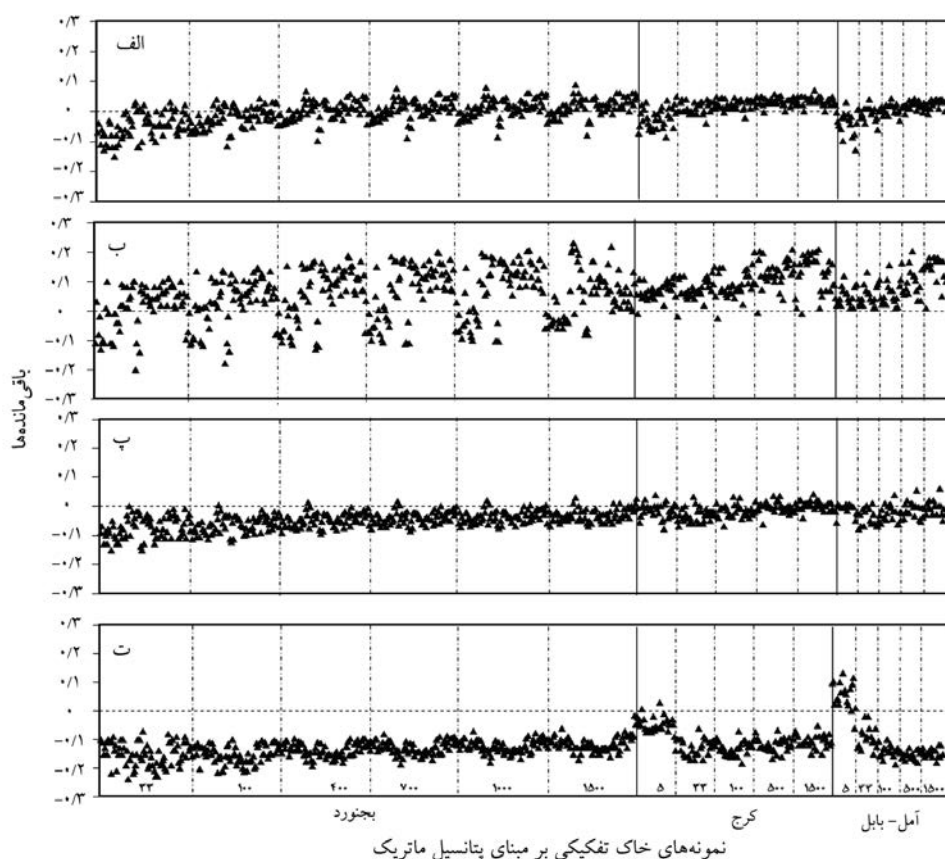
کارکرد واقعی روابط نگه‌داشت آب خاک: به‌طور اصولی بدون آگاهی از نحوه کارکرد یک رابطه پیش‌بینی رطوبت خاک، سنجش میزان کارایی تابعی که قرار است ضرایب آن رابطه را از خصوصیات زود یافت خاک معین نماید اقدامی ناقص است. زیرا در صورت وجود کارکرد مثبت یک تابع انتقالی مانند وریکن نمی‌توان گفت که رابطه نگه‌داشت آب خاک متناظر با آن (ونگنوختن) به‌طور لازم نتیجه وضعی را برای نمونه خاک‌های مورد نظر داشته است. بنابراین در این پژوهش روابط نگه‌داشت با داده‌های واقعی طی یک فرایند بهینه‌سازی برازش داده شد و نتایج با توابع انتقالی که ضرایب این روابط را برآورد می‌کنند (توابع پارامتریک) برای تمامی نمونه‌های مورد استفاده در هر سه منطقه و در

همه پتانسیل های ماتریک به صورت هم زمان مقایسه گردید (شکل ۲ و جدول ۶). نتایج نشان می دهد که تمامی توابع نگه داشت آب خاک مورد آزمایش با ضرایب بهینه شده عملکرد قابل قبولی داشتند. همچنین همه توابع انتقالی پارامتریک، به جز تابع انتقالی وریکن عملکرد قابل قبولی داشتند. بیش ترین هم خوانی میان رطوبت های به دست آمده با استفاده از توابع انتقالی پارامتریک و با استفاده از روابط نگه داشت آب خاک بهینه شده در مناطق متفاوت و در پتانسیل های مختلف با استفاده از توابع پارامتریک کمپل و راولز برای روابط کمپل و بروکس و کوری به دست آمد.

جدول ۶- رطوبت برآورد شده توسط روابط نگه داشت آب خاک با استفاده از ضرایب بهینه سازی و ضرایب به دست آمده از تابع انتقالی.

| آماره | کمپل         |             | ونگنوختن     |             | بروکس و کوری |             | هاستون و کاس |             |
|-------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|       | تابع انتقالی | بهبینه سازی | تابع انتقالی | بهبینه سازی | تابع انتقالی | بهبینه سازی | تابع انتقالی | بهبینه سازی |
| SB    | ۰            | ۰/۰۰۰۴      | ۰/۰۰۷        | ۰           | ۰/۰۰۱۵       | ۰           | ۰/۰۲         | ۰           |
| RMSE  | ۰/۰۳۷        | ۰/۰۵        | ۰/۱۲۳        | ۰/۰۲        | ۰/۰۵۴        | ۰/۰۲۵       | ۰/۱۳         | ۰/۰۱۹       |
| NMSE  | ۰/۰۲۳        | ۰/۰۴        | ۰/۲۱         | ۰/۰۰۶       | ۰/۰۵۷        | ۰/۰۱        | ۰/۵۷         | ۰/۰۰۶       |
| r     | ۰/۹          | ۰/۸۴        | ۰/۵۲         | ۰/۹۸        | ۰/۹          | ۰/۹۶        | ۰/۸۹         | ۰/۹۸        |

دلایل کم برآورد در رابطه بروکس و کوری بهبود (تابع انتقالی مایر و جارویس) آشکارا در شکل قابل مشاهده می باشد. بیش ترین باقی مانده ها متعلق به روش وریکن بود که با نتایج قبلی هم خوانی دارد. از این نظر در مجموع می توان گفت تابع انتقالی کمپل نزدیک ترین عملکرد را به ضرایب بهینه داشته است. مردون و همکاران (۲۰۰۶) گزارش دادند که همه روش های رگرسیونی و شبکه های عصبی در اشتقاق توابع انتقالی نقطه ای بهتر از پارامتریک برآورد کننده عوامل رابطه ونگنوختن عمل نمودند. نتایج مشابهی توسط نمس و همکاران (۲۰۰۶) و میناسنی و همکاران (۱۹۹۹) به دست آمده بود. تفاوت نتایج این پژوهش ها با این پژوهش به خوبی لزوم در نظر گرفتن چندین رابطه نگه داشت آب خاک و توابع پارامتریک آن ها نشان را می دهد. به عبارت بهتر اگر این پژوهش نیز تنها به بررسی رابطه ونگنوختن و تابع انتقالی متناظر با آن یعنی وریکن می پرداخت نتیجه ای مشابه با پژوهش های پیشین به دست می آمد.



نمونه‌های خاک تفکیکی بر مبنای پتانسیل ماتریک

شکل ۲- پراکنش باقی مانده‌ها بین مقادیر رطوبت برآورد شده توابع پارامتریک و روابط بهینه‌سازی شده. رابطه کمپل و تابع انتقالی کمپل (الف)، رابطه ونگنوختن و تابع انتقالی وریکن (ب)، رابطه بروکس و کوری و تابع انتقالی راولز (پ) و رابطه هاستون و کاس (بروکس و کوری بهبودیافته) و تابع انتقالی مایر و جارویس (ت).

نتایج تحلیل هم‌زمان تمامی نمونه‌های مورد استفاده: نتایج تحلیل آماری هم‌زمان تمامی نمونه‌ها برای توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک در جدول‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان از برتری نسبی توابع انتقالی نقطه‌ای مورد استفاده در نقطه پژوهش دایم نسبت به ظرفیت زراعی داشت. همچنین در مورد توابع پارامتریک به‌طور کلی در تمامی روش‌ها نتایج با منفی‌تر شدن پتانسیل بهبود یافت. توابع نقطه‌ای برای تمامی ۱۲۲ نمونه به‌طور تقریبی نتایج یکسان و قابل‌قبولی



را از خود نشان دادند. همچنین توابع پارامتریک در کل، نتایج بهتری نسبت به توابع نقطه‌ای داشتند. روش‌های کمپل و راولز نتایج بهتری نسبت به روش‌های وریکن و مایر از خود نشان دادند. به طوری که میانگین ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا در تمامی نقاط پتانسیلی برای روش کمپل، ۰/۶۷ و ۰/۳۷، برای روش راولز، ۰/۶۹ و ۰/۰۵، برای روش وریکن، ۰/۵۷ و ۰/۱۲۵ و برای روش مایر، ۰/۵۲ و ۰/۱۳ بود.

جدول ۷- نتایج برآورد رطوبت در مکش‌های مختلف با استفاده از توابع پارامتریک.

| وریکن |        |       |       |      |      |       |        |       |        |      |      | پتانسیل |
|-------|--------|-------|-------|------|------|-------|--------|-------|--------|------|------|---------|
| NMSE  | SB     | RMSE  | عرض   | شیب  | r    | NMSE  | SB     | RMSE  | عرض    | شیب  | r    |         |
| ۰/۰۲  | ۰/۰۰۱۳ | ۰/۰۵۷ | ۰/۳۲  | ۰/۱۵ | ۰/۲۳ | ۰/۰۱۱ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۴۳ | ۰/۳    | ۰/۲۳ | ۰/۵۱ | -۵      |
| ۰/۰۵۴ | ۰/۰۰۲۱ | ۰/۰۷۷ | ۰/۰۳۶ | ۱/۰۳ | ۰/۵۹ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۳۴ | ۰/۱    | ۰/۶۴ | ۰/۶۹ | -۳۳     |
| ۰/۱۵  | ۰/۰۰۷۶ | ۰/۱۲  | ۰/۱۳  | ۰/۸۳ | ۰/۳۹ | ۰/۰۲۴ | ۰      | ۰/۰۴  | ۰/۰۱   | ۰/۶  | ۰/۵۵ | -۱۰۰    |
| ۰/۲۶  | ۰/۰۰۷  | ۰/۱۳  | -۰/۰۸ | ۱/۸۳ | ۰/۴۲ | ۰/۰۵  | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۱۷  | ۰/۸۱ | ۰/۴۹ | -۴۰۰    |
| ۰/۴۵  | ۰/۰۳   | ۰/۱۸  | ۰/۱۶  | ۱/۰۷ | ۰/۶۵ | ۰/۰۳  | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۴۸  | ۰/۹  | ۰/۸۶ | -۵۰۰    |
| ۰/۴۶  | ۰/۰۱۵  | ۰/۱۶  | -۰/۲۱ | ۲/۹  | ۰/۷۴ | ۰/۰۳  | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۳۲ | -۰/۰۰۹ | ۱/۱  | ۰/۸۳ | -۷۰۰    |
| ۰/۵۶  | ۰/۰۱۷  | ۰/۱۶  | -۰/۱۸ | ۲/۹۷ | ۰/۷۴ | ۰/۰۴۱ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۳۴ | -۰/۰۰۱ | ۱/۱  | ۰/۷۴ | -۱۰۰۰   |
| ۰/۳۷  | ۰/۰۰۸  | ۰/۱۲  | -۰/۱۴ | ۲/۴۷ | ۰/۸۷ | ۰/۰۴۴ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۱۷  | ۱/۰۳ | ۰/۸۷ | -۱۵۰۰   |
| راولز |        |       |       |      |      |       |        |       |        |      |      | پتانسیل |
| NMSE  | SB     | RMSE  | عرض   | شیب  | r    | NMSE  | SB     | RMSE  | عرض    | شیب  | r    |         |
| ۰/۰۳۸ | ۰/۰۰۳۷ | ۰/۰۷۶ | ۰/۳۷  | ۰/۲۱ | ۰/۲۷ | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۰۱۷ | ۰/۰۵۵ | ۰/۲۲   | ۰/۳۷ | ۰/۵۶ | -۵      |
| ۰/۳۳  | ۰/۰۱۶۳ | ۰/۱۳  | ۰/۰۸  | ۰/۳  | ۰/۴  | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۰۲۸ | ۰/۰۶۴ | ۰/۰۰۷  | ۰/۸  | ۰/۷۱ | -۳۳     |
| ۰/۷۹  | ۰/۰۲۲  | ۰/۱۵  | ۰/۰۵۸ | ۰/۲  | ۰/۴۶ | ۰/۰۸۴ | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۰۶۸ | ۰/۰۳۵  | ۰/۶۶ | ۰/۵۶ | -۱۰۰    |
| ۲/۰۲  | ۰/۰۲۶  | ۰/۱۶  | ۰/۰۲  | ۰/۱۶ | ۰/۴۷ | ۰/۱۸  | ۰/۰۰۵۲ | ۰/۰۸  | ۰/۰۰۱۷ | ۰/۶۷ | ۰/۵۳ | -۴۰۰    |
| ۱/۴۷  | ۰/۰۱۷  | ۰/۱۳  | ۰/۰۰۹ | ۰/۲۷ | ۰/۶۶ | ۰/۰۱۵ | ۰      | ۰/۰۲۴ | -۰/۰۳۴ | ۱/۱۴ | ۰/۸۵ | -۵۰۰    |
| ۱/۹۳  | ۰/۰۱۵  | ۰/۱۳  | ۰/۰۱۵ | ۰/۱۹ | ۰/۶۹ | ۰/۰۷  | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۰۴۱ | ۰/۰۰۱۱ | ۰/۷۹ | ۰/۷۴ | -۷۰۰    |
| ۲/۱۲  | ۰/۰۱۳  | ۰/۱۲  | ۰/۰۱۴ | ۰/۱۷ | ۰/۶۸ | ۰/۰۵  | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۰۸  | ۰/۷۹ | ۰/۷۶ | -۱۰۰۰   |
| ۲/۴۴  | ۰/۰۱۳  | ۰/۱۲  | ۰/۰۱۳ | ۰/۱۶ | ۰/۵۵ | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۲۷ | -۰/۰۰۵ | ۰/۹۵ | ۰/۸  | -۱۵۰۰   |

\* نمادها براساس جدول ۲ می‌باشند.

جدول ۸- نتایج برآورد رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دایم با استفاده از توابع انتقالی نقطه‌ای انتخابی.

| نوع انتقالی*          | ظرفیت زراعی |        |        |       |      | نقطه پژمردگی دایم |        |        |       |      |
|-----------------------|-------------|--------|--------|-------|------|-------------------|--------|--------|-------|------|
|                       | SB          | NMSE   | SB     | RMSE  | r    | SB                | NMSE   | SB     | RMSE  | r    |
| باومار                | ۰           | ۷۸۱۰/۰ | ۱۰۰۰/۰ | ۱۴۰/۰ | ۰/۶۸ | ۰                 | ۷۸۱۰/۰ | ۱۰۰۰/۰ | ۱۴۰/۰ | ۰/۶۸ |
| پراکسیک               | ۰           | ۳۵۱۰/۰ | ۵۰۰۰/۰ | ۳۳۰/۰ | ۰/۷۰ | ۰                 | ۳۵۱۰/۰ | ۵۰۰۰/۰ | ۳۳۰/۰ | ۰/۷۰ |
| بی. اس. اس. خاک زیرین | ۶۰۰۰/۰      | ۸۸۱۰/۰ | ۱۱۰۰/۰ | ۷۲۰/۰ | ۰/۷۲ | ۶۰۰۰/۰            | ۸۸۱۰/۰ | ۱۱۰۰/۰ | ۷۲۰/۰ | ۰/۷۲ |
| بی. اس. اس. خاک سطحی  | ۶۱۳۰/۰      | ۶۱۳۰/۰ | ۰/۰۰۳  | ۰/۳۰  | ۰/۷۱ | ۶۱۳۰/۰            | ۰/۰۰۳  | ۰/۳۰   | ۰/۷۱  | ۰/۷۱ |
| ای. بی. ای. سی        | ۱۷۴۰/۰      | ۱۷۴۰/۰ | ۰/۰۰۲  | ۰/۳۰  | ۰/۶۳ | ۱۷۴۰/۰            | ۰/۰۰۲  | ۰/۳۰   | ۰/۶۳  | ۰/۶۳ |
| هاستون                | ۸۰۶۷/۰      | ۸۰۶۷/۰ | ۱۰۰۰/۰ | ۷۴۷/۰ | ۰/۶۱ | ۸۰۶۷/۰            | ۱۰۰۰/۰ | ۷۴۷/۰  | ۰/۶۱  | ۰/۶۱ |
| مانریک                | ۱۱۵۱/۰      | ۱۱۵۱/۰ | ۵۱۰/۰  | ۳۱۰/۰ | ۰/۵۸ | ۱۱۵۱/۰            | ۵۱۰/۰  | ۳۱۰/۰  | ۰/۵۸  | ۰/۵۸ |
| راولز-آی. اس. دبلیو   | ۳۴۰/۰       | ۳۴۰/۰  | ۱۱۰/۰  | ۵۰/۰  | ۰/۷۱ | ۳۴۰/۰             | ۱۱۰/۰  | ۵۰/۰   | ۰/۷۱  | ۰/۷۱ |

\*نمادها براساس جدول ۲ می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان رطوبت در مکش‌های مختلف برای ۱۲۲ نمونه خاک از شمال و شمال‌شرق کشور با استفاده از چندین تابع انتقالی معروف نقطه‌ای موجود و قابل دست‌یابی و همچنین چندین تابع پارامتریک پیش‌بینی شد. نتایج نشان از عملکرد مناسب توابع نقطه‌ای بی.اس. اس خاک زیرین و بی.اس. اس خاک سطحی و براکنسیک در برآورد میزان رطوبت خاک در مقادیر ظرفیت زراعی و پژمردگی دایم داشت. همچنین بررسی‌ها نشان داد که استفاده از میزان کربن آلی در برخی توابع نقطه‌ای به‌عنوان نمایه ورودی دلیل نتایج مطلوب آن‌ها بود. به‌نظر می‌رسد نتایج متفاوت در مناطق سه‌گانه آمل و بابل، کرج و بجنورد تا حد زیادی مرتبط با تفاوت ذاتی خاک‌های این مناطق با یکدیگر باشد. از میان توابع پارامتریک روش‌های کمپل و راولز بهترین نتایج را در تمامی مناطق داشتند. در هر دو دسته توابع پارامتریک و نقطه‌ای، نتایج با منفی‌تر شدن پتانسیل از نقطه ظرفیت زراعی تا نقطه پژمردگی دایم بهبود قابل توجهی داشت. تفاوت در نتایج به‌دست آمده از توابع انتقالی پارامتریک مرتبط با چندین رابطه نگه‌داشت آب خاک به‌خوبی لزوم بررسی هم‌زمان عملکرد چندین رابطه و مقایسه نتایج آن‌ها را نشان می‌دهد.

## منابع

1. Ambrose, B., Reutenauer, D., and Viville, D. 1992. Estimating soil water retention properties from mineral and organic fractions of coarse-textured soils in the Vosges mountains of France. In: Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., and Lund, L.J. (Eds.), Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California. Riverside. California, Pp: 453-462.
2. Arabi, Z. 2004. Prediction of soil moisture curve using particle size distribution. M.Sc. Thesis. Azad University. Science and Research Unit. (in Persian)
3. Baker, L., and Ellison, D. 2008. Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*. 144: 212-224.
4. Brooks, R.H., and Corey, A.T. 1964. Hydraulic Properties of Porous Media, Colorado State University, 27p.
5. Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci*. 117: 311-314.
6. Donatelli, M., and Acutis, M. 2001. Soil par 2.00 beta-help. Research Institute for industrial Crops. Via corticella 133, 40128 Bologna. Italy. <http://www.isci.it/tools>.
7. Filla, G., Bellocchi, G., Acutis, M., and Donatelli, M. 2002. IRRENE help. Research institute for industrial crops. <http://www.isci.it/tools>.

8. Fuladmand, H.R., Sepaskhah, A., and Niazi, J. 2004. Estimating soil- moisture characteristic curve based on soil particle size distribution curve and bulk density. *J. Sci. and Technol. Agric. and Natur. Resour.* 8: 3. 1-12. (In Persian)
9. Givi, J., Prasher, S.O., and Patel, R.M. 2004. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. *Agric. Water Manage.* 70: 83-96.
10. Hutson, J.L., and Cass, A. 1987. A retentivity function for use in soil water simulation models. *J. Soil Sci.* 38: 105-113.
11. Kern, J.S. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1134-1141.
12. Khoshnud Yazdi, A.A. 1991. Estimation of soil moisture curve using some physical characteristics in some soils of Iran, M.Sc. Thesis. Tehran University. Faculty of Agriculture, 144p. (In Persian)
13. Manyame, C., Morgan, C.L., Heilman, J.L., Fatondji, D., Gerard, B., and Payne, W.A. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma.* 141: 3-4. 407-415.
14. McBratney, A.B., Minasny, B., Cattle, S.R., and Vervoort, R.W. 2002. From pedotransfer function to soil inference system. *Geoderma.* 109: 41-73.
15. Merdun, H., Özer, C., Ramazan, M., and Mehmet, A. 2006. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil & Till. Res.* 90: 108-116.
16. Minasny, B., McBratney, A.B., and Bristow, K.L. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma.* 93: 225-253.
17. Nemes, A., Schaap, M.G., and Wösten, J.H.M. 2003. Functional Evaluation of Pedotransfer Functions Derived from Different Scales of Data Collection. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1093-1102.
18. Nemes, A., Rawls, W.J., and Pachepsky, Y.A. 2006. Use of the Nonparametric Nearest Neighbor Approach to Estimate. *Soil Hydraulic Properties Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 327-336.
19. Rawls, W.J., and Brakensiek, D.L. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel, S. (Ed.). *Unsaturated flow in hydrologic modeling: theory and practice*, Kluwer Academic Publishers, Pp: 275-300.
20. Schaap, M.G., and Leij, F.L. 1998a. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sci.* 10: 765-779.
21. Schaap, M.G., and Leij, F.J. 1998b. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil Tillage Res.* 47: 37-42.
22. Schaap, M.G., Leij, F.J., and Van genuchten, M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 847-855.

23. Schaap, M.G., Leij, F.J., and Van genuchten, M.Th. 1999. A bootstrap neural network approach to predict soil hydraulic parameters, P 1237-1250. In: M.Th. Van genuchten et al. (ed.) Proc. Int. Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Univ. California, Riverside. CA. 22-24 Oct. 1997.
24. Schumacher, B.A. 2002. Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments, Ecological Risk Assessment Support Center Office of Research and Development US. Environmental Protection Agency, 23p.
25. U.S.D.A. 1982. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey. Soil Survey Investigations. Report No. 1.
26. Van genuchten, M.Th. 1980. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
27. Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., and LeBas, C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma. 90: 169-185.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 19(2), 2012*  
<http://jwfst.gau.ac.ir>

## **Evaluation and comparison between some point and parametric pedotransfer functions in predicting soil water contents in different matric potentials**

**A. Haghverdi<sup>1</sup>, \*B. Ghahreman<sup>2</sup>, A.A. Khoshnood Yazdi<sup>3</sup>,  
M. Joleini<sup>4</sup> and Z. Arabi<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Irrigation and Drainage, Ferdowsi University of Mashhad, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, <sup>3</sup>Instructor, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, <sup>4</sup>Research Assistant Prof., Agricultural Research Center, Khorasan Razavi Province, <sup>5</sup>M.Sc. Graduated, Dept. of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University of Tehran  
Received: 2010/03/13; Accepted: 2011/10/12

### **Abstract**

Using direct measurement techniques for estimation of soil hydrological parameters, are time consuming and expensive. One possible solution to this problem is to derive a mathematical relationship between easily measurable soil parameters, such as soil texture, bulk density and organic matter content, and other hard-measurable soil hydraulic parameters. Such a relationship is called pedotransfer function (PTF). In this study, we used 8 point PTFs and 4 parametric PTFs for predicting water content corresponding to different matric potentials for 122 soil samples taken from north and north-east of Iran. Parametric PTFs has been derived to estimate the coefficients of four different water retention functions of van Genuchten, Hutson and Cass, Campbell, and Brooks-Corey. BSS TOPSOIL method (Hutson and Wagenet, 1992; with input variables of soil fractions, Organic Carbon content, and bulk density) with correlation coefficient ( $r$ ) of 0.75 and root mean square error (RMSE) of 0.033 was the best and Hutson method (Hutson and Wagenet, 1992; with input variables of soil fractions, and bulk density) with  $R=0.59$  and  $RMSE=0.061$  was the worst method in Point PTFs. The best ( $r=0.90$ ,  $RMSE=0.037$ ) parametric PTF was due to Campbell (Campbell, 1085) and the worst ( $r=0.52$ ,  $RMSE=0.12$ ) one was due to Vereecken (Vereecken et al., 1989). The results showed that including Organic Carbon content as an input variable in PTFs, improves the predictability of soil water content. On overall, the performance of all PTFs increased when the matric potential increased.

**Keywords:** North and northeast of Iran, Pedotransfer functions, Water retention curve

---

\* Corresponding Author; Email: [bijanghahreman@yahoo.com](mailto:bijanghahreman@yahoo.com)