

مقایسه الگوریتم‌های مختلف تحلیل آزمایش نفوذ بیرکن در منطقه سیستان

تارخ احمدی¹، پیمان افراسیاب^{2*}، معصومه دلبری²

تاریخ دریافت: 1394/10/29 تاریخ پذیرش: 1395/8/9

چکیده

در سال‌های اخیر روش آزمایش نفوذ تک‌استوانه‌ای بیرکن به دلیل کم‌هزینه بودن و سادگی در اجرا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. الگوریتم‌های BESTslope، BESTintercept و BESTsteady الگوریتم‌هایی هستند که از طریق داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن، خصوصیات هیدرولیکی خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و توانایی جذب خاک (S) را تخمین می‌زنند. هدف از پژوهش حاضر مقایسه سه الگوریتم مذکور در تخمین خصوصیات هیدرولیکی خاک و تخمین منحنی مشخصه و منحنی هدایت هیدرولیکی خاک است. برای این منظور تعداد 40 آزمایش نفوذ بیرکن در مزرعه تحقیقاتی سد سیستان انجام شد. مقادیر منفی و مثبت با خطای نسبی (Er) بیش‌تر از 5/5 درصد از مجموع کل نتایج حذف شد و در نهایت تعداد 31 آزمایش در بافت‌های لومی و لوم ماسه‌ای انتخاب گردید. نتایج نشان داد که الگوریتم BESTsteady فرآیند محاسباتی بسیار ساده‌تری نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد. از طرفی مقدار S ، K_s و منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده با این الگوریتم با دقت بسیار خوبی مشابه نتایج به‌دست آمده از الگوریتم BESTslope (الگوریتم اصلی) بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم BESTsteady در خاک‌های لومی و لوم ماسه‌ای می‌تواند به‌عنوان یک الگوریتم کاربردی، جایگزین بسیار مناسبی برای دو الگوریتم دیگر و به‌خصوص الگوریتم اصلی باشد.

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

مقدمه

تحقیقات بعدی توسط ایلماز و همکاران به نام الگوریتم BESTslope نام گذاری شد، به‌عنوان یک فرآیند محاسباتی برای تحلیل داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن (t_i, I_i) و محاسبه پارامترهای هیدرولیکی خاک (S, K_s) معرفی کردند (Yilmaz et al., 2010, Lassabatere et al., 2006). این الگوریتم به‌عنوان الگوریتم اصلی در آزمایش نفوذ بیرکن شناخته شده است (Bagarello et al., 2014b). در مقایسه‌ای که بین عملکرد روش BEST با روش خطی‌سازی اشتقاقی منحنی نفوذ⁵ انجام پذیرفت، عملکرد الگوریتم BEST در تخمین مقدار مثبت هدایت هیدرولیکی اشباع بسیار بهتر از روش خطی‌سازی منحنی نفوذ معرفی گردید (Xu et al., 2009). از طرفی استفاده از الگوریتم اصلی ممکن است به مقادیر منفی و یا حتی مقادیر خطا در محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع منتهی شود، بنابراین الگوریتم BESTintercept به‌عنوان یک الگوریتم مناسب که می‌تواند جواب‌های قابل اطمینان‌تری ارائه کند معرفی گردید (Yilmaz et al., 2010). هر دو الگوریتم اشاره شده مقادیر S و K_s را بر پایه تلفیق معادلات نفوذ در فاز گذرا⁶ و فاز پایدار⁷ تخمین می‌زنند. در آزمایش نفوذ داده‌های جمع‌آوری

پارامترهای هیدرولیکی سطحی خاک در مطالعات هیدرولوژی و زهکشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پارامترها شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و توانایی جذب خاک (S) می‌باشند. امروزه برای محاسبه این پارامترها از آزمایشات مختلف نفوذ استفاده می‌شود که اجرای آن‌ها نیز معمولاً زمان‌بر و یا هزینه‌بر می‌باشند. هاور کمپ و همکاران آزمایش نفوذ بیرکن را به‌عنوان یک روش ساده معرفی کردند (Haverkamp et al., 1994). امروزه این روش جدید به‌دلیل سادگی در اجرا و هزینه کم‌تر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سادگی این روش به‌دلیل استفاده از یک حلقه است که در حدود یک سانتی‌متر در زمین فرو می‌رود و حجم کم و ثابت آبی که به‌طور تکراری بر روی سطح خاک درون حلقه ریخته می‌شود (Bagarello et al., 2014a) و لاساباتری و همکاران الگوریتم BEST را که در

1- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشگاه زابل

2- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه زابل

*- نویسنده مسئول: (Email: peyman.afrafiab@uoz.ac.ir)

3- Beerkan infiltration experiment

4- BEST: Beerkan estimation of soil transfer parameters

5- DL (Derivative linearization)

6- Transient phase

7- Steady state phase

رطوبت حجمی اشباع خاک (L^3L^{-3}) و θ_r کسر رطوبت باقی‌مانده خاک است (L^3L^{-3}). مقدار رطوبت باقیمانده معمولاً خیلی اندک می‌باشد که در محاسبات آزمایش بیرکن برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (LT^{-1}) است و پارامتر h_g با استفاده از رابطه 3a و 3b تخمین زده می‌شود (Bagarello et al., 2014b):

$$h_g = - \frac{S^2}{c_p (\theta_s - \theta_r)} \left[1 - \left(\frac{\theta_s}{\theta_r} \right)^{\frac{1}{n}} \right] K_s \quad (3a)$$

$$c_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left\{ \frac{\Gamma(m\eta - \frac{1}{n})}{\Gamma(m\eta)} + \frac{\Gamma(m\eta + m - \frac{1}{n})}{\Gamma(m\eta + m)} \right\} \quad (3b)$$

Γ تابع کلاسیک گاما می‌باشد. معادله 4 برای محاسبه S در محدوده رطوبت اولیه خاک (θ_0) و رطوبت اشباع خاک (θ_s) ارائه شده است (Parlange., 1975):

$$S^2 = \int_{\theta_0}^{\theta_s} (\theta + \theta_s - 2\theta_0) D(\theta) d\theta \quad (4)$$

$D(\theta)$ پخشیدگی آب در خاک است که تابع مقدار کسر رطوبت حجمی در خاک می‌باشد. مینان سی و مک براتنی معادله‌ای را برای محاسبه پارامتر شکل n ارائه نمودند که با استفاده از شبکه‌های عصبی به‌دست آمده است. این معادله مقدار n را بر حسب درصد ماسه (sand%) و درصد رس (clay%) تخمین می‌زند و مقدار m نیز از معادله 1c محاسبه می‌شود (Minancy and McBratney., 2007):

$$n = 2.18 + 0.11[48.087 - 44.954 S(x_1) - 1.023 S(x_2) - 3.896 S(x_3)] \quad (5a)$$

$$x_1 = 25.547 - 0.238(sa) - 0.082(cl) \quad (5b)$$

$$x_2 = -3.569 + 0.081(sa) \quad (5c)$$

$$x_3 = 0.694 - 0.024(sa) + 0.048(cl) \quad (5d)$$

$$S(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (5e)$$

در این روابط cl درصد رس و sa درصد شن می‌باشند.

معادلات نفوذ

به‌طور کلی نفوذ آب در خاک را می‌توان شامل دو فاز گذرا و فاز پایدار در نظر گرفت که برای هر یک از این فازها معادله‌ای ارائه شده است. معمولاً تشخیص مدت زمان فاز گذرا (فاز اول نفوذ) در کل مدت زمان نفوذ به‌راحتی میسر نمی‌باشد. در تحلیل داده‌های آزمایش بیرکن برای تعیین بازه زمانی فاز گذرا $([0, t_{max}])$ از روش ارائه شده توسط لاساباتری و همکاران که در ادامه توضیح داده خواهد شد استفاده می‌شود.

هاور کمپ و همکاران معادلات نفوذ تجمعی دو ترمی در فاز گذرا $(I(t))$ و در فاز پایدار $(I_m(t))$ را به‌ترتیب در قالب معادلات 6a و 6b ارائه نمودند که با مشتق‌گیری از این معادلات سرعت نفوذ در فاز گذرا $(i(t))$ و فاز پایدار (i_s) به‌دست می‌آید (Haverkamp et al., 1994):

$$I(t) = S\sqrt{Et} + (A.S^2 + B.K_s).t \quad (6a)$$

شده از چند دقیقه اول آزمایش اطمینان کم‌تری در مقایسه با داده‌هایی که بعداً قرائت می‌شود، دارد (Wu et al., 1999). باگارلو و همکاران تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه بررسی نتایج دو الگوریتم مذکور و همچنین معرفی الگوریتم جدیدی به‌نام $BEST_{steady}$ انجام دادند. در این الگوریتم پارامترهای هیدرولیکی K_s و S براساس شیب (i_s^{EXP}) و عرض از مبدا (b_s^{EXP}) معادله خطی نفوذ در فاز پایدار محاسبه می‌شود. فرآیند محاسبه پارامترهای هیدرولیکی در این الگوریتم بسیار ساده‌تر از دو الگوریتم دیگر می‌باشد (Bagarello et al., 2014b).

با توجه به اینکه فرآیندهای محاسباتی دو الگوریتم اول جهت محاسبه K_s و S وقت‌گیر و قدری پیچیده می‌باشد و حتی مطابق برخی تحقیقات، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع را منفی محاسبه می‌نمایند، بنابراین ضرورت بررسی و دقت عملکرد $BEST_{steady}$ که ساده‌ترین فرآیند محاسباتی را در مقایسه با دو الگوریتم دیگر دارد و همیشه مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع را در بافت‌های مختلف خاک بصورت مثبت محاسبه می‌نماید، مورد توجه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

تئوری

در فرآیند محاسباتی تعریف شده برای سه الگوریتم مذکور که پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و توانایی جذب خاک (S) را محاسبه می‌نمایند، جهت تخمین پارامترهای شکل $^1 (n, m, \eta)$ و پارامتر مقیاس $^2 (h_g)$ نیز بر معادله منحنی مشخصه وگنوختن (1a تا 1c) با شرط بورداین و بر معادله هدایت هیدرولیکی بروکس و کوری (2a, 2b) متمرکز شده‌اند (Brooks and Corey., 1964; Van Genuchten., 1980; Burdine., 1953):

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

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

$$m = 1 - \frac{2}{n} \quad (1c)$$

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left[\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^\eta \quad (2a)$$

$$\eta = \frac{2}{m.n} + 2 + p \quad (2b)$$

معادله 1b شکل دیگر معادله 1a می‌باشد. θ کسر رطوبت حجمی خاک (L^3L^{-3}) و h هد فشاری آب خاک (L) می‌باشند. n و m پارامترهای شکل (بدون بعد) و p پارامتر اعوجاج (بدون بعد) می‌باشند. طبق نظر بورداین مقدار p برابر با یک است (Burdine., 1953). پارامترهای $\theta_s, \theta_r, h_g, K_s$ پارامترهای مقیاس هستند. θ_s کسر

1 Shape parameters

2 Scale parameter

از مجموع کل داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن در هر اجرا می‌باشد. به-
طور مثال وقتی $k=6$ شش داده اول آزمایش نفوذ بیرکن برای برازش
بر معادله 9b انتخاب شده است. مقدار خطای نسبی برازش (Er) نیز
مطابق معادله 11 برای هر مقدار k محاسبه می‌شود (Lassabatero
et al., 2006):

$$Er = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_i^{exp} - I_{est}(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^k [I_i^{exp}]^2}} \quad (11)$$

در صورتی که مقدار $B=0$ معادله 6a به شکل معادله 12 تبدیل
می‌شود:

$$I(t) = S\sqrt{t} + (AS^2)t \quad (12)$$

حداکثر ممکن توانایی جذب S_{max} با تعریف معادله 12، مقدار
(Lassabatero et al., 2006) قابل استخراج است (13b و خاک) از روابط

$$S_{max} = \max_{k=1, \dots, N_{tot}} \left[\min \left(S_{(B=0)k}, \sqrt{\frac{I_k^{exp}}{A}} \right) \right] \quad (13a)$$

$$S_{(B=0)k} = \min \sum_{i=1}^k [I_i^{exp}(t_i) - I_{est}(t_i)]^2 \quad (13b)$$

رابطه 13b حداقل مربعات خطای برازش معادله 12 بر داده‌های
آزمایش بیرکن به ازای مقادیر مختلف k می‌باشد. برای هر مقدار k
مقادیر S و S_{max} متناظر و خطای نسبی برازش مربوطه محاسبه می-
گردد. اگر مقدار S محاسبه شده از معادله 9b بیش‌تر از مقدار S_{max}
باشد، مقدار S_{max} به‌عنوان مقدار قابل قبول توانایی جذب خاک ارائه
می‌گردد، در غیر این صورت S به‌عنوان نتیجه قابل قبول ارائه می‌شود.
پس از انتخاب S مقدار Ks از رابطه 9a تخمین زده می‌شود. مقدار
 t_{max} (مدت زمان نفوذ در فاز گذرا) نیز با استفاده از معادله 14 به‌دست
می‌آید:

$$t_{max} = \frac{1}{4(1-\beta)} \left(\frac{S}{K_s} \right)^2 \quad (14)$$

برای هر مقدار k مقادیر t_k متناظر (زمان سپری شده از آزمایش
نفوذ) و S قابل قبول، Ks و t_{max} ، Er متناظر در یک جدول به‌دست
می‌آید. در نهایت مقادیر S و Ks متناظر با حداکثر مقدار t_{max} که
 $t_k \ll t_{max}$ باشد، به‌عنوان نتایج این الگوریتم معرفی می‌شوند. از میان
همه تخمین‌های Ks و S که از کل آزمایشات بیرکن به‌دست آمده،
نتایجی که مقدار $Er < 5.5\%$ باشد به‌عنوان نتایج منتخب در الگوریتم
BESTslope ارائه می‌شود.

الگوریتم BESTintercept

براساس نظر ایلماز و همکاران در الگوریتم اصلی مقدار Ks (به
خصوص در شرایطی که $i_s^{exp} \approx A.S^2$) ممکن است با خطا محاسبه
شود، بنابراین آن‌ها با معرفی الگوریتم BESTintercept مقدار Ks را بر
حسب مقدار عرض از مبدا خط برازش داده شده در فاز پایدار
(b_s^{exp}) تعریف کردند (15a). با جایگذاری معادله 15a در معادله 6a
معادله 15b به‌دست می‌آید (Yilmaz et al., 2010).

$$I_{est}(t) = (A.S^2 + K_s).t + C \frac{S^2}{K_s} \quad (6b)$$

$$i(t) = \frac{S}{\sqrt{t}} + (A.S^2 + B.K_s) \quad (6c)$$

$$i_s = (A.S^2 + K_s) \quad (6d)$$

$$i_s \approx i_s^{exp} \text{ slope } \left[\frac{I(t)}{t} \right]_{i=(N_{tot}-N_{end}) \rightarrow N_{tot}} \quad (6e)$$

در این روابط t مدت زمان سپری شده از آزمایش نفوذ (S, T).
توانایی جذب خاک $(L.T^{0.5})$ N_{tot} تعداد کل نقاط آزمایش نفوذ می-
باشند. N_{end} تعداد نقاط انتهایی در فاز پایدار است که برای برازش
خطی انتخاب می‌شود. پارامترهای ثابت B ، A و C به‌صورت روابط
7a-7c تعریف می‌شوند (Lassabatero et al., 2006):

$$A = \frac{\gamma}{\frac{\gamma(\beta_s - \beta_0)}{2} + \frac{K_0}{K_s}} \quad (7a)$$

$$B = \frac{2-\beta}{2} \left(1 - \frac{K_0}{K_s} \right) + \frac{K_0}{K_s} \quad (7b)$$

$$C = \frac{1}{2(1-\beta)(1-\frac{K_0}{K_s})} \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (7c)$$

در این روابط r شعاع حلقه (L) و K_0 هدایت هیدرولیکی در
رطوبت اولیه خاک است. در صورتی که خاک در شروع آزمایش به‌طور
نسبی خشک باشد، از نسبت $\frac{K_0}{K_s}$ نیز در معادلات فوق صرف‌نظر می-
شود. بنابراین روابط تقریبی 8a و 8b برای استخراج پارامترهای B و
 C به‌دست می‌آید (Di Prima et al., 2016):

$$B \approx \frac{1-\beta}{2} \quad (8a)$$

$$C \approx \frac{\ln\left(\frac{1}{\beta}\right)}{2(1-\beta)} \quad (8b)$$

با فرض اینکه برای کلیه آزمایشات نفوذ بیرکن مقدار رطوبت
نسبی اولیه کم‌تر از $0/25$ باشد ($S_e = \theta_0 / \theta_s \leq 0/25$) پارامترهای
 $\beta = 0/60$ و $\gamma = 0/75$ در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین بر اساس
معادلات 8a و 8b مقدار پارامترهای B و C به‌ترتیب برابر با $0/467$ و
 $0/639$ می‌باشند (Di Prima et al., 2016).

الگوریتم BESTslope

BESTslope به‌عنوان الگوریتم اصلی در آزمایش بیرکن شناخته
شده است (Bagarello et al., 2014b). در این الگوریتم با تلفیق
معادلات 6a و 9a شکل دیگری از معادله نفوذ تجمعی (9b) در فاز
گذرا ارائه شد:

$$K_s = A.S^2 - i_s^{exp} \quad (9a)$$

$$I(t) = S\sqrt{t} + [A.(1-B)S^2 + B.i_s^{exp}]t \quad (9b)$$

معادله 9a شکل دیگری از معادله 6d می‌باشد. برای برازش
معادله 9b داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن (t_i, I_i) و محاسبه S از روش
حداقل کردن تابع هدف کلاسیک استفاده می‌شود که در آن
 $k = 5, \dots, N_{tot}$ می‌باشد:

$$f(S, k) = \min \sum_{i=1}^k [I_i^{exp} - I_{est}(t_i)]^2 \quad (10)$$

$I_{est}(t_i)$ نفوذ تجمعی تخمین زده شده در t_i است. i_s^{exp} شیب خط
برازش شده بر نقاط انتهایی (N_{end}) در فاز پایدار است. k تعداد داده‌ها

سطح خاک قبل از انجام آزمایش از بقایای ریشه و برگ گیاهان پاک گردید. 150 میلی‌لیتر آب به آرامی و به‌گونه‌ای روی سطح خاک درون حلقه ریخته شد که ساختمان سطح خاک درون حلقه به‌هم نخورد و سپس مدت زمان نفوذ کامل آب اندازه‌گیری شد. پس از نفوذ کامل آب مجدداً 150 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 گردد ادامه یافت. قبل از شروع آزمایش، دو نمونه دست‌نخورده برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه و وزن مخصوص ظاهری خاک و یک نمونه برای تعیین بافت خاک از هر نقطه مشخص تهیه شد. در این پژوهش رطوبت اشباع خاک برابر با تخلخل خاک در نظر گرفته شد (Mubarak et al., 2009; Xu et al., 2010). وزن مخصوص حقیقی خاک برای کلیه آزمایشات برابر با 2/65 گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد (Bagarello et al., 2014a, 2014b; Di Prima et al., 2016). مقدار θ_r در این تحقیق برابر با صفر در نظر گرفته شده است. رطوبت اولیه خاک با روش وزنی، بافت خاک با روش آزمایش الک و هیدرومتری (تهیه منحنی دانه‌بندی) و وزن مخصوص ظاهری خاک با روش سیلندر اندازه‌گیری شد (Gee and Or., 2002). نتایج نشان داد بافت غالب خاک مزرعه آزمایشی، لومی و لوم ماسه‌ای است. با تعیین بافت خاک بر اساس درصد ماسه، سیلت و رس، مقدار n توسط معادلات 5a تا 5e تعیین شد. پس از محاسبه n مقادیر m و η نیز به‌ترتیب با استفاده از معادلات 1b و 2a تعیین شدند (جدول 1). در جدول ارائه شده توسط مینانسی و مک براتنی مقدار متوسط n برای بافت‌های لومی و لوم ماسه‌ای برابر 2/235 می‌باشد که به مقدار متوسط n به‌دست آمده در این پژوهش (2/203) بسیار نزدیک است. همچنین مقدار متوسط η برای بافت‌های لومی و لوم ماسه‌ای 11/625 محاسبه شد که با مقدار متوسط η به‌دست آمده در این پژوهش (13/196) به‌نسبت نزدیک می‌باشد. محدوده تغییرات مقادیر وزن مخصوص ظاهری، رطوبت اولیه، تخلخل خاک و رطوبت نسبی اولیه در جدول شماره 2 ارائه شده است. مقادیر درصد ضریب تغییرات نیز برای همه پارامترها اندک می‌باشد که نشان دهنده محدوده کم تغییرات در این پارامترها است همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار رطوبت نسبی اولیه برای تمام آزمایشات کم‌تر از 0/25 می‌باشد، بنابراین شرایط رطوبتی مناسب برای انجام آزمایش بیرکن و اجرای محاسبات در سه الگوریتم BESTintercept ، BESTslope و BESTsteady برقرار است.

در این پژوهش فرآیندهای محاسباتی مورد نیاز مربوط به هر سه الگوریتم در محیط نرم افزاری PTC Mathcad Prime 3.1 (Mathsoft Engineering and Education., 2015) انجام شد و برای تحلیل نتایج و تهیه جداول و نمودارهای مورد نیاز از نرم افزار excel 2013 استفاده گردید.

$$K_s = C \frac{S^2}{i_s^{2 \cdot \exp}} \quad (15a)$$

$$I(t) = S\sqrt{t} + \left(AS^2 + BC \frac{S^2}{i_s^{2 \cdot \exp}} \right) t \quad (15b)$$

b_s^{\exp} عرض از مبدا شیب خط برازش شده بر کلیه نقاط فاز پایدار می‌باشد. فرآیند محاسبه مقدار S در این الگوریتم بر اساس معادله 15b انجام می‌شود. پس از محاسبه و انتخاب S قابل قبول، مقدار K_s از معادله 15a به‌دست می‌آید. سایر محاسبات مربوط به t_{max} و Er در این الگوریتم مانند الگوریتم BESTslope می‌باشد. در نهایت از میان همه نتایج به‌دست آمده از این الگوریتم، نتایجی که مقدار $Er < 5.5\%$ باشد، بعنوان نتایج منتخب و قابل قبول ارائه می‌گردد.

الگوریتم BESTsteady

الگوریتم BESTsteady که توسط باگار لو و همکاران ارائه شد در مقایسه با دو الگوریتم دیگر روش بسیار ساده‌تری برای محاسبه مقدار K_s و S است. دلیل سادگی این الگوریتم این است که برخلاف دو الگوریتم قبلی تنها از دو معادله و داده‌های نفوذ مربوط به فاز پایدار (i_s^{\exp}, b_s^{\exp}) برای محاسبه مستقیم K_s و S استفاده می‌نماید. با ترکیب معادلات 15a و 9a با یکدیگر معادله 16a و 16b به‌دست می‌آید. مقدار S به‌طور مستقیم از طریق معادله 16b و بدون نیاز به فرآیند وقت گیر حداقل کردن مربعات خطا و محاسبه t_{max} به‌دست می‌آید. مقدار K_s نیز از طریق معادله 15a یا 9a محاسبه می‌گردد.

$$i_s = A.S^2 + C \frac{S^2}{i_s^{2 \cdot \exp}} \quad (16a)$$

$$S = \sqrt{\frac{i_s^{\exp} - C}{A + \frac{C}{i_s^{2 \cdot \exp}}}} \quad (16b)$$

با توجه به مطالبی که عنوان شد، الگوریتم‌های متفاوتی برای تحلیل نتایج آزمایش نفوذ بیرکن وجود دارد. با توجه به سادگی انجام آزمایش بیرکن، انتخاب یک الگوریتم محاسباتی ساده که از عملکرد مناسبی در خاک مورد نظر برخوردار باشد، برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی خاک (S, K_s) ضروری می‌باشد. بنابراین در این پژوهش ضمن انجام آزمایش نفوذ بیرکن، عملکرد سه الگوریتم BESTslope، BESTsteady و BESTintercept در محاسبه پارامترهای هیدرولیکی و تخمین معادلات منحنی مشخصه و منحنی هدایت هیدرولیکی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

روش انجام آزمایش

پژوهش حاضر در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زابل به مساحت 25 هکتار در عرض جغرافیایی $30^{\circ}54'57''$ شمالی و طول جغرافیایی $61^{\circ}31'20''$ شرقی در 40 نقطه مشخص انجام شد. برای انجام آزمایش نفوذ بیرکن از یک حلقه فلزی به قطر 150 میلی‌متر که به اندازه یک سانتی‌متر درون زمین فرو برده شده بود استفاده شد.

جدول 1- آماره‌های توصیفی درصد رس، سیلت و ماسه و پارامترهای m و n و η

| η | m | N | درصد رس (Clay %) | درصد سیلت (Silt %) | درصد ماسه (Sand %) | آماره توصیفی | بافت خاک (USDA class) |
|--------|--------|-------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|
| 11/022 | 0/045 | 2/095 | 11/650 | 16/000 | 30/800 | حداقل | |
| 24/110 | 0/110 | 2/493 | 30/800 | 46/000 | 70/000 | حداکثر | لوم و |
| 13/196 | 0/092 | 2/203 | 18/421 | 31/769 | 49/810 | متوسط حسابی | لوم ماسه‌ای |
| 18/022 | 14/849 | 1/480 | 27/675 | 24/617 | 20/682 | درصد ضریب تغییرات | |

جدول 2- آماره‌های توصیفی وزن مخصوص ظاهری (ρ_b)، رطوبت اولیه (θ_0)، تخلخل (ϵ) و رطوبت نسبی اولیه (Se)

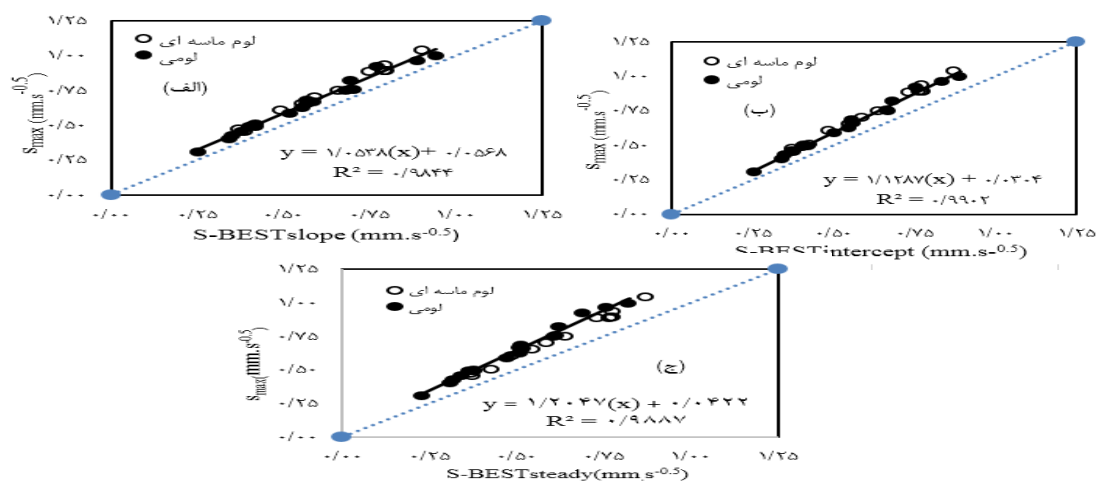
| آماره توصیفی | (ρ_b) (gr/cm ³) | (θ_0) (cm ³ /cm ³) | (ϵ) [*] (cm ³ /cm ³) | (Se) (cm ³ /cm ³) |
|-------------------|---------------------------------------|---|--|---|
| حداقل | 1/150 | 0/080 | 0/385 | 0/141 |
| حداکثر | 1/630 | 0/120 | 0/566 | 0/249 |
| متوسط | 1/383 | 0/102 | 0/478 | 0/215 |
| درصد ضریب تغییرات | 6/423 | 8/263 | 7/017 | 11/086 |

* در این تحقیق درصد رطوبت اشباع (θ_s) با تخلخل خاک (ϵ) مساوی فرض شده است.

نتایج و بحث

31 نقطه انتخابی 18 نقطه در بافت لومی و 13 نقطه در بافت لوم ماسه‌ای می‌باشد. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در نقاط انتخابی مثبت و خطای نسبی آن‌ها کم‌تر از 5/5 درصد می‌باشد. در بررسی اولیه ملاحظه گردید که نتایج به‌دست آمده در هر دو بافت بسیار به هم نزدیک است. در تمامی آزمایش‌های منتخب مقدار S_{max} از مقدار S محاسبه شده در سه الگوریتم بیش تر بود. ضرایب رابطه S_{max} بر حسب S در هر سه الگوریتم عبارتند از 1/054، 1/129 و 1/205 (شکل 1 الف، ب و ج).

در این پژوهش تعداد 40 آزمایش بیرکن (20 آزمایش در بافت لوم و 20 آزمایش در بافت لوم ماسه‌ای) انجام شد ($N_{All}=40$). در برخی از نقاط مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع محاسبه شده در الگوریتم BESTslope منفی و در برخی از نقاط هم مقدار خطای نسبی در BESTintercept و BESTslope بیش از 5/5 درصد به‌دست آمد ($Er > 5.5\%$) که از کل نتایج حذف شدند. در نهایت برای مقایسه سه الگوریتم تعداد 31 نقطه مشخص انتخاب شد ($N_{selected}=31$).



شکل 1- مقایسه مقادیر S با مقادیر S_{max} در الگوریتم‌های الف) BESTslope، ب) BESTintercept، ج) BESTsteady

یک به یک ($y = x$) می‌باشند. البته حداقل و حداکثر اختلاف بین الگوریتم‌ها در محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع به ترتیب 0/0008 و 0/0090 میلی‌متر بر ثانیه می‌باشند که در مجموع اختلاف قابل

مقایسه الگوریتم‌های BESTintercept و BESTslope همان‌طور که شکل 2 الف نشان می‌دهد مقدار K_s در BESTintercept بیش‌تر از BESTslope است و نقاط بالاتر از خط

توجهی نیست. همچنین جدول 3 نشان می‌دهد اختلاف مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط K_s تخمین زده شده در هر دو الگوریتم اندک می‌باشد. مطابق شکل 2 الف ضریب رابطه هدایت هیدرولیکی بین دو الگوریتم مذکور در این تحقیق $1/419$ می‌باشد که با ضریب $1/230$ در تحقیق باگارلو و همکاران به نسبت نزدیک می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً اشاره گردید برخی از مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع در الگوریتم اصلی (BESTslope) منفی به دست آمده است که از مجموع نتایج اولیه حذف گردید. لازم به ذکر است که تمام مقادیر K_s محاسبه شده در الگوریتم BESTintercept مثبت بدست آمده است. برخلاف مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع، مقدار S تخمین زده شده در BESTintercept کم‌تر از الگوریتم BESTslope می‌باشد. شکل 2 ب نشان می‌دهد که نقاط مربوط به مقدار S محاسبه شده در هر دو الگوریتم با ضریب $0/935$ به خط یک‌به‌یک ($y = x$) بسیار نزدیک است. مقدار این ضریب در تحقیق باگارلو و همکاران $0/97$ بدست آمده است. اختلاف اندک مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط S تخمین زده شده در الگوریتم‌ها به خوبی در جدول 3 نشان داده شده است. متوسط مقدار S در الگوریتم‌های مذکور به ترتیب $0/594$ و $0/598$ میلی‌متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. نزدیکی بسیار زیاد ضریب تغییرات (C.V.%) نیز نشان دهنده نزدیکی بسیار زیاد بازه تغییرات مقدار K_s و S در هر دو الگوریتم می‌باشد.

مقایسه الگوریتم‌های BESTintercept و BESTsteady

شکل 4 الف نشان می‌دهد که مقدار K_s در الگوریتم BESTsteady کم‌تر از الگوریتم BESTintercept است و نقاط پایین‌تر از خط یک‌به‌یک ($y = x$) می‌باشد. مطابق شکل 4 الف در این تحقیق ضریب رابطه هدایت هیدرولیکی بین این دو الگوریتم $0/863$ می‌باشد که با ضریب $0/906$ در تحقیق باگارلو و همکاران بسیار نزدیک می‌باشد. حداقل و حداکثر اختلاف بین الگوریتم‌ها به ترتیب $0/0005$ و $0/0033$ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد که در مجموع اختلافی ناچیز است. اختلاف اندک مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط K_s تخمین زده شده در هر دو الگوریتم به خوبی در جدول 3 نشان داده شده است. شکل 4 ب نشان می‌دهد که نقاط مربوط به مقدار S محاسبه شده در هر دو الگوریتم با ضریب $0/936$ به خط یک‌به‌یک نزدیک می‌باشند که این ضریب در تحقیق باگارلو و همکاران برابر با $0/956$ می‌باشد. متوسط مقدار S در الگوریتم‌های BESTintercept و BESTsteady به ترتیب $0/594$ و $0/578$ میلی‌متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. اختلاف اندک مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط S تخمین زده شده در هر دو الگوریتم به خوبی در جدول 3 نشان داده شده است. نزدیکی بسیار زیاد ضریب تغییرات (C.V.%) نیز نشان دهنده نزدیکی بسیار زیاد بازه تغییرات مقدار K_s و S در هر دو الگوریتم می‌باشد.

مقایسه منحنی مشخصه در سه الگوریتم BESTslope،

BESTintercept و BESTsteady

در این تحقیق برای مقایسه نتایج سه الگوریتم در محاسبه منحنی مشخصه از معادله 1b استفاده شده است. برای ترسیم هر یک از منحنی‌ها مقدار متوسط پارامترهای شکل n و m و η و متوسط پارامترهای مقیاس θ_s ، K_s و h_g برای هر یک از بافت‌های لوم و لوم ماسه‌ای به دست آمده است، (جدول 4).

شکل 3 الف نشان می‌دهد اختلاف مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط K_s تخمین زده شده در هر دو الگوریتم اندک می‌باشد. مطابق شکل 2 الف ضریب رابطه هدایت هیدرولیکی بین دو الگوریتم مذکور در این تحقیق $1/419$ می‌باشد که با ضریب $1/230$ در تحقیق باگارلو و همکاران به نسبت نزدیک می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً اشاره گردید برخی از مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع در الگوریتم اصلی (BESTslope) منفی به دست آمده است که از مجموع نتایج اولیه حذف گردید. لازم به ذکر است که تمام مقادیر K_s محاسبه شده در الگوریتم BESTintercept مثبت بدست آمده است. برخلاف مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع، مقدار S تخمین زده شده در BESTintercept کم‌تر از الگوریتم BESTslope می‌باشد. شکل 2 ب نشان می‌دهد که نقاط مربوط به مقدار S محاسبه شده در هر دو الگوریتم با ضریب $0/935$ به خط یک‌به‌یک ($y = x$) بسیار نزدیک است. مقدار این ضریب در تحقیق باگارلو و همکاران $0/97$ بدست آمده است. اختلاف اندک مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط S تخمین زده شده در الگوریتم‌ها به خوبی در جدول 3 نشان داده شده است. متوسط مقدار S در الگوریتم‌های مذکور به ترتیب $0/594$ و $0/598$ میلی‌متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. نزدیکی بسیار زیاد ضریب تغییرات (C.V.%) نشان دهنده نزدیکی بسیار زیاد بازه تغییرات مقدار K_s و S در هر دو الگوریتم می‌باشد. متوسط خطای نسبی برآزش نیز در الگوریتم اصلی کم‌تر می‌باشد لیکن این اختلاف اندک و قابل صرف نظر کردن است.

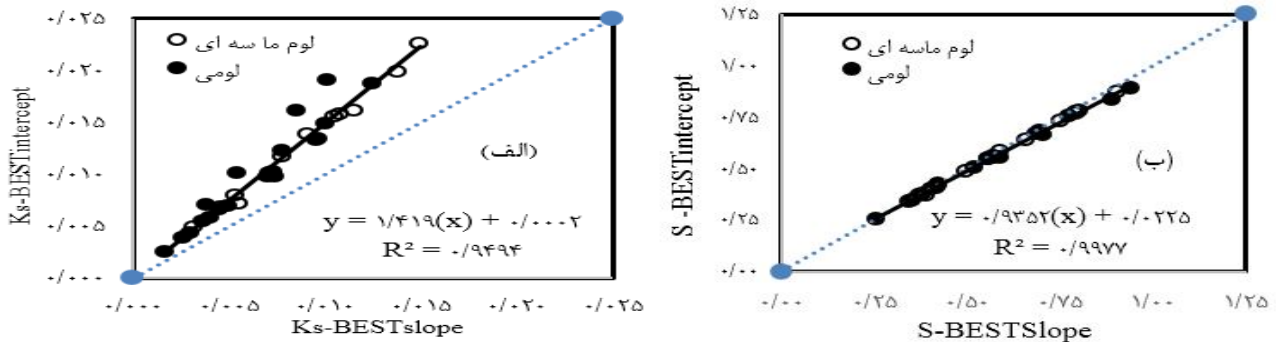
مقایسه الگوریتم‌های BESTslope و BESTsteady

شکل 3 الف نشان می‌دهد که مقدار K_s در الگوریتم BESTsteady نیز بیش‌تر از BESTslope است و نقاط بالاتر از خط یک‌به‌یک ($y = x$) می‌باشد، لیکن این اختلاف در حدود 20 درصد کم‌تر از اختلاف الگوریتم اصلی با BESTintercept می‌باشد و نقاط به خط یک‌به‌یک نزدیک‌ترند و در واقع نتایج به الگوریتم اصلی نزدیک‌تر هستند. مطابق شکل 3 الف ضریب رابطه هدایت هیدرولیکی بین این دو الگوریتم در این تحقیق $1/286$ می‌باشد که با ضریب $1/128$ در تحقیق باگارلو و همکاران نزدیک می‌باشد. حداقل و حداکثر اختلاف در تخمین پارامتر K_s به ترتیب $0/0003$ و $0/0062$ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد که در مجموع اختلاف بسیار اندکی است. اختلاف اندک مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط K_s تخمین زده شده در هر دو الگوریتم به خوبی در جدول 3 نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تمام مقادیر K_s محاسبه شده در الگوریتم BESTsteady مثبت بدست آمده است. برخلاف هدایت هیدرولیکی اشباع، مقدار S در الگوریتم BESTsteady کم‌تر از الگوریتم

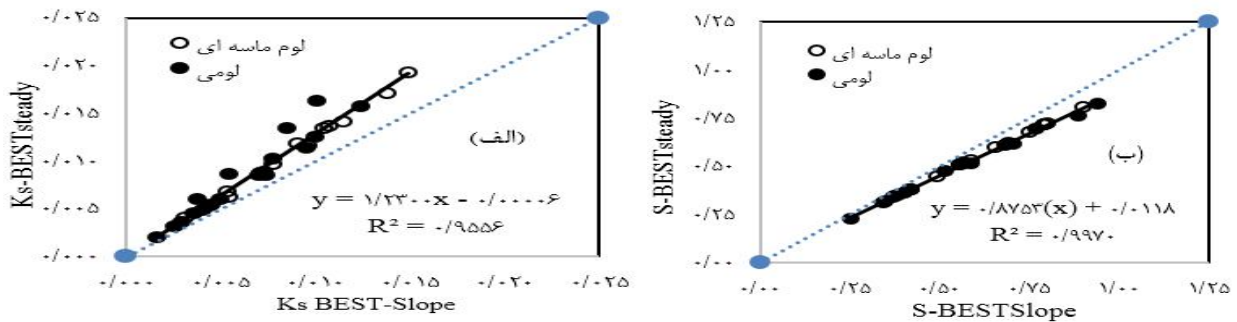
جدول 3- آماره‌های توصیفی مقادیر E_r و S در سه الگوریتم آزمایش بیرکن

| E_r | | S ($\text{mms}^{0.5}$) | | | K_s (mms^{-1}) | | | آماره توصیفی |
|--------|--------|----------------------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|-------------------|
| 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | |
| 0/793 | 1/117 | 0/254 | 0/256 | 0/229 | 0/0017 | 0/0025 | 0/0020 | حداقل |
| 5/492 | 5/495 | 0/943 | 0/890 | 0/823 | 0/0150 | 0/0225 | 0/0192 | حداکثر |
| 3/846 | 4/549 | 0/594 | 0/578 | 0/531 | 0/0073 | 0/0111 | 0/0094 | متوسط |
| 30/879 | 25/763 | 32/006 | 30/795 | 31/341 | 46/942 | 47/459 | 48/314 | درصد ضریب تغییرات |

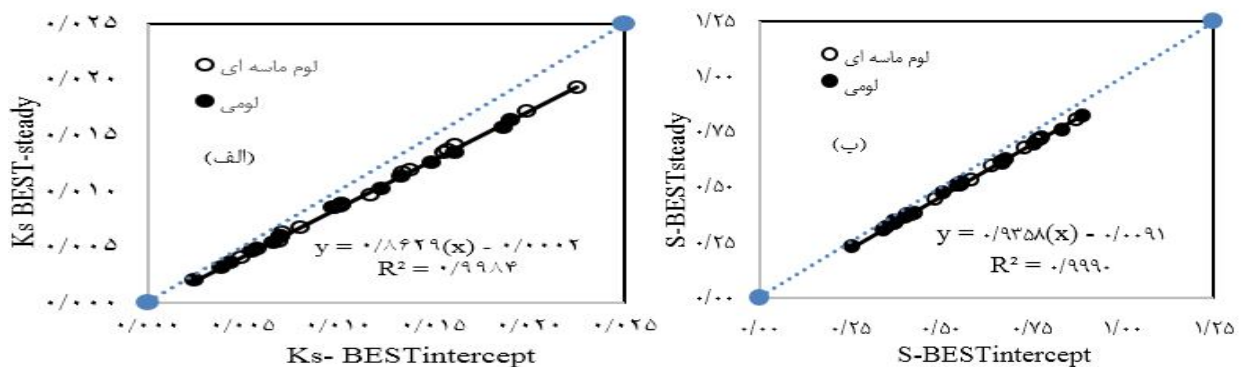
1:BESTslope 2:BESTintercept 3:BESTsteady



شکل 2- مقایسه دو الگوریتم BESTslope و BESTintercept در تخمین الف) K_s (mms^{-1}) و ب) S ($\text{mms}^{0.5}$)



شکل 3- مقایسه نتایج بین دو الگوریتم BESTslope و BESTsteady در تخمین الف) K_s (mms^{-1}) و ب) S ($\text{mms}^{0.5}$)



شکل 4- مقایسه نتایج بین دو الگوریتم BESTintercept و BESTsteady در تخمین الف) K_s (mms^{-1}) و ب) S ($\text{mms}^{0.5}$)

استفاده شده است. منحنی‌های هدایت هیدرولیکی خاک تخمین زده شده در الگوریتم اصلی کم‌تر از دو الگوریتم دیگر می‌باشد. منحنی هدایت هیدرولیکی BESTintercept و BESTsteady نیز تقریباً بر هم منطبق می‌باشد. اختلاف هدایت هیدرولیکی بین BESTslope با دو الگوریتم دیگر در بافت لومی در حدود 36 درصد می‌باشد. این مقدار درصد اختلاف در رطوبت اشباع خاک 0/0035 میلی‌متر بر ثانیه است و با کاهش رطوبت در نزدیکی به رطوبت باقیمانده به صفر می‌رسد. در بافت لوم ما سه‌ای نیز این اختلاف در حدود 31 درصد است که در رطوبت اشباع خاک 0/0037 میلی‌متر بر ثانیه و در رطوبت نزدیک به رطوبت باقیمانده به صفر می‌رسد. همان‌گونه که مقایسه نتایج آزمایشات بیرکن نیز نشان دادند در مجموع اختلاف هدایت هیدرولیکی اشباع در سه الگوریتم بسیار ناچیز می‌باشد (شکل 6 الف و ب).

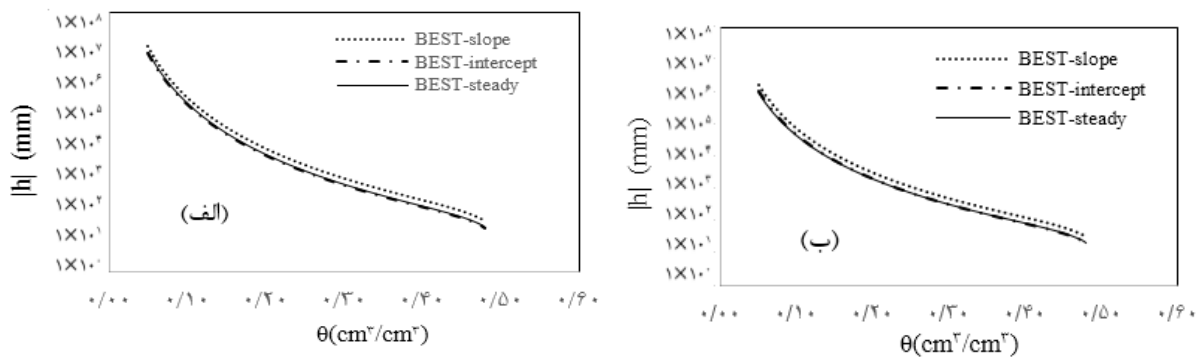
شکل 5 (الف و ب) نشان می‌دهد که در هر دو بافت خاک مقدار پتانسیل ماتریک h محاسبه شده در الگوریتم BESTslope بیش‌تر از دو الگوریتم دیگر است. منحنی مشخصه BESTintercept و BESTsteady تقریباً بر هم منطبق می‌باشد. اختلاف منحنی مشخصه (پتانسیل ماتریک) بین BESTslope با دو الگوریتم دیگر در بافت لومی در حدود 68 درصد می‌باشد. لازم به ذکر است اختلاف پتانسیل ماتریک محاسباتی در رطوبت اشباع خاک در حدود 8 میلی‌متر است و در رطوبت 0/25 به 0/8 متر می‌رسد. با کاهش رطوبت نیز این اختلاف افزایش می‌یابد. در بافت لوم ما سه‌ای نیز این اختلاف پتانسیل ماتریک محاسباتی در حدود 53 درصد است که در رطوبت اشباع خاک در حدود 6 میلی‌متر و در رطوبت 0/25 به 0/4 متر می‌رسد. با کاهش رطوبت نیز این اختلاف افزایش می‌یابد.

مقایسه منحنی هدایت هیدرولیکی در سه الگوریتم BESTslope، BESTintercept و BESTsteady در این تحقیق در محاسبه منحنی هدایت هیدرولیکی از معادله 2a

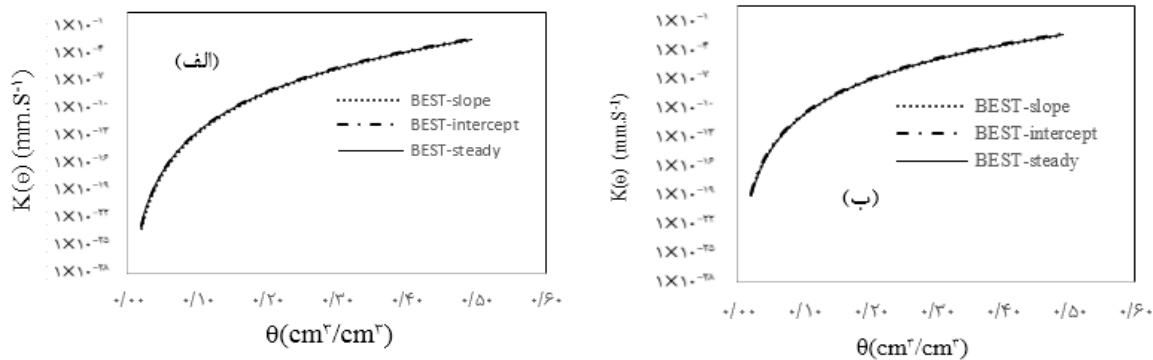
جدول 4- متوسط پارامترهای مورد نیاز برای ترسیم منحنی مشخصه ونگوختن در بافت‌های لوم و لوم ماسه‌ای

| بافت خاک | θ_s | n | m | η | K_s (mm.s ⁻¹) | | | h_e (mm) | | |
|-------------|------------|-------|-------|--------|-----------------------------|--------|--------|------------|---------|---------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| لوم | 0/478 | 2/180 | 0/082 | 14/051 | 0/0063 | 0/0098 | 0/0080 | -60/086 | -35/742 | -35/768 |
| لوم ماسه‌ای | 0/477 | 2/227 | 0/102 | 12/012 | 0/0088 | 0/0128 | 0/0109 | -56/457 | -36/795 | -37/117 |

1: BESTslope 2: BESTintercept 2: BESTsteady



شکل 5- مقایسه منحنی مشخصه خاک به‌دست آمده توسط سه الگوریتم BESTslope، BESTintercept و BESTsteady در بافت (الف) لومی و (ب) لوم ماسه‌ای



شکل 6- مقایسه منحنی هدایت هیدرولیکی خاک به دست آمده توسط سه الگوریتم BESTslope، BESTintercept و BESTsteady در بافت (الف) لومی و (ب) لوم ماسه‌ای

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف مقایسه الگوریتم‌های BESTslope، BESTintercept و BESTsteady در آزمایش نفوذ بیرکن برای برآورد مشخصات هیدرولیکی خاک و تخمین منحنی‌های مشخصه خاک و هدایت هیدرولیکی انجام شد. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در الگوریتم BESTslope کمتر از دو الگوریتم دیگر تخمین زده شد در حالی که مقدار K_s در الگوریتم BESTsteady به الگوریتم اصلی نزدیک‌تر بود. در مجموع با توجه به بافت خاک مورد مطالعه در این پژوهش اختلاف هدایت هیدرولیکی در هر سه الگوریتم چندان قابل توجه نمی‌باشد. متوسط خطای نسبی برآزش Er در الگوریتم BESTslope کمتر از الگوریتم BESTintercept بود که البته این اختلاف نیز قابل توجه نمی‌باشد. در تمام آزمایشات منتخب مقدار S_{max} بیش‌تر از مقدار S محاسبه شده در هر سه الگوریتم بود، بنابراین مقدار S به‌عنوان مقدار قابل قبول در نظر گرفته شد. مقدار S برآورد شده در هر سه الگوریتم به یکدیگر بسیار نزدیک بود هر چند مقدار برآورد شده در الگوریتم اصلی به مقدار ناچیزی بیش‌تر از دو الگوریتم دیگر بود. پتانسیل ماتریک h در الگوریتم اصلی بیش‌تر از دو الگوریتم دیگر تخمین زده شد که این اختلاف محاسباتی در رطوبت اشباع بسیار اندک و با کاهش رطوبت افزایش می‌یابد. منحنی مشخصه در دو الگوریتم BESTintercept و BESTsteady بر هم منطبق می‌باشد. منحنی‌های هدایت هیدرولیکی خاک تخمین زده شده در الگوریتم اصلی کمتر از دو الگوریتم دیگر می‌باشد اما در مجموع هر سه منحنی تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. در مجموع با توجه به اینکه فرآیند محاسباتی الگوریتم BESTsteady در تخمین پارامترهای K_s و S بسیار ساده‌تر از دو الگوریتم دیگر است و کلیه نتایج به دست آمده نیز به دو الگوریتم دیگر بسیار نزدیک است، در خاک‌های لومی و لوم ماسه‌ای الگوریتم BESTsteady می‌تواند به‌عنوان یک الگوریتم کاربردی و مناسب در آزمایش نفوذ بیرکن به کار رود.

منابع

- Bagarello, V., Di Prima, S., Iovino, M., Provenzano, G., Sgroi, A. 2011. Testing different approaches to characterize Burundian soils by the BEST procedure. *Geoderma*. 162: 141–150.
- Bagarello, V., Di Prima, S., Iovino, M. and Provenzano, G. 2014a. Estimating field-saturated soil hydraulic conductivity by a simplified Beerkan infiltration experiment. *Hydrology Process*. 28: 1095–1103
- Bagarello, V., Di Prima, S. and Iovino, M. 2014b. Comparing alternative algorithms to analyze the Beerkan infiltration experiment. *Soil Science Society of America*. 78: 724–736.
- Brooks, R.H. and Corey, C.T. 1964. *Hydraulics properties of porous media*. Hydrol. Paper 3. Colorado State University, Fort Collins.
- Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculation from pore size distribution data. *Petroleum Transactions, American Institute of Mining Engineers*. 198: 71–77.
- Di Prima, S. 2013. Automatic analysis of multiple Beerkan infiltration experiments for soil hydraulic characterization. *CIGR Inter-regional Conference on Land and Water Challenges — Bari (Italy)*. 10–14.
- Di Prima, S. 2015. Automated single ring infiltrometer with a low-cost microcontroller circuit. *Computers and Electronics in Agriculture*. 118: 390–395
- Di Prima, S., Lassabatere, L., Bagarello, V., Iovino, M., Angulo-Jaramillo, R. 2016. testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. *Geoderma*. 262: 20–34.
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2nd edition ASA and SSSA, Madison. 383–411.
- Haverkamp, R., Parlange, J.Y., Starr, J.L., Schmitz, G., Fuentes, C. 1990. Infiltration under ponded

- Part 4, Physical Methods, Dane JH, Topp GC (eds). SSSA Book Series, No. 5. Soil Science Society of America: Madison, Wisconsin, USA. 797–801.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. 2002b. Constant head well permeameter (vadose zone). In *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Dane JH, Topp GC (eds). SSSA Book Series, No. 5. Soil Science Society of America. 844–858.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Youngs, E.G. 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). In *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Dane JH, Topp GC (eds). SSSA Book Series. 5. Soil Science Society of America: 818–820.
- 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
- Wu, L., Pan, L., Mitchell, J and Sanden, B. 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. *Soil Science Society of America*. 63: 788–792.
- Xu, X., Kiely, G., Lewis, G. 2009. Estimation and analysis of soil hydraulic properties through infiltration experiments: comparison of BEST and DL fitting methods. *Soil Use Management*. 25: 354–361.
- Yilmaz, D., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Deneele, D., Legret, M. 2010. Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. *Vadose Zone Journal*. 9: 107–116.
- conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters. *Soil Science*. 149: 292–300.
- Haverkamp, R., Ross, P.J., Smetten, K.R.J., Parlange, J.Y. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research* 30: 2931–2935.
- Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments — BEST. *Soil Science Society of America*. 70: 521–532.
- Minansy, B., McBratney, A.B. 2007. Estimating the water retention shape parameter from sand and clay content. *Soil Science Society of America*. 71: 1105–1110.
- Mubarak, I., Mailhol, J.C., Angulo-Jaramillo, R., Ruelle, P., Boivin, P., Khaledian, M. 2009. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. *Geoderma*. 150: 158–165.
- Mubarak, I., Angulo-Jaramillo, R., Mailhol, J.C., Ruelle, P., Khaledian, M., Vauclin, M. 2010. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: is infiltration method dependent? *Agricultural Water Management*. 97: 1517–1526.
- Parlange, J.Y. 1975. On solving the flow equation in unsaturated soil by optimization: horizontal infiltration. *Soil Science Society of America*. 39: 415–418.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. 2002a. Principles and parameter definitions. In *Methods of Soil Analysis*,

Comparison of Different Algorithms for Analyzing the Beerkan Infiltration Experiment in Sistan Region

T. Ahmady¹, P. Afrasiab^{2*}, M. Delbari²

Received: Feb.10, 2016

Accepted: Feb.13, 2017

Abstract

In recent years, the single ring Beerkan infiltration experiment has gained increasing attention as it is cheap and simple to implement. The BEST_{slope}, BEST_{intercept} and BEST_{steady} algorithms were developed to estimate the soil hydraulic properties (e.g. saturated hydraulic conductivity (K_s) and sorptivity (S)) through the Beerkan infiltration experiment. The purpose of this study is to compare these algorithms for estimating hydraulic properties, retention curve and hydraulic conductivity curve. For this purpose, 40 Beerkan infiltration tests were carried out in an experiment field in Sistan dam region. The negative and positive values with a relative error (E_r) of more than 5.5% were eliminated and a set of 31 experiments in soils with loam and sandy loam textural classes was selected for the rest of analysis. The results showed that the BEST_{steady} algorithm has the simplest calculating process and the K_s and S values as well as water retention and hydraulic conductivity curves estimated by this algorithm were similar to those obtained by the original algorithm with an acceptable accuracy. Therefore, it could be concluded that in soils with loam and sandy loam textures, the BEST_{steady} algorithm is an appropriate alternative, which could be applied instead of two other algorithms.

Keywords: Relative error, Retention curve, Saturated hydraulic conductivity, Sorptivity

1 - ph.D Student in Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Soil, University of Zabol

2 - Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol

(*Corresponding Author Email: peyman.afraziab@uoz.ac.ir)