

## تخمین خصوصیات هیدرولیکی خاک از طریق الگوریتم‌های محاسباتی آزمایش نفوذ بیرکن

تارخ احمدی، معصومه دلبری\* و پیمان افراسیاب<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۳)

### چکیده

امروزه الگوریتم‌های محاسباتی بیرکن (BESTslope و BESTsteady) به‌عنوان روش‌های غیرمستقیم مناسبی برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) و قابلیت جذب خاک (S) و پارامتر مقیاس (hg) در معادله منحنی مشخصه ونگنوختن از طریق داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن و سایر پارامترهای مورد نیاز شناخته شده‌اند. هدف از پژوهش حاضر مقایسه دو الگوریتم مذکور در تخمین Ks و S و رطوبت خاک متناظر با مکش‌های ۳۳، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال است. برای این منظور تعداد ۴۰ آزمایش نفوذ بیرکن در مزرعه پژوهش‌هایی سد سیستان انجام شد. از کل آزمایش‌ها تعداد ۳۰ آزمایش در بافت‌های لوم و لوم‌شنی که متوسط خطای نسبی ( $Er_{(t)}$ ) آنها کمتر از ۵/۵ درصد بود برای بررسی و تحلیل نتایج انتخاب شد. برای مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده در هر یک از فشارهای مورد نظر از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب تعیین وزنی ( $or^2$ ) استفاده شد. نتایج نشان داد الگوریتم BESTsteady که فرایند محاسباتی بسیار ساده‌تری در مقایسه با الگوریتم اصلی بیرکن (BESTslope) دارد، توانایی تخمین مقدار Ks و S و همچنین مقدار رطوبت در مکش‌های نزدیک به ظرفیت زراعی با دقت قابل قبولی را دارد. دقت تخمین مقدار رطوبت خاک متناظر با مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال (رطوبت در نقطه پژمردگی) در هر دو الگوریتم ضعیف و غیرقابل قبول تشخیص داده شد. از طرفی با افزایش درصد رس خاک مقدار خطای نسبی تخمین رطوبت اندازه‌گیری شده ( $Er_{(t,0)}$ ) با شیب ملایمی کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: توانایی جذب خاک، خطای نسبی برازش، منحنی مشخصه آب خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: masoomah.delbari@uoz.ac.ir

## مقدمه

توسط باگارلو و همکاران (۵) انجام شد نشان داد که در خاک های با درصد رس بالا (۴۵/۲ درصد  $\text{Clay}$ ) مقدار خطای نسبی تخمین منحنی مشخصه  $(E_{r(h,\theta)})$  به زیر پنج درصد می رسد و برای خاک های با مقدار رس کمتر از ۱۰ درصد، مقدار خطای نسبی بسیار بالا است. آنلو و همکاران (۱) در تحقیق روی بافت لوم شنی دریافتند که بر اساس داده های آزمایشگاهی، الگوریتم BESTslope دقت رضایت بخشی در تخمین منحنی مشخصه خاک دارد.

الگوریتم BESTslope از داده های نفوذ در مرحله انتقالی جریان آب در خاک (Transient Flow) استفاده می کند. همچنین در آزمایش نفوذ اطمینان داده های جمع آوری شده از چند دقیقه اول آزمایش (بخش ابتدایی مرحله انتقالی) کمتر از داده های قرائت شده بعدی است (۲۳). از طرفی، فرایندهای محاسباتی الگوریتم BESTslope برای محاسبه  $K_s$  و  $S$  وقت گیر و قدری پیچیده است و همچنین مطابق برخی پژوهش های انجام شده این الگوریتم گاهی منجر به مقادیر غیرواقعی (منفی) هدایت هیدرولیکی اشباع می شود (۴). لذا پژوهش های انجام شده در زمینه آزمایش بیرکن منجر به معرفی الگوریتم جدیدی به نام BESTsteady توسط باگارلو و همکاران (۴) شد. در الگوریتم جدید فرایند محاسبه پارامترهای هیدرولیکی بسیار ساده تر از BESTslope است و  $K_s$  و  $S$  بر اساس شیب  $(i_s^{exp})$  و عرض از مبدأ  $(b_s^{exp})$  معادله خطی نفوذ آب در مرحله پایدار (Steady Flow) تعیین می شود. بنابراین بررسی عملکرد الگوریتم BESTsteady که ساده ترین فرایند محاسباتی را دارد و منجر به مقادیر منطقی (مثبت) هدایت هیدرولیکی اشباع در بافت های مختلف خاک می شود، ضروری به نظر می رسد. از آنجا که مقایسه دقت تخمین منحنی مشخصه توسط الگوریتم های BESTslope و BESTsteady تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است، هدف از پژوهش حاضر مقایسه دقت الگوریتم های مذکور برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک ( $K_s$  و  $S$ ) و همچنین تخمین رطوبت  $\theta_{es}(h_i)$  در مکش های ۱۰۰، ۳۳، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال برای بافت های لوم و لوم شنی منطقه سیستان است.

مدل سازی جریان آب و املاح در منطقه غیر اشباع خاک نیازمند آگاهی از ویژگی های هیدرولیکی و منحنی مشخصه آب خاک (SWRC) است. دقیق ترین روش مستقیم برای تعیین SWRC استفاده از روش آزمایشگاهی صفحات فشاری است. مهم ترین مسئله در این روش هزینه بالا و زمان بر بودن آن است (۱۸). لذا امروزه استفاده از روش های غیرمستقیم برآورد ویژگی های هیدرولیکی خاک بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (۲۱). در بین روش های غیرمستقیم، توابع انتقالی خاک (PTFs) به دلیل کم هزینه بودن و سادگی کاربرد طی چند دهه اخیر کاربرد، زیادی پیدا کرده است (۲ و ۱۱). هاوار کمپ و همکاران (۱۳) آزمایش نفوذ بیرکن را به عنوان یک روش ساده معرفی کردند.

لاساباتری و همکاران (۱۶) نیز الگوریتم محاسباتی BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters) را معرفی کردند که قادر است پارامترهای هیدرولیکی و پارامتر شکل و مقیاس در معادله ونگنوختن را از طریق داده های نفوذ بیرکن و منحنی دانه بندی محاسبه کند. الگوریتم BEST در پژوهش های بعدی توسط ایلماز و همکاران (۲۶) به نام BESTslope نام گذاری شد. در الگوریتم BESTslope با استفاده از زوج های مرتب اندازه گیری شده مربوط به آزمایش نفوذ بیرکن  $(t_i, I_i^{exp})$  و اندازه گیری رطوبت اولیه  $(\theta_0)$  و چگالی ظاهری خاک  $(\rho_b)$ ، ابتدا پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و توانایی جذب خاک ( $S$ ) محاسبه شده و سپس با استفاده از اطلاعات مربوط به منحنی دانه بندی خاک (PSD)، پارامترهای شکل ( $n$ ) و مقیاس ( $hg$ ) در معادله منحنی مشخصه ونگنوختن (۲۲) محاسبه می شود. امروزه روش اخیر به دلیل سادگی در اجرا و کم هزینه بودن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سادگی این روش به دلیل استفاده از یک حلقه است که در حدود یک سانتی متر در زمین فرو می رود و حجم کم و ثابتی از آب به طور تکراری روی سطح خاک درون حلقه ریخته می شود (۵ و ۱۶). نتایج پژوهشی که به منظور بررسی دقت الگوریتم BESTslope در تخمین منحنی مشخصه



شکل ۱. موقعیت محل انجام آزمایش‌های نفوذ بیرکن در مزرعه سد سیستان دانشگاه زابل

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در مزرعه پژوهش‌هایی دانشگاه زابل (مزرعه سد سیستان) در مساحتی حدود ۵۰ هکتار در طول جغرافیایی  $61^{\circ}31'20''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $30^{\circ}54'57''$  شمالی و در ۴۰ نقطه به فاصله تقریبی ۸۰ متر انجام شد، شکل (۱). ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا ۴۸۵ متر، متوسط بارندگی سالانه ۵۵ میلی‌متر و متوسط حداقل و حداکثر دمای روزانه نیز به ترتیب ۱۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس نتایج این پژوهش، بافت غالب خاک منطقه، لومی و لوم‌شنی است.

### روش انجام آزمایش‌ها نفوذ بیرکن

برای انجام آزمایش نفوذ بیرکن از یک حلقه فلزی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر (شعاع ۷/۵ سانتی‌متر) که به اندازه یک سانتی‌متر درون زمین فرو برده می‌شود، استفاده شد. سطح خاک قبل از انجام آزمایش از خار و خاشاک پاک شد. ۱۵۰ میلی‌لیتر آب به آرامی و به‌گونه‌ای روی سطح خاک ریخته شد که ساختمان سطح خاک

درون حلقه به هم نخورد و سپس مدت زمان نفوذ کامل آب اندازه‌گیری شد. پس از نفوذ کامل آب مجدداً ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مانند دفعه اول روی سطح خاک درون حلقه ریخته شد و مدت زمان نفوذ کامل اندازه‌گیری شد. این عمل تا وقتی که مدت زمان نفوذ آب در خاک برای سه تکرار متوالی یکسان شود یا اختلاف مدت زمان نفوذ در سه تکرار متوالی ناچیز شود، ادامه یافت. قبل از شروع آزمایش، دو نمونه دست نخورده برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه ( $\theta_0$ ) و چگالی ظاهری خاک ( $\rho_b$ ) و یک نمونه برای تعیین بافت خاک از هر نقطه مشخص تهیه شد. در این پژوهش به‌منظور اطمینان از ایجاد شرایط پایدار در نفوذ آب در خاک، عمل ریختن آب به درون حلقه به تعداد ۲۰ بار (۲۰ تکرار) در هر نقطه آزمایشی انجام شد. لذا با توجه به اینکه در هر مرتبه از عمل ریختن حجم ثابت آب، مقدار ۸/۵ میلی‌متر آب به درون زمین نفوذ می‌کند لذا حداکثر نفوذ تجمعی آب برای هر نقطه آزمایشی حدود ۱۷ سانتی‌متر (۱۷۰ میلی‌متر) است. در این پژوهش رطوبت اشباع خاک ( $\theta_s$ ) برابر با تخلخل خاک (e) (۱۹-۲۲) و چگالی حقیقی خاک ( $\rho_s$ ) برای کلیه

نسبی اولیه کمتر از ۰/۲۵ است ( $Se = \theta_s / \theta_s \leq 0.25$ )، مقدار  $0.75/0.75$  و پارامترهای B و C به ترتیب برابر با ۰/۴۶۷ و ۰/۶۳۹ هستند (۷).

برای برآزش بهترین خط بر داده‌های نفوذ در مرحله پایدار و محاسبه شیب و عرض از مبدأ معمولاً سه نقطه انتهایی در نظر گرفته می‌شود (۱۳). مقدار شیب ( $i_s^{exp}$ ) و عرض از مبدأ ( $b_s^{exp}$ ) اندازه‌گیری شده نیز برای انجام محاسبات در الگوریتم‌های BEST مطابق معادله (۳a) و (۳b) تقریباً برابر مقدار تنوری نظر گرفته می‌شود (۱۶ و ۲۶):

$$i_s^{exp} \approx (AS^{\gamma} + Ks) \quad (3a)$$

$$b_s^{exp} \approx C \frac{S^{\gamma}}{Ks} \quad (3b)$$

### الگوریتم BESTslope

این الگوریتم به‌عنوان الگوریتم اصلی در آزمایش نفوذ بیرکن شناخته شده است (۳). در صورتی که مقدار  $Ks$  محاسبه شده از رابطه (۳a) در رابطه (۱a) قرار گیرد، معادله تلفیقی ۴ به‌دست می‌آید که از طریق برآزش داده‌های نفوذ در مرحله انتقالی جریان آب در خاک ( $t_i, I_i^{exp}$ ) و روش حداقل شدن مجموع مربعات خطا (حداقل شدن تابع هدف) مقدار  $S$  محاسبه می‌شود:

$$I(t) = S\sqrt{t} + [A(1-B)S^{\gamma} + B i_s^{exp}] t \quad (4)$$

پس از محاسبه مقدار  $S$  مقدار  $Ks$  نیز بر اساس رابطه (۱c) محاسبه می‌شود. برای تعیین مدت زمان نفوذ (حرکت آب در خاک) در مرحله انتقالی نیز مقدار  $t_{max}$  با استفاده از معادله (۵) در هر مرحله از محاسبات به‌دست می‌آید:

$$t_{max} = \frac{1}{\gamma(1-B)} \left( \frac{S}{Ks} \right)^{\gamma} \quad (5)$$

مقدار خطای نسبی در تخمین منحنی نفوذ تجمعی ( $Er(t,I)$ ) نیز مطابق معادله (۶) برای هر مقدار  $k$  محاسبه می‌شود:

$$Er(t,I) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_i^{exp} - I_{est}(t_i)]^{\gamma}}{\sum_{i=1}^k [I_i^{exp}]^{\gamma}}} \quad (6)$$

آزمایش‌ها برابر با ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد (۴ و ۵). لازم به ذکر است که در آزمایش بیرکن فرض بر این است که توزیع رطوبتی اولیه در عمق خاک (پروفیل خاک) یکنواخت است. رطوبت اولیه خاک با روش وزنی، بافت خاک با روش آزمایش الک و هیدرومتری (تهیه منحنی دانه‌بندی) (۱۰) و چگالی ظاهری خاک با روش سیلندر اندازه‌گیری شد. بر اساس نمونه‌های خاک تهیه شده از محل نقاط انجام آزمایش بیرکن، پنج نقطه از منحنی مشخصه خاک متناظر با مکش‌های ۳۳، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال با روش صفحات فشاری در آزمایشگاه دانشکده آب و خاک دانشگاه فردوسی مشهد تعیین شد.

### معادلات نفوذ

معادلات نفوذ تجمعی در شرایط جریان انتقالی آب در خاک ( $I(t)$ ) و جریان پایدار آب در خاک ( $I_{\infty}(t)$ ) به ترتیب در قالب معادلات (۱a) و (۱b) بیان شده است. با توجه به اینکه شکل معادله نفوذ تجمعی در شرایط جریان پایدار آب در خاک به‌صورت خطی است، مقدار شیب (سرعت نهایی نفوذ) ( $i_s$ ) و عرض از مبدأ ( $b_s$ ) در رابطه خطی نیز به ترتیب مطابق معادلات (۱c) و (۱d) ارائه شده است (۱۲ و ۱۶):

$$I(t) = S\sqrt{t} + (AS^{\gamma} + BKs)t \quad (1a)$$

$$I_{\infty}(t) = (AS^{\gamma} + Ks)t + C \frac{S^{\gamma}}{Ks} \quad (1b)$$

$$i_s = (AS^{\gamma} + Ks) \quad (1c)$$

$$b_s = C \frac{S^{\gamma}}{Ks} \quad (1d)$$

در این روابط،  $t$  مدت زمان سپری شده از ابتدای آزمایش نفوذ ( $T$ )،  $S$  توانایی جذب خاک ( $L.T^{-\gamma}$ ) و  $Ks$  هدایت هیدرولیکی اشباع ( $L.T^{-1}$ ) است. پارامتر  $A$  به‌صورت معادله (۲) تعریف می‌شود که در این رابطه،  $r$  شعاع حلقه ( $L$ ) است (۱۶):

$$A = \frac{\gamma}{r(\theta_s - \theta_e)} \quad (2)$$

با فرض اینکه برای کلیه آزمایش‌ها نفوذ بیرکن مقدار رطوبت

### معادله منحنی مشخصه آب خاک

معادله منحنی مشخصه ونگنوختن مطابق معادله (8a) و (8b) ارائه شده است (22):

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ 1 + \left( \frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad (8a)$$

$$m = 1 - \frac{\gamma}{n} \quad (8b)$$

$\theta$  کسر رطوبت حجمی خاک ( $L^3L^{-3}$ ) و  $h$  بار فشاری آب خاک ( $L$ ) است.  $n$  و  $m$  پارامترهای شکل (بدون بعد) و  $h_g$  نیز پارامتر مقیاس است.  $\theta_s$  کسر رطوبت حجمی اشباع خاک ( $L^3L^{-3}$ ) و  $\theta_r$  کسر رطوبت باقیمانده خاک ( $L^3L^{-3}$ ) است که مقدار آن معمولاً خیلی اندک است و در محاسبات آزمایش بیرکن برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود (16). معادله (9a) برای محاسبه پارامتر مقیاس  $h_g$  در معادله ونگنوختن و معادلات (9b) و (9c) برای محاسبه ضریب  $c_p$  ارائه شده است (16):

$$h_g = - \frac{S^r}{c_p \theta_s \left( 1 - \frac{\theta_r}{\theta_s} \right) K_s} \quad (9a)$$

$$c_p = \Gamma \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \left\{ \frac{\Gamma \left( mn - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(mn)} + \frac{\Gamma \left( mn + m - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(mn + m)} \right\} \quad (9b)$$

$$\eta = \frac{\gamma}{mn} + \gamma + p \quad (9c)$$

$\Gamma$  تابع کلاسیک گاما است. مطابق رابطه (9a)، پارامتر مقیاس  $h_g$  تابع مقدار خصوصیات هیدرولیکی  $K_s$  و  $S$  است که بر اساس نتایج مربوط به هر یک از الگوریتم‌های محاسباتی BEST برای هر نقطه (هر مکان) از محدوده مطالعاتی محاسبه می‌شود. طبق نظر برداین (6) پارامتر اعوجاج  $p$  در معادله (9c) برابر با یک است و  $\eta$  نیز پارامتر شکل در رابطه هدایت هیدرولیکی خاک است. مقدار ضریب  $c_p$  نیز تابع مقدار پارامترهای شکل  $n$  و  $m$  است که این پارامترها از منحنی دانه‌بندی به‌دست می‌آیند. با توجه به اینکه فرایند اولیه محاسباتی ارائه شده در الگوریتم BEST برای محاسبه پارامتر  $n$  قدری پیچیده است، میناسنی و مک براتنی (17) مجموعه‌ای از توابع انتقالی را ارائه کردند که

$I_i^{exp}$  مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و  $I_{est}(t_i)$  مقدار نفوذ تجمعی تخمین زده شده توسط الگوریتم BESTslope در مدت زمان  $t_i$  است. بر اساس منابع، مقدار قابل قبول خطای نسبی،  $5/5\%$  ( $Er(t_i) < 5/5\%$ ) است (16). از طرفی در صورتی که خطای نسبی تخمین از  $10\%$  درصد بیشتر نباشد، به‌عنوان تخمین دقیق و اگر از پنج درصد بیشتر نباشد به‌عنوان تخمین خیلی دقیق در نظر گرفته می‌شود (7). برای انتخاب آزمایش‌ها در BESTslope قرار گرفتن مقدار متوسط خطای نسبی در حدود تعریف شده نیز مورد قبول است (4). مقدار حداقل و حداکثر  $k$  (مجموعه نقاط انتخابی) به‌ترتیب برابر با پنج و  $N_{tot}$  است که البته بر اساس پژوهش‌های جدید توصیه می‌شود مقدار حداقل  $k$  برابر با سه در نظر گرفته شود (9). با انجام محاسبات، برای هر مقدار  $k$  مقادیر متناظر  $t_k$  (زمان سپری شده از آزمایش نفوذ)،  $S$ ،  $K_s$ ،  $t_{max}$  و  $Er(t_i)$  به‌دست می‌آید و درنهایت از میان همه نتایج، مقادیر  $S$  و  $K_s$  متناظر با حداکثر مقدار  $t_{max}$  که  $t_k \leq t_{max}$  و مقدار  $Er(t_i)$  آن مطلوب باشد، به‌عنوان نتایج این الگوریتم معرفی می‌شوند (16).

### الگوریتم BESTsteady

الگوریتم BESTsteady که توسط باگارلو و همکاران (4) ارائه شد، در مقایسه با الگوریتم دیگر روش بسیار ساده‌تری برای محاسبه مقدار  $K_s$  و  $S$  محسوب می‌شود. دلیل سادگی این الگوریتم این است که بر خلاف الگوریتم BESTslope که از تلفیق معادلات نفوذ استفاده می‌کرد، تنها از داده‌های نفوذ مربوط به مرحله پایدار ( $i_s^{exp}, b_s^{exp}$ ) برای محاسبه  $K_s$  و  $S$  استفاده می‌کند. با ترکیب معادلات (3a) و (3b) با یکدیگر، معادله (7) به‌دست می‌آید که بر اساس آن، مقدار  $S$  به‌طور مستقیم و بدون نیاز به فرایند وقت‌گیر حداقل کردن مربعات خطا و محاسبه  $t_{max}$  و  $Er$  به‌دست می‌آید:

$$S = \sqrt{\frac{i_s^{exp}}{A + \frac{C}{b_s^{exp}}}} \quad (7)$$

مقدار  $K_s$  نیز از طریق معادلات (3a) یا (3b) محاسبه می‌شود.

مربعیات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب تعیین وزنی ( $\omega r^2$ )، به ترتیب مطابق روابط (۱۲a) تا (۱۲b) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i^{exp} - \theta_{est}(h_i))^2} \quad (10c)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_{est}(h_i) - \theta_i^{exp}) \quad (11c)$$

$$\omega r^2 = \begin{cases} |b| r^2 & \text{for } b \leq 1 \\ |b|^{-1} r^2 & \text{for } b > 1 \end{cases} \quad (12c)$$

مقدار N برابر تعداد جفت مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده است که در این تحقیق برابر با ۳۰ (تعداد آزمایش بیرکن منتخب) است. مقادیر b و  $r^2$  به ترتیب نشان‌دهنده شیب و ضریب تعیین معادله خط رگرسیون بین رطوبت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده است. بر اساس تعریف ارائه شده در رابطه (۱۲c) هر چه مقدار  $\omega r^2$  به یک نزدیک‌تر باشد، دقت تخمین مدل یا الگوریتم مورد نظر بیشتر خواهد بود (۱۵).

## نتایج و بحث

### تحلیل آماری خصوصیات فیزیکی خاک

خلاصه آماری خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. در بررسی اولیه مشخص شد که از مجموع کل ۳۰ آزمایش منتخب بیرکن، ۲۰ آزمایش در بافت لوم و ۱۰ آزمایش در بافت لوم‌شنی است و بنابراین بافت غالب خاک مزرعه آزمایشی، لوم و لوم‌شنی است. پایین بودن مقدار درصد ضریب تغییرات مربوط به چگالی ظاهری ( $\rho_b$ )، رطوبت اولیه ( $\theta_0$ ) و تخلخل ( $\varepsilon$ ) خاک (جدول ۱) نشان می‌دهد که در مجموع خاک مورد آزمایش از نظر خصوصیات فیزیکی یکنواخت است. مقدار رطوبت نسبی اولیه (Se) نیز در کلیه نقاط آزمایش بیرکن کمتر از ۰/۲۵ است که برای تعیین پارامترهای تجربی  $\gamma$ ، A و B مطلوب است.

### تخمین S و Ks توسط الگوریتم‌های BEST

آماره‌های توصیفی ارائه شده در جدول (۲)، به‌ویژه مقدار متوسط و درصد ضریب تغییرات مربوط به پارامترهای S و Ks

به‌سادگی مقدار n را بر حسب درصد ماسه (sand%) و درصد رس (clay%) تخمین می‌زنند و مقدار m نیز از معادله (Ab) محاسبه می‌شود:

$$n = 2/18 + 0/11 \left[ 48/087 - 44/954 S(x_1) - 1/023 S(x_2) - 3/896 S(x_3) \right] \quad (10a)$$

$$x_1 = 25/547 - 0/238(sa) - 0/082(cl) \quad (10b)$$

$$x_2 = -3/569 + 0/081(sa) \quad (10c)$$

$$x_3 = 0/694 - 0/024(sa) + 0/048(cl) \quad (10d)$$

$$S(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (10e)$$

مقدار cl (درصد رس) و sa (درصد شن) بر اساس سیستم طبقه‌بندی USDA از منحنی دانه‌بندی به‌دست می‌آید. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که محاسبه پارامتر شکل (n) با این روش در بالا بردن دقت تخمین منحنی مشخصه بهتر از روش‌های دیگر محاسبه پارامتر n است (۵).

مقدار خطای نسبی در تخمین رطوبت اندازه‌گیری شده در هد فشاری  $h_i$  نیز مطابق رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید. در این رابطه  $\theta_i^{exp}$  مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در آزمایش صفحات فشاری و  $\theta_{est}(h_i)$  مقدار رطوبت تخمین زده شده توسط معادله (۸a) در مکش  $h_i$  است. با توجه به اینکه در معادله (۹a)، پارامتر hg تابع مقادیر Ks و S است، مقدار  $\theta_{est}(h_i)$  نیز در واقع تابع تخمین توسط هر یک از الگوریتم‌های BEST است.

$$Er_{(h,\theta)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [\theta_i^{exp} - \theta_{est}(h_i)]^2}{\sum_{i=1}^k [\theta_i^{exp}]^2}} \quad (11)$$

### معیار ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بیرکن در تخمین منحنی مشخصه

در این تحقیق آزمایش‌هایی برای تحلیل و بررسی انتخاب شد که متوسط خطای نسبی آنها ( $Er_{(t,t)}$ ) کمتر از ۵/۵ درصد باشد (۴ و ۷). بر این اساس از مجموع ۴۰ آزمایش بیرکن، ۳۰ آزمایش انتخاب شد. برای ارزیابی دقت تخمین منحنی مشخصه توسط هر یک از الگوریتم‌های BEST، از پارامترهای مجذور میانگین

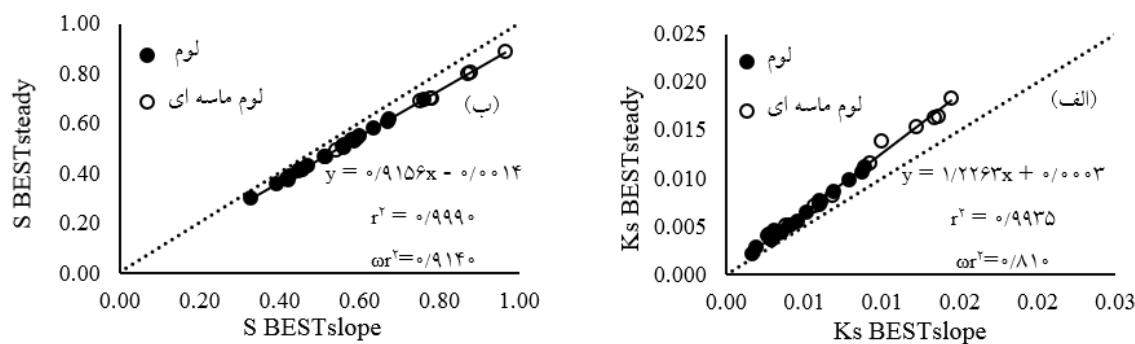
جدول ۱. آماره‌های توصیفی درصد رس، سیلت و ماسه و پارامترهای چگالی ظاهری ( $\rho_b$ )، رطوبت اولیه ( $\theta_0$ )، تخلخل ( $\varepsilon$ ) و رطوبت نسبی اولیه ( $Se$ )

بافت خاک (USDA class)	آماره توصیفی	درصد ماسه	درصد سیلت	درصد رس	( $\rho_b$ ) ( $gr/cm^3$ )	( $\theta_0$ ) ( $cm^3/cm^3$ )	( $\varepsilon$ ) <sup>*</sup> ( $cm^3/cm^3$ )	( $Se$ ) ( $cm^3/cm^3$ )
حداقل	۳۰/۸۰	۱۴/۱۲	۱۰/۴۰	۱/۲۷	۰/۴۱	۰/۰۹	۰/۱۸	
حداکثر	۷۱/۸۸	۸۴/۰۴	۲۶/۴۰	۱/۵۶	۰/۵۲	۰/۱۲	۰/۲۵	
لوم و لوم‌شنی	متوسط	۴۸/۲۲	۳۱/۴۹	۲۰/۲۹	۱/۴۲	۰/۱۰	۰/۲۲	
انحراف معیار	۱۲/۴۶	۹/۵۵	۴/۵۶	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	
درصد ضریب تغییرات	۲۵/۸۴	۳۰/۳۳	۲۲/۴۹	۵/۵۲	۶/۳۳	۶/۴۹	۸/۲۹	

\*در این تحقیق رطوبت حجمی اشباع برابر با تخلخل در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. آماره‌های توصیفی پارامترهای هیدرولیکی تخمینی در هر یک از الگوریتم‌های BEST و خطای نسبی در BESTslope

آماره توصیفی	Ks ( $mms^{-1}$ )		S ( $mms^{-0.5}$ )		Er(t)
	BESTslope	BESTsteady	BESTslope	BESTsteady	BESTslope
حداقل	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۳۲۸	۰/۳۰۲	۲/۵۲۳
حداکثر	۰/۰۱۵	۰/۰۱۸	۰/۹۶۷	۰/۸۸۸	۹/۸۶۳
متوسط	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۵۸۸	۰/۵۳۷	۵/۳۶۲
انحراف معیار	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۱۶۱	۰/۱۴۷	۱/۶۱۶
درصد ضریب تغییرات	۵۹/۱۲	۵۷/۳۲	۲۷/۲۹	۲۷/۳۷	۳۰/۱۲۹



شکل ۲. مقایسه الگوریتم‌های BEST در تخمین الف) Ks و ب) S

مقایسه با Ks بیشتر بوده و مقدار  $\omega r^2$  به عدد یک نزدیک‌تر (۰/۹۱۴) است. مقدار  $\omega r^2$  برای S و Ks در تحقیق باگارلو و همکاران (۴) به ترتیب برابر ۰/۸۵۰ و ۰/۹۱۹ به دست آمده است که نشان‌دهنده نزدیکی نتایج با تحقیق حاضر است. همچنین همان‌گونه که نتایج در جدول (۲) نشان می‌دهد، متوسط خطای نسبی تعداد ۳۰ آزمایش بیرکن منتخب کمتر از ۵/۵ درصد است که در محدوده قابل قبول است.

نشان می‌دهد که نتایج الگوریتم‌های BEST به یکدیگر نزدیک است. هر چند که مطابق شکل (۲) الف مقدار Ks تخمین زده شده در الگوریتم BESTsteady حدود ۲۰ درصد بیشتر از الگوریتم BESTslope است، لیکن مقدار  $\omega r^2$  برابر با ۰/۸۱ و نزدیک به یک است که در مجموع نشان‌دهنده نزدیکی نتایج به دست آمده از هر دو الگوریتم است. مطابق شکل (۲-ب) مقدار نزدیکی نتایج در تخمین S توسط دو الگوریتم BEST

جدول ۳. آماره‌های توصیفی پارامترهای شکل  $m, n, \eta, c_p$  و پارامتر مقیاس  $hg$

$hg$		$c_p$	$\eta$	$m$	$n$	آماره‌های توصیفی	بافت خاک
۲	۱						
۲۸/۴۹۴	۴۲/۳۰۳	۲/۱۹۶	۱۰/۵۳۰	۰/۰۷۶	۲/۱۶۴	حدافل	
۶۷/۰۲۹	۱۲۰/۷۱۲	۲/۴۲۱	۱۵/۲۱۳	۰/۱۱۷	۲/۲۶۶	حداکثر	
۴۸/۳۶۹	۷۵/۵۸۶	۲/۳۴۲	۱۳/۳۸۱	۰/۰۸۹	۲/۱۹۶	متوسط	لوم و لوم‌شنی
۱۰/۳۴۸	۲۱/۳۷۴	۰/۰۶۵	۱/۳۵۹	۰/۰۱۲	۰/۰۲۹	انحراف معیار	
۲۱/۳۹۴	۲۸/۲۷۸	۲/۷۶۹	۱۰/۱۵۹	۱۳/۲۳۸	۱/۳۱۴	درصد ضریب تغییرات	

۱. BESTslope-MM ۲. BESTsteady-MM

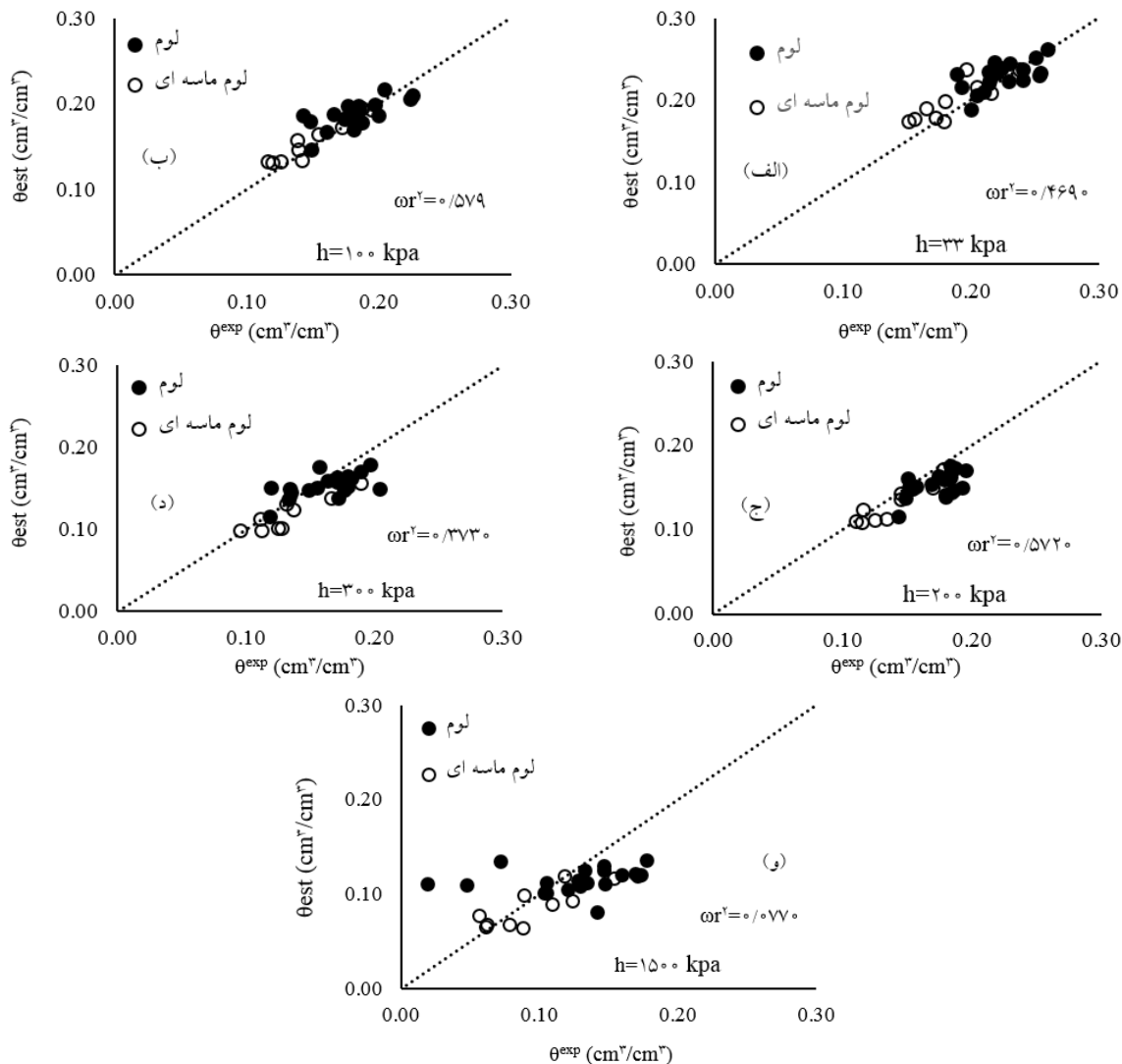
جدول ۴. مقایسه دقت تخمین منحنی مشخصه توسط هر یک از الگوریتم‌های BEST در بافت های لوم و لوم‌شنی

بافت خاک	معیارهای ارزیابی	BESTslope-MM					BESTsteady-MM				
		kpa۱۰۰	kpa۲۰۰	kpa۳۰۰	kpa۱۵۰۰	kpa۳۳	kpa۱۰۰	kpa۲۰۰	kpa۳۰۰	kpa۱۵۰۰	kpa۱۵۰۰
لوم	RMSE	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴	۰/۰۱۹	۰/۰۳۷	۰/۰۱۷	۰/۰۲۱	۰/۰۲۴	۰/۰۳۴	۰/۰۱۵	
	ME	+۰/۰۰۵	-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۷	-۰/۰۰۹	-۰/۰۰۷	-۰/۰۱۴	-۰/۰۱۵	-۰/۰۱۵	-۰/۰۰۵	
لوم‌شنی	RMSE	۰/۰۲۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۲	۰/۰۱۹	۰/۰۱۵	۰/۰۲۱	۰/۰۲۷	۰/۰۲۱	۰/۰۱۰	
	ME	+۰/۰۱۴	+۰/۰۰۷	-۰/۰۰۸	-۰/۰۱۴	-۰/۰۰۲	-۰/۰۱۸	-۰/۰۲۲	-۰/۰۱۱	-۰/۰۰۷	

یک از الگوریتم‌های BEST مؤثر است (جدول ۴). در جدول (۴) مقدار پارامترهای RMSE و ME مربوط به تخمین رطوبت اندازه‌گیری شده در الگوریتم‌های BEST و در شکل (۳- الف الی ۳- و) و همچنین شکل (۴- الف) الی (۴- و)، پراکنش مقادیر  $\theta_i^{exp}$  در مقابل  $\theta_i^{est}$  در مقایسه با خط ۱:۱ ( $Y=X$ ) به همراه مقادیر  $\omega r^2$  برای هر یک از مکش‌های مورد مطالعه ارائه شده است. بررسی نتایج در بافت لوم و لوم‌شنی نشان می‌دهد که برای هر دو الگوریتم BEST، رطوبت تخمین زده شده در مکش‌های ۳۳، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال (رطوبت‌های نزدیک به ظرفیت زراعی) به مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر نزدیک‌تر بوده و با مقدار RMSE کمتر و  $\omega r^2$  بیشتر، در مقایسه با دو مکش ۳۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال از دقت بیشتری برخوردارند. در مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال (نقطه پژمردگی دائم) با مقدار  $\omega r^2$  حداقل (حدود ۱/۰) و مقدار RMSE حداکثر، هر دو مدل بدترین عملکرد را داشته‌اند. این نتایج با یافته‌های باگارلو و همکاران (۴) که کمترین دقت را در

تخمین منحنی مشخصه آب خاک توسط الگوریتم‌های BEST همان‌گونه که در جدول (۳) نشان داده شده است با توجه به اینکه برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی از الگوریتم‌های BEST و برای تخمین پارامتر شکل ( $n$ ) در معادله ونگنوختن از روش میناسنی و مک براتی (۱۷) استفاده شده است، از عبارت MM در انتهای نام هر یک از الگوریتم‌های BEST، به‌عنوان الگوریتم‌های تخمین‌زننده منحنی مشخصه استفاده شده است. بررسی نتایج به‌دست آمده نشان داد که ضریب تغییرات پارامترهای شکل  $m, n$  و  $\eta$  در مجموع اندک است که نشانگر تغییرات اندک در بافت خاک محدوده مطالعاتی است. آماره‌های توصیفی پارامتر مقیاس ( $hg$ ) محاسبه شده توسط هر یک از الگوریتم‌های BEST (جدول ۳) نشان می‌دهد که مقدار تخمینی این پارامتر در الگوریتم BESTslope-MM بیشتر است، لیکن میزان تأثیر این اختلاف در تخمین  $hg$  در دقت تخمین رطوبت متناظر با هر یک از مکش‌های ۳۳ تا ۱۵۰۰ کیلو پاسکال توسط معادله ونگنوختن و در مقدار پارامترهای RMSE، ME و  $\omega r^2$  برای هر



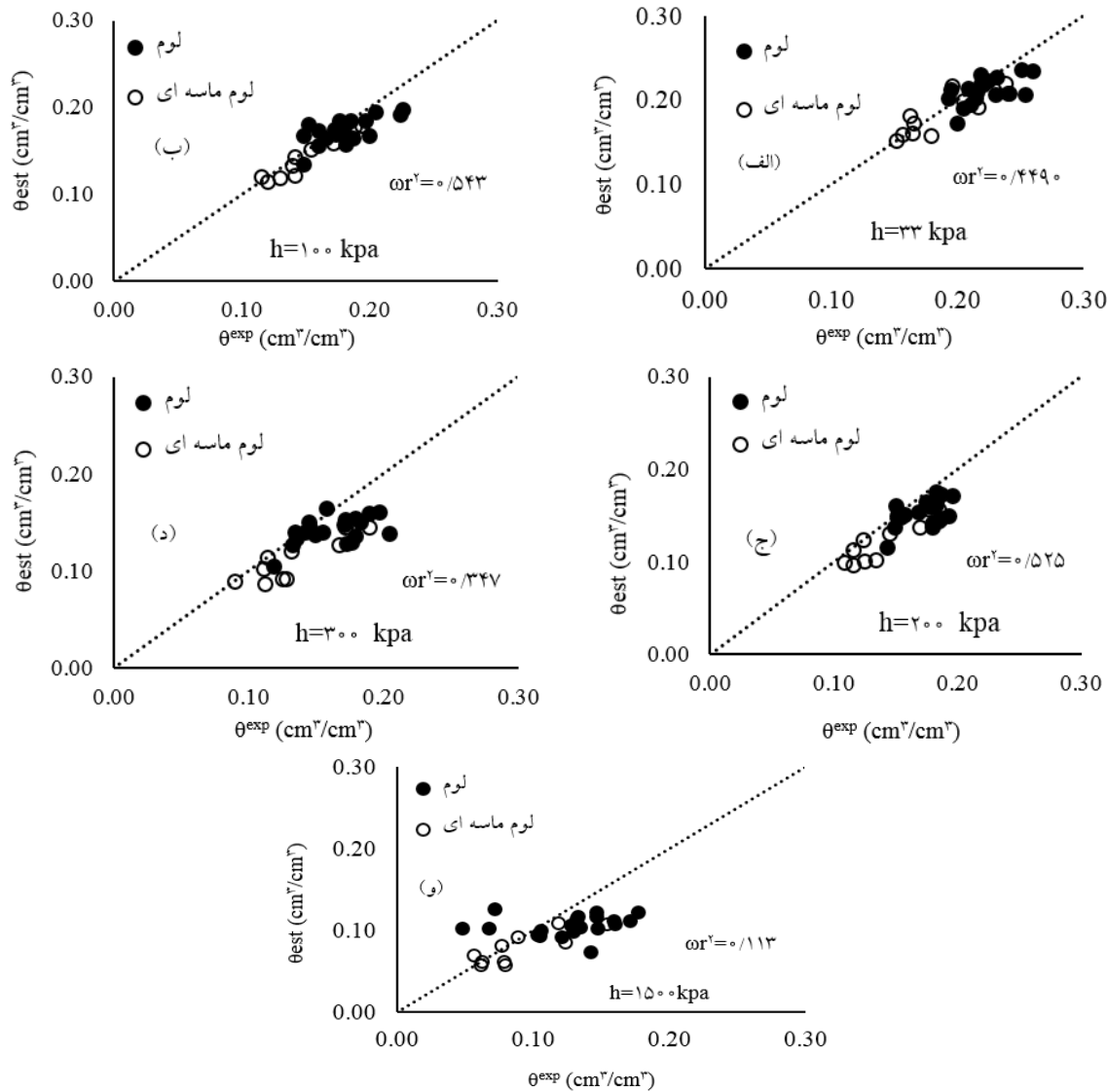


شکل ۳. مقایسه بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده متناظر با مکش‌های ۳۳ تا ۱۵۰۰ کیلو پاسکال

(الف تا و) توسط الگوریتم BESTslope-MM

تخمین نقاط رطوبتی در مکش‌های ۳۳ تا ۱۵۰۰ کیلو پاسکال توسط الگوریتم BESTslope-MM و در هر دو بافت لوم و لوم‌شنی بیشتر از الگوریتم BESTsteady-MM است، لیکن اختلاف بین دو الگوریتم ناچیز است. عملکرد ضعیف مدل‌ها در مکش‌های بالا تأییدی بر نتیجه‌گیری هاورکمپ و همکاران (۱۴) است که بیان کرده بودند معادله ونگنوختن در توصیف منحنی رطوبتی در مکش‌های بالا (شرایط خشک) ضعیف عمل می‌کند.

فشارهای مکشی کمتر (پتانسیل ماتریک منفی‌تر) گزارش کردند، مطابقت دارد. همچنین در الگوریتم BESTslope-MM در هر دو بافت خاک، مقادیر ME به‌دست آمده نشان‌دهنده بیش‌برآورد رطوبت در مکش‌های پایین (۳۳ و ۱۰۰ کیلو پاسکال) و کم‌برآورد رطوبت در مکش‌های بالا (۲۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال) است. این در حالی است که الگوریتم BESTsteady-MM در همه مکش‌ها کم‌برآورد داشته است. در مجموع بر اساس مقادیر RMSE، ME و  $\omega r^2$  دقت

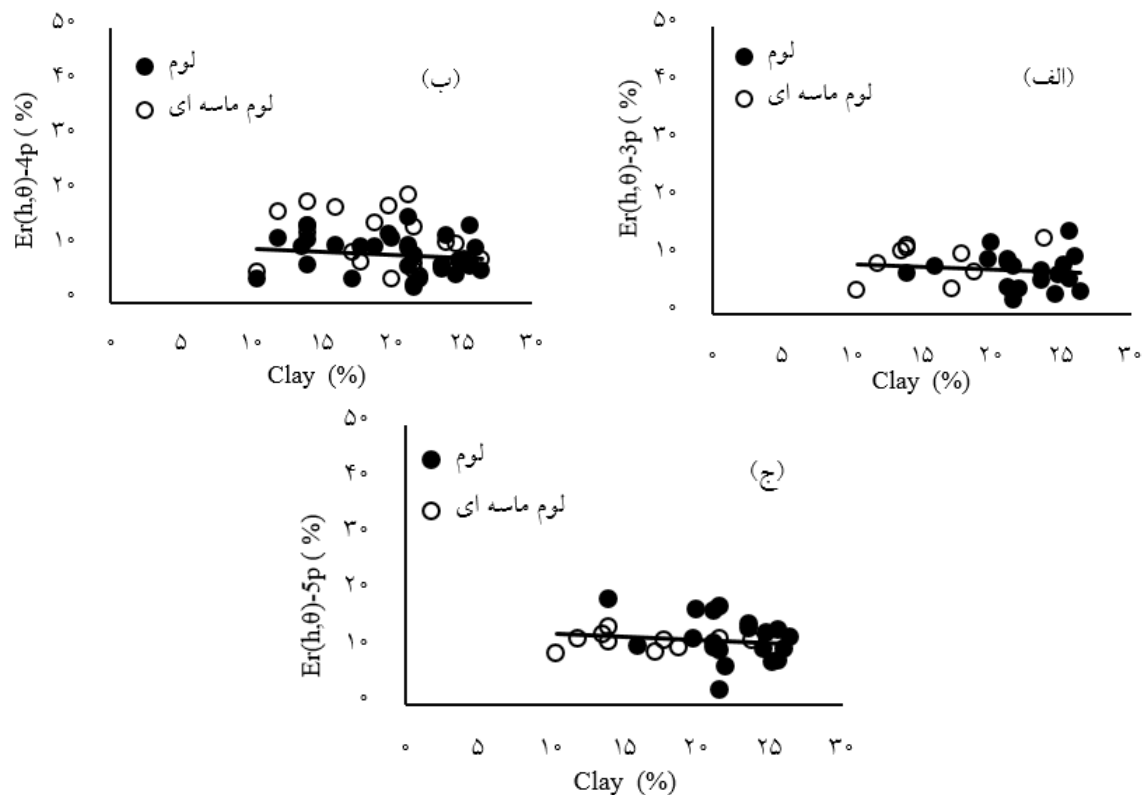


شکل ۴. مقایسه بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت تخمین زده شده متناظر با مکش‌های ۳۳ تا ۱۵۰۰ کیلو پاسکال

الف تا و) توسط الگوریتم BESTsteady-MM

همچنین درصد رس تنها جزئی از خاک است که به سیستم طبقه‌بندی خاک (مانند USDA و ISSS) بستگی ندارد و از طرفی طبق پژوهش‌های گذشته ارتباط نزدیکی بین درصد رس خاک با خطای سایر مدل‌های برازشی خاک به‌ویژه مدل‌های توزیع اندازه ذرات مشاهده شده است (۳ و ۸). با توجه به اینکه مقدار پارامترهای RMSE، ME و  $\omega r^2$  در سه مکش ۳۳، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال تا حدودی مشابه به‌دست آمد، تغییر مقدار

رابطه خطای نسبی ( $Er(h,\theta)$ ) با مقدار درصد رس (Clay%) از آنجا که مقدار درصد رس نمونه‌های خاک مورد آزمایش بین ۱۰ تا ۲۶ درصد متغیر است (جدول ۱)، اثر مقدار درصد رس بر مقدار خطای نسبی تخمین رطوبت در منحنی مشخصه  $Er(h,\theta)$  بررسی شد. انتخاب درصد رس برای ارزیابی مقادیر خطای نسبی به این دلیل است که معمولاً فقط درصد اجزای بافت خاک در بانک اطلاعات خاک گزارش می‌شوند و



شکل ۵. تغییرات مقدار خطای نسبی برازش  $(Er_{(h,\theta)})$  در مقابل تغییر در مقدار درصد رس خاک برای الف) سه نقطه اول،

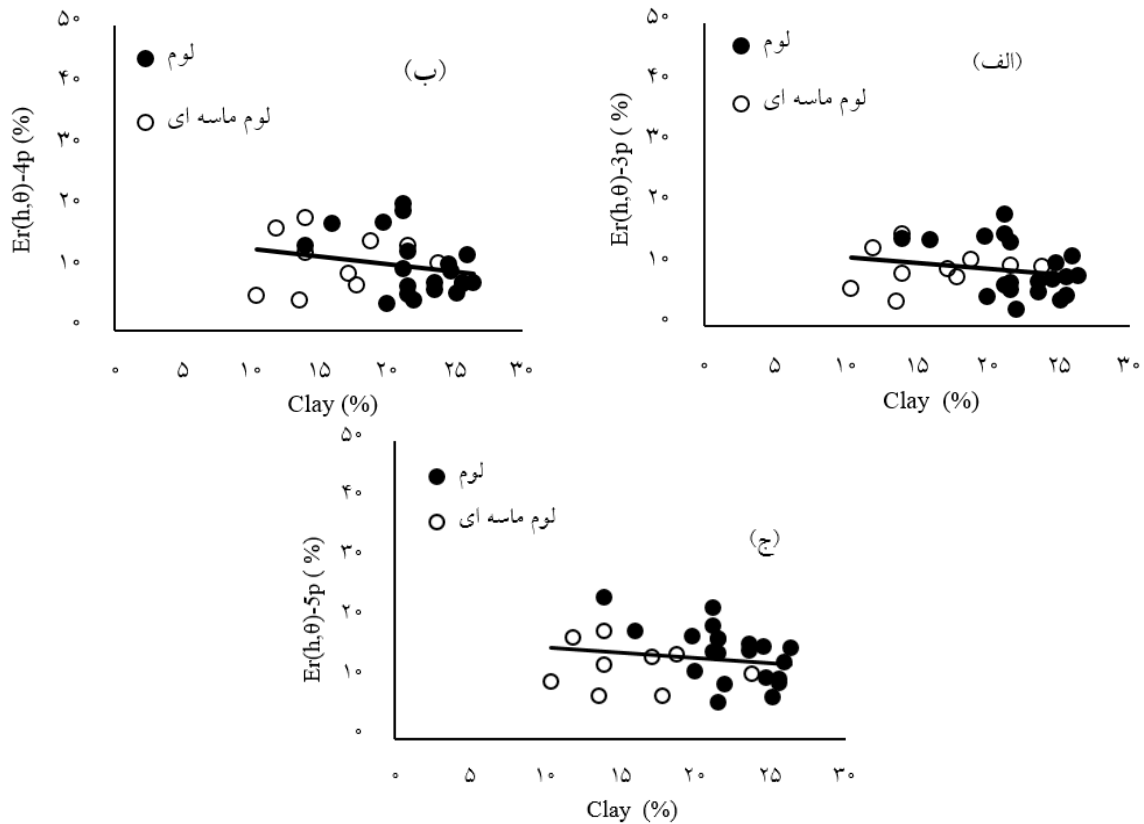
ب) چهار نقطه اول و ج) پنج نقطه اول منحنی مشخصه در الگوریتم BESTslope-MM

دو حالت دیگر است. همچنین نتایج نشان داد که هر چند دقت تخمین توسط الگوریتم BESTslope-MM بیشتر و مقدار خطای نسبی برازش  $(Er_{(h,\theta)})$  کمتر است، لیکن این اختلاف قابل توجه نیست. با توجه به مقادیر متوسط خطای نسبی  $(Er_{(h,\theta)})$  به دست آمده برای ۳۰ آزمایش منتخب (جدول ۵) و بر اساس تعریف ارائه شده توسط دی‌پری‌ما و همکاران (۷)، دقت برآورد منحنی مشخصه آب خاک توسط هر دو الگوریتم BEST و در هر سه حالت، دقیق و نزدیک به دقیق محسوب می‌شود.

### نتیجه‌گیری

امروزه تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از روش‌های غیرمستقیم و ساده به‌ویژه در رطوبت‌های نزدیک به ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی بسیار مهم است. در این پژوهش نشان داده شد که با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی

خطای نسبی با درصد رس خاک در سه حالت بررسی شد. مقدار خطای نسبی برازش بر سه نقطه اول (سه مکش اول) و همچنین مقدار خطای نسبی برازش بر چهار و سپس پنج نقطه منحنی رطوبتی که به ترتیب با عبارات  $(Er_{(h,\theta)3P}$ )،  $(Er_{(h,\theta)4P}$ ) و  $(Er_{(h,\theta)5P})$  در شکل (۵) (الگوریتم BESTslope-MM) و شکل (۶) (الگوریتم BESTsteady-MM) نشان داده شده است. بررسی این شکل‌ها نشان داد که به‌طور مشابه در هر دو الگوریتم، با افزایش درصد رس خاک مقدار خطای نسبی برازش  $(Er_{(h,\theta)})$  در هر سه حالت با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های باگارلو و همکاران (۵) مطابقت دارد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، بررسی آماره‌های توصیفی ارائه شده در جدول (۵) (متوسط، انحراف معیار و درصد ضریب تغییرات) نشان می‌دهد که مقدار خطای نسبی برازش شده بر سه نقطه اول فشار مکشی  $(Er_{(h,\theta)3P})$  کمتر از مقادیر خطای نسبی به دست آمده در



شکل ۶. تغییرات مقدار خطای نسبی برازش  $(Er(h,\theta))$  در مقابل تغییر در مقدار درصد رس خاک برای الف) سه نقطه اول، ب) چهار نقطه اول و ج) پنج نقطه اول منحنی مشخصه در الگوریتم BESTsteady-MM

جدول ۵. آماره‌های توصیفی مقدار خطای نسبی برازش  $(Er(h,\theta))$  در سه حالت و در دو الگوریتم BEST

BESTsteady-MM			BESTslope-MM			آماره‌های توصیفی	بافت خاک
$(Er(h,\theta)5P)$	$(Er(h,\theta)4P)$	$(Er(h,\theta)3P)$	$(Er(h,\theta)5P)$	$(Er(h,\theta)4P)$	$(Er(h,\theta)3P)$		
۶/۰۲۹	۴/۳۶۱	۲/۷۴۵	۲/۵۷۰	۲/۶۴۳	۲/۵۵۹	حداقل	لوم و لوم‌شنی
۲۳/۵۸۵	۲۰/۶۰۱	۱۸/۴۸۳	۱۸/۹۴۹	۱۵/۵۶۱	۱۴/۴۵۲	حداکثر	
۱۳/۶۱۶	۱۰/۷۸۷	۹/۳۳۵	۱۱/۶۴۴	۸/۶۴۶	۷/۸۳۰	متوسط	
۴/۴۵۹	۴/۸۲۲	۴/۰۱۸	۳/۳۷۶	۳/۴۳۸	۳/۲۳۴	انحراف معیار	
۳۲/۷۴۵	۴۴/۷۰۱	۴۳/۰۴۵	۲۸/۹۸۹	۳۹/۷۶۷	۴۱/۲۹۸	درصد ضریب تغییرات	

BESTsteady بود، لیکن با توجه به فرایند محاسباتی بسیار ساده‌تر BESTsteady در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک (S و  $K_s$ ) و دقت قابل قبول آن در تخمین منحنی مشخصه در مکش‌های ۳۳، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال، روش اخیر می‌تواند در مطالعات مشابه آینده مورد توجه قرار گیرد. دقت تخمین مقدار

بیرکن (BESTslope و BESTsteady) و در اختیار داشتن داده‌های برداشت شده از آزمایش نفوذ بیرکن، می‌توان مقدار رطوبت خاک نزدیک به ظرفیت زراعی را با دقت قابل قبولی برآورد کرد. هر چند که در مجموع دقت تخمین الگوریتم BESTslope در هر دو بافت لوم و لوم‌شنی بیشتر از

پژوهش زیاد نیست، انجام مطالعات مشابه در خاک‌های با درصد رس بالا (بالاتر از ۳۰ درصد) و با درصد رس پایین (کمتر از ۱۰ درصد) و برای بافت‌های مختلف با درصد مواد آلی متفاوت در پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود. همچنین در پژوهش‌های دیگر استفاده از دیگر معادلات تخمین منحنی مشخصه برای بررسی و مقایسه دقت تخمین رطوبت‌های اندازه‌گیری شده می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد.

رطوبت خاک متناظر با مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال (رطوبت در نقطه پژمردگی) در هر دو الگوریتم ضعیف و غیرقابل قبول تشخیص داده شد. از طرفی با افزایش درصد رس خاک، خطای نسبی تخمین رطوبت در مکش‌های پنجگانه ( $ER_{(h, \theta)}$ ) با شیب ملایم کاهش و به عبارتی دقت تخمین افزایش یافت. با این وجود، برای دستیابی به نتیجه دقیق‌تر در این زمینه و با توجه به اینکه بازه تغییرات درصد رس در خاک‌های مورد مطالعه در این

### منابع مورد استفاده

1. Aiello, R., V. Bagarello, S. Barbagallo, S. Consoli, S. Di Prima, G. Giordano and M. Iovino. 2014. An assessment of the Beerkan method for determining the hydraulic properties of a sandy loam soil. *Biosystems Engineering* 104: 435-441.
2. Babaeian, E., M. Homaei and A. A. Norouzi. 2015. Evaluating point and parametric spectral transfer functions for a prediction of soil water characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 45(4): 475-490. (In Farsi).
3. Bagarello, V., G. Provenzano and A. Sgroi. 2009. Fitting particle size distribution models to data from Burundian soils for the BEST procedure and other purposes. *Biosystems Engineering* 104: 435-441.
4. Bagarello, V., S. Di Prima and M. Iovino. 2014. Comparing alternative algorithms to analyze the Beerkan infiltration experiment. *Soil Science Society of America* 78: 724-736.
5. Bagarello, V. and M. Iovino. 2012. Testing the BEST procedure to estimate the soil water retention curve. *Geoderma* 187-188: 67-76.
6. Burdine, N. T. 1953. Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology* 5: 71-78.
7. Di Prima, S., L. Lassabatere, V. Bagarello, M. Iovino and R. Angulo-Jaramillo. 2016. Testing a new automated single ring infiltrometers for Beerkan infiltration experiments. *Geoderma* 262: 20-34.
8. Fredlund, M. D., D. G. Fredlund and G. W. Wilson. 2000. An equation to represent grain-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal* 37: 817-827.
9. Ghavidel far, S., A. Shamsedin and B. Melville. 2015. Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty through the Beerkan infiltration experiment. *Hydrological Process* 29: 3699-3713.
10. Gee, G. W. and D. Or. 2002. 2.4 Particle-size analysis. pp. 255-293. In: Dane, J. H. and G. C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4, Physical Methods.* : SSSA Book Series. 5. Soil Science Society of America. Inc. Madison. WI.
11. Hagh verdi, A., B. Ghahreman, M. Jalini, A. A. Khoshnood yazdi and Z. Arabi. 2010. Modeling water retention curve of some Iranian soils using pseudo parametric neural network pedotransfer functions. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 1(1): 69-82. (In Farsi).
12. Haverkamp, R., P. Ross, K. Smetten and J. Parlange. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research* 30: 2931-2935.
13. Haverkamp, R., J. L. Arru, E. J. P. Vandervaere, I. Braud, G. Boulet, J. P. Laurent, A. Taha, P. J. Ross and R. Angulo-Jaramillo. 1996. Hydrological and thermal behaviour of the vadose zone in the area of Barrax and Tomelloso (Spain): Experimental study, analysis and modeling. France: LTHE.
14. Haverkamp, R., F. J. Leij, C. Fuentes, A. Sciortino and P. J. Ross. 2005. Soil water retention: I. Introduction of a shape index. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1881-1890.
15. Krause, P., D. P. Boyle and F. Base. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model. *Advances in Geosciences* 5: 89-97.
16. Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, J. M. Soria Ugalde, R. Cuenca, I. Braud and R. Haverkamp. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments. *Soils Soil Science Society American Journal* 70: 521-532
17. Minansy, B. and A. B. McBratney. 2007. Estimating the water retention shape parameter from sand and clay content. *Soil Science Society of America Journal* 71: 1105-1110.
18. Matula, S., M. Mojrová and K. Špongrová. 2007. Estimation of the soil water retention curve (SWRC) using

- pedotransfer functions (PTFs). *Soil and Water Research* 27: 113-122.
19. Mubarak, I., J. Mailhol, R. Angulo-Jaramillo, P. Ruelle, P. Boivin and M. Khaledian 2009. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. *Geoderma* 150:158-165.
  20. Mubarak, I., R. Angulo-Jaramillo, J. C. Mailhol, P. Ruelle, M. Khaledian and M. Vauclin. 2010. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: is infiltration method dependent? *Agricultural Water Management* 97: 1517-1526
  21. Twarakavi, N. K. C., J. Šimůnek and M. G. Schaap. 2008. Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines. *Soil Science Society of America Journal* 73:1443-1452
  22. Van Genuchten, M. TH. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
  23. Wu, L., L. Pan, J. Mitchell and B. Sanden. 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. *Soil Science Society of America* 63: 788-792.
  24. Xu, X., G. Kiely and G. Lewis. 2009. Estimation and analysis of soil hydraulic properties through infiltration experiments: comparison of BEST and DL fitting methods. *Soil Use and Management* 25: 354-361.
  25. Xu, X., C. Lewis, W. Liu, J. Albertson and G. Kiely. 2012. Analysis of single-ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: Comparison of BEST and Wu methods. *Agriculture Water Management* 107: 34-41.
  26. Yilmaz, D., L. Lassabatere, R. Angulo-Jaramillo, D. Deneele and M. Legret. 2010. Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. *Vadose Zone* 9: 107-116.

## Estimation of Soil Hydraulic Properties Curve through Beerkan Infiltration Experiment Algorithms

T. Ahmady, M. Delbari\* and P. Afrasiab<sup>1</sup>

(Received: February 16-2017 ; Accepted: June 24-2018)

### Abstract

Nowadays, the Beerkan computational algorithms (BESTslope and BESTsteday) are known as the suitable indirect methods for estimating soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) and sorptivity ( $S$ ), as well as the scale parameter ( $hg$ ) in van Genuchten soil water retention equation through the data collected in the Beerkan infiltration experiment and other required data. The purpose of this study was to compare these algorithms in estimating  $K_s$  and  $S$ , as well as the soil water content corresponding to the suctions of 33 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa and 1500 kPa. For this purpose, a total of 40 Beerkan infiltration experiments were carried out in Sistan dam research field. From all Beerkan experiments, 30 tests in loam and sandy loam textures having a relative error less than 5.5% ( $Er < 5.5\%$ ) were selected for further analysis. The statistical criteria RMSE, ME and  $\omega r^2$  were used to compare the measured and estimated water content values at each suction. The results showed that the BESTsteday algorithm, which had a more simple calculating process than the main algorithm (i.e. BESTslope), could provide the  $K_s$  and  $S$  values and the soil water content of the near field capacity with an acceptable accuracy. The model performance in estimating water content corresponding to the 1500 kpa suction head (i.e.  $\theta_{fc}$ ) was not acceptable for both algorithms. Moreover, the relative error of estimating soil water content ( $Er_{(h,\theta)}$ ) was decreased gradually by an increase in clay %.

**Keywords:** Sorptivity, Relative error of fitting, Soil water retention curve, Saturated hydraulic conductivity

---

1. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir