مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

صفحه‌های ۱۴۷-۱۳۳

معرفی یک روش ساده در محاسبه پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از آزمایش نفوذ بیرکن

تارخ احمدی[۱]، پیمان افراسیاب[۲]* ، معصومه دلبری[۲]

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکدهٔ آب و خاک، دانشگاه زابل

۲. دانشیار گروه آب، دانشکدهٔ آب و خاک، دانشگاه زابل

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۰۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۴

چکیده

روش آزمایش نفوذ تک‌استوانه‌ای بیرکن در سال‌های اخیر به‌دلیل کم‌هزینه بودن و سادگی در اجرا بسیار مورد توجه قرارگرفته است. الگوریتم محاسباتی BESTslope الگوریتم اصلی در آزمایش بیرکن است و خصوصیات هیدرولیکی خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و ضریب جذب خاک (S) را تخمین می‌زند. هدف از پژوهش حاضر مقایسهٔ عملکرد الگوریتم BESTslope با روش پیشنهادی ساده و تعیین مقدار پارامتر ثابت α به‌عنوان نسبت نیروی ثقل به نیروی کاپیلاری در بافت‌های لوم و لوم ماسه‌ای است. برای این منظور تعداد ۱۱۳ آزمایش نفوذ بیرکن در مزرعهٔ تحقیقاتی سد سیستان با بافت غالب لومی و لوم ماسه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد مقدار K_s تخمین‌زده شده برای ۳۱ آزمایش با خطای نسبی برازش (Er) در هر یک کمتر از ۵/۵ درصد، با نتایج ۵۹ آزمایش با متوسط Er کمتر از ۵/۵ درصد بسیار نزدیک است، البته با نتایج ۱۰۱ آزمایش با متوسط Er کمتر از ۱۰ درصد اختلاف به‌نسبت زیادی دارد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقدار α در خاک‌های لومی و لوم ماسه‌ای منطقهٔ مورد مطالعه برابر با متوسط مقدار به‌دست آمده در حالات ۳۱ و ۵۹ آزمایش منتخب و برابر با ۰/۰۱۳ تعیین شد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم BESTslope، بیرکن، پارامتر α، توانایی جذب خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع.

* نویسنده مسئول

Email: P_afrasiab@yahoo.com

www.SID.ir

مقدمه

امروزه، روش آزمایش نفوذ بیرکن[1] به‌دلیل سادگی در اجرا و هزینهٔ کمتر مورد توجه قرارگرفته است. سادگی این روش به‌دلیل استفاده از حلقه‌ای است که در حدود ۱ سانتی‌متر در زمین فرومی‌رود و حجم کم و ثابت آبی که به‌طور تکراری بر سطح خاک درون حلقه ریخته می‌شود. توجه به اینکه فرایند نفوذ آب در خاک ابتدا در مرحلهٔ گذرا [2]، سپس در مرحلهٔ پایدار[3] است، در آزمایش نفوذ داده‌های جمع‌آوری شده از چند دقیقهٔ اول آزمایش اطمینان کمتری در مقایسه با داده‌هایی بعد قرائت‌شده وجود دارد (۱۵). تعیین مرحلهٔ پایدار در فرایند نفوذ آب در خاک راحت‌تر از تعیین مرحلهٔ گذراست، لذا روش‌های محاسباتی مبتنی بر داده‌های نفوذ در مرحلهٔ پایدار ساده‌تر از روش‌های محاسباتی مبتنی بر محاسبهٔ پارامترهای هیدرولیکی بر اساس داده‌های نفوذ در مرحلهٔ گذرا یا روش‌های مبتنی بر تلفیق مراحل گذرا و پایدار است.

روش اصلی در محاسبهٔ هدایت هیدورلیکی اشباع (Ks) و توانایی جذب خاک (S)، الگوریتم BESTslope[4] است (۲). این الگوریتم پارامترهای هیدرولیکی را بر اساس تلفیق معادلات نفوذ در مراحل گذرا و پایدار محاسبه می‌کند. با توجه به اینکه فرایند محاسباتی این الگوریتم وقت‌گیر است، ضرورت برنامه‌نویسی برای حل این فرایند اجتناب‌ناپذیر است. در صورتی که در کنار آزمایش سادهٔ نفوذ بیرکن روش محاسباتی ساده‌ای نیز برای محاسبهٔ پارامترهای هیدرولیکی باشد که نیازی به نوشتن برنامه برای محاسبهٔ پارامترهای هیدرولیکی نداشته باشد و نتایج آن نیز در مقایسه با الگوریتم BESTslope قابل قبول باشد، استفاده از این آزمایش نفوذ در مجموع آسان‌تر می‌شود.

روش ساده‌ای که در این تحقیق با علامت اختصاری BSm معرفی شده است، مقدار Ks را با توجه به مقدار شیب معادلهٔ خطی نفوذ در مرحلهٔ پایدار نفوذ (i_s^{exp}) و پارامتر ثابت α محاسبه می‌کند (۱۴). پارامتر α برابر نسبت نیروی ثقل یا همان هدایت هیدرولیکی اشباع(Ks) به نیروی کاپیلاری یا نیروی ماتریک (ϕ_m) خاک است که در بافت‌های مختلف خاک ممکن است متفاوت باشد. مقدار S نیز از طریق مقدار Ks تخمین‌زده شده به‌دست می‌آید و در عمل نیازی به نوشتن برنامه برای فرایند محاسباتی نیست. در این تحقیق، ضمن مقایسهٔ نتایج الگوریتم BESTslope و روش BSm در محاسبهٔ پارامترهای هیدررولیکی خاک، مقدار α نیز در بافت‌های لومی و لوم ماسه‌ای محاسبه شده است.

مواد و روش‌ها

نظریه

به‌طور کلی، نفوذ آب در خاک را می‌توان شامل دو مرحلهٔ گذرا و پایدار در نظر گرفت که برای هر یک از آن‌ها معادله‌ای ارائه شده است. معمولاً تشخیص مدت زمان فاز گذرا در کل مدت زمان نفوذ به‌راحتی میسر نیست. معادلات نفوذ تجمعی در مرحلهٔ گذرا (I(t)) و پایدار (I_∞ (t)) به‌ترتیب در روابط (۱a) و (۱b) ارائه شده است. با مشتق‌گیری از این معادلات سرعت نفوذ در مرحلهٔ گذرا (i(t)) و پایدار (i_s) به‌دست می‌آید (۷).

$$I(t) = S\sqrt{t} + (A.S^2 + B.K_s)t \qquad (1a)$$

$$I_\infty(t) = (A.S^2 + K_s)t + C\frac{S^2}{K_s} \qquad (1b)$$

$$i(t) = \frac{S}{\sqrt{t}} + (A.S^2 + B.K_s) \qquad (1c)$$

$$i_s = (A.S^2 + K_s) \qquad (1d)$$

1. Beerkan infiltration experiment
2. transient phase
3. steady state phase
4. BEST: Beerkan estimation of soil transfer parameters

Archive of SID
www.SID.ir

$$i_s \approx i_s^{exp} = slope \begin{matrix}(t_i, I_i) \\ i=(N_{tot}-N_{end})\rightarrow N_{tot}\end{matrix} \quad (1e)$$

در این روابط، t مدت زمان سپری‌شده از آزمایش نفوذ (T)، S توانایی جذب خاک ($L.T^{-0.5}$)، N_{tot} تعداد کل نقاط آزمایش نفوذ، و N_{end} تعداد نقاط انتهایی خطی در مرحلهٔ پایدار است که برای رگرسیون خطی انتخاب می‌شود. در این تحقیق مقدار N_{end} برابر با ۳ است.

پارامترهای ثابت B، A و C به‌صورت معادلات ۲a تا ۲c تعریف می‌شود (۹).

$$A = \frac{\gamma}{r.(\theta_s - \theta_.)} \quad (2a)$$

$$B = \frac{2-\beta}{3}\left(1-\frac{K_.}{K_s}\right)+\frac{K_.}{K_s} \quad (2b)$$

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

در این روابط، r شعاع حلقه (L) و K_0 هدایت هیدورلیکی در رطوبت اولیهٔ خاک است. با فرض اینکه در تمامی آزمایش‌های نفوذ بیرکن مقدار رطوبت نسبی اولیه کمتر از ۰/۲۵ است ($S_e=\theta_0/\theta_s \leq 0/25$)، پارامترهای γ ۰/۷۵ = و β =۰/۶۰ (۹). البته، شرایط مرطوب‌تر خاک نیز در عمل اتفاق می‌افتد (۱۷). در صورتی که خاک در شروع آزمایش به‌طور نسبی خشک باشد، از نسبت $\frac{K_0}{K_S}$ نیز در معادلات فوق صرف‌نظر می‌شود. بنابراین، روابط تقریبی (۳a) و (۳b) برای استخراج پارامترهای B و C به‌دست می‌آید (۳).

$$B \approx \frac{2-\beta}{3} \quad (3a)$$

$$C \approx \frac{\ln\left(\frac{1}{\beta}\right)}{2(1-\beta)} \quad (3b)$$

در این روابط، مقدار پارامترهای B وC به‌ترتیب برابر با ۰/۴۶۷ و ۰/۶۳۹ است (۳).

الگوریتم BESTslope

نام این الگوریتم برای اولین بار BEST معرفی شد که در تحقیقات بعدی BESTslope نام‌گذاری شد (۱۸). BESTslope الگوریتم اصلی در آزمایش بیرکن است (۲). در این الگوریتم با تلفیق روابط (۱a) تا (۱e) شکل دیگری از معادلهٔ نفوذ تجمعی در مرحلهٔ گذرا در قالب معادلهٔ (۴b) ارائه شد.

$$Ks = A.S^2 - i_s^{exp} \quad (4a)$$

$$I(t) = S\sqrt{t} + \left[A.(1-B)S^2 + B.i_s^{exp}\right]t \quad (4b)$$

رابطهٔ (۴a) شکل دیگری از رابطهٔ (۱d) است. برای برازش رابطهٔ (۴b) بر داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن (t_i, I_i^{exp}) و محاسبهٔ S از روش حداقل کردن تابع هدف کلاسیک استفاده می‌شود.

$$f(S,k) = min\sum_{i=1}^{k}\left[I_i^{exp} - I_{est}(t_i)\right]^2 \quad (5)$$

در این رابطه، تغییرات مقدار k از ۵ تا N_{tot} است (۹). $I_{est}(t_i)$ نفوذ تجمعی تخمین‌زده شده در t_i، i_s^{exp} شیب خط برازش‌شده بر نقاط انتهایی در مرحلهٔ پایدار مطابق رابطهٔ (۱e) و k تعداد داده‌ها از مجموع کل داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن در هر اجراست؛ برای مثال، وقتی k=۷، یعنی هفت دادهٔ اول آزمایش نفوذ بیرکن برای برازش بر رابطهٔ (۴b) انتخاب شده است. مقدار خطای نسبی برازش (Er) نیز مطابق رابطهٔ (۶) در هر مقدار k محاسبه می‌شود (۹).

$$E_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}\left[I_i^{exp} - I_{est}(t_i)\right]^2}{\sum_{i=1}^{k}\left[I_i^{exp}\right]^2}} \quad (6)$$

در این رابطه، مقدار خطای نسبی برازش قابل قبول، Er کمتر از ۵/۵ درصد است (۹). برای انتخاب آزمایش‌ها در BESTslope مقدار متوسط مقدار خطای نسبی $(\overline{Er})$ نیز مورد قبول است (۲). در صورتی که خطای نسبی از ۱۰ درصد بیشتر نباشد، تخمین دقیق و اگر خطا از ۵ درصد

Archive of SID
www.SID.ir

بیشتر نباشد، تخمین خیلی دقیق در نظر گرفته می‌شود (۳). پس از محاسبهٔ S، مقدار Ks از رابطهٔ (4a) تخمین زده می‌شود. مقدار t_{max} (مدت زمان نفوذ در مرحلهٔ گذرا) نیز با استفاده از رابطهٔ (۷) به‌دست می‌آید (۹).

$$t_{max} = \frac{1}{4(1-B)}\left(\frac{S}{K_s}\right)^2 \qquad (۷)$$

برای هر مقدار k مقادیر متناظر t_k (زمان سپری‌شده از آزمایش نفوذ)، S، Ks، t_{max} و Er در جدولی به‌دست می‌آید. در نهایت، مقادیر S و Ks متناظر با حداکثر مقدار t_{max} که $t_k \le t_{max}$ باشد، نتایج اولیهٔ این الگوریتم معرفی می‌شود.

روش BSm

ابتدا، رابطهٔ ساده‌ای برای تخمین Ks با استفاده از مقدار i_s^{exp} ارائه شد (۱۴).

$$Ks = i_s^{exp} - \frac{4\varnothing_m}{\pi r} \qquad (۸)$$

در این رابطه، Φ_m پتانسیل فلاکس ماتریک (L^2T^{-1}) است (۵).

$$\varnothing_m = \int_{h_i}^{\cdot} K(h)\,dh \qquad (۹)$$

دراین رابطه h_i پتانسیل فشاری خاک تعریف‌شده در بازهٔ $0>h_i>-\infty$، K(h) هدایت هیدرولیکی غیراشباع و در واقع پارامتر Φ_m برابر با مساحت سطح زیرمنحنی K(h) در مقابل h در بازهٔ $0>h_i>-\infty$ است. با تقسیم هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) بر پتانسیل فلاکس ماتریک (Φ_m) پارامتری به نام α (L^{-1}) معرفی می‌شود (۱۲).

$$\alpha = \frac{Ks}{\varnothing_m} \qquad (۱۰)$$

مقدار پارامتر α در بافت‌های ماسه‌ای، لومی و رسی به‌ترتیب برابر با ۰/۰۳۶، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۰۴ بر میلی‌متر تخمین زده شده است (۱۲، ۱۳). با ترکیب روابط (۸) و (۱۰) رابطهٔ (۱۲) به‌دست می‌آید (۱۴).

$$\varnothing_m = \frac{K_s}{\alpha} \qquad (۱۱)$$

$$Ks = \frac{i_s^{exp}}{1 + \frac{4}{\pi r \alpha}} \qquad (۱۲)$$

رابطهٔ (۱۱) شکل دیگر رابطهٔ (۱۰) است. بر اساس رابطهٔ (۱۲) با تعیین i_s^{exp} و درنظرگرفتن پارامتر α در بافت خاک مورد نظر مقدار K_s به‌سادگی محاسبه می‌شود. رابطهٔ بین S و Φ نیز با استفاده از رابطهٔ (۱۳) محاسبه می‌شود (۱).

$$S = \left[\gamma_\omega (\theta_s - \theta_.)\varnothing_m\right]^{1/2} \qquad (۱۳)$$

ر این رابطه، γ_ω پارامتر جبههٔ خیس‌شدگی و برابر با ۱/۸۱۸ در نظر گرفته می‌شود (۱). با ترکیب رابطهٔ (۱۱) و (۱۳)، رابطهٔ (۱۴) برای محاسبهٔ پارامتر هیدرولیکی S به‌دست می‌آید.

$$S = \left[\gamma_\omega(\theta_s - \theta_0)\frac{Ks}{\alpha}\right] \qquad (۱۴)$$

در این تحقیق، مجموع روابط (۱۲) و (۱۴) روش محاسباتی ساده‌ای در آزمایش بیرکن است و با علامت اختصاری BSm در محاسبهٔ Ks و S استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا مقدار Ks با رابطهٔ (۱۲)، سپس مقدار S با رابطهٔ (۱۴) محاسبه می‌شود و نیازی به فرایند محاسباتی مربوط به محاسبهٔ S، Er و t_{max} در الگوریتم BESTslope نیست. همچنین، برخلاف BESTslope تمامی مقادیر Ks در روش BSm مثبت است. در این تحقیق، ضمن مقایسهٔ نتایج روش‌های BESTslope و BSm در محاسبهٔ پارامترهای هیدرولیکی، روشی نیز برای محاسبهٔ مقدار α در بافت لومی و لوم ماسه‌ای ارائه شده است.

پژوهش حاضر در مزرعهٔ تحقیقاتی دانشگاه زابل به مساحت ۱۰۰ هکتار در عرض جغرافیایی ″۵۳ ′۳۰ °۵۴ شمالی و طول جغرافیایی ″۱۸ ′۶۱ °۳۱ شرقی انجام شد. آزمایش نفوذ بیرکن در ۱۱۳ نقطهٔ مشخص به فاصلهٔ

Archive of SID
www.SID.ir

تقریبی ۸۰ متر انجام شد. برای انجام آزمایش نفوذ بیرکن از حلقه‌ای فلزی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد که به اندازهٔ ۱ سانتی‌متر درون زمین فرو برده شده بود. سطح خاک قبل از انجام آزمایش از بقایای ریشه و برگ گیاهان پاک شد. ۱۵۰ میلی‌لیتر آب به آرامی و به‌گونه‌ای روی سطح خاک ریخته شد که ساختمان سطح خاک درون حلقه به‌هم نخورد. سپس، مدت زمان نفوذ کامل آب اندازه‌گیری شد.

پس از نفوذ کامل آب مجدداً ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مانند دفعهٔ اول روی سطح خاک درون حلقه ریخته و مدت زمان نفوذ کامل اندازه‌گیری شد. این عمل تا وقتی ادامه یافت که مدت زمان نفوذ آب در خاک برای سه تکرار متوالی یکسان یا اختلاف مدت زمان نفوذ در سه تکرار متوالی ناچیز شود. قبل از شروع آزمایش، دو نمونهٔ دست‌نخورده برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه (θ_0) و وزن مخصوص ظاهری خاک (ρ_b) و نمونه‌ای برای تعیین بافت خاک از هر نقطهٔ مشخص تهیه شد. در این پژوهش، رطوبت اشباع خاک (θ_S) برابر با تخلخل خاک (ε) (۱۰، ۱۱، ۱۶) و وزن مخصوص حقیقی خاک (ρ_S) در تمامی آزمایش‌ها برابر با ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است (۱، ۲). رطوبت اولیهٔ خاک با روش وزنی، بافت خاک با روش آزمایش الک و هیدرومتری (تهیهٔ منحنی دانه‌بندی) و وزن مخصوص ظاهری خاک با روش سیلندر اندازه‌گیری شد (۶).

معیارهای ارزیابی

اگر رابطهٔ Ks در الگوریتم BESTslope با Ks در روش BSm به‌صورت خطی فرض شود، پارامترهای a و b به‌ترتیب عرض از مبدأ و شیب معادله ۱۵ است. همچنین، اگر رابطهٔ S در الگوریتم BESTslope و روش BSm مطابق معادلهٔ (۱۶) و به‌صورت خطی تعریف شود، پارامترهای c و d نیز به‌ترتیب عرض از مبدأ و شیب این رابطه است.

$$Ks_{BSm} = a + b^* Ks_{BESTslope} \quad (۱۵)$$

$$S_{BSm} = c + d * S_{BESTslope} \quad (۱۶)$$

در این روابط، پارامترهای Ks_{BSm} و S_{BSm} تابع مقدار α است. با تغییر مقدار α مقدار a، b، c و d نیز تغییر می‌کند. در این تحقیق برای بررسی میزان انطباق رابطهٔ خطی (۱۵) و (۱۶) برخط ۱:۱ (y=x)، از ضریب تعیین وزنی[1] (ωr^2) استفاده شد که در آن r^2 ضریب تعیین در رابطهٔ خطی بین دو روش است (۸).

$$\omega r^2 \begin{cases} |b|.r^2 & for \quad b \le 1 \\ |b|^{-1}.r^2 & for \quad b > 1 \end{cases} \quad (۱۷)$$

در این رابطه، هرچه مقدار ωr^2 به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، انطباق با خط ۱:۱ بهتر است. مقدار α نیز پارامتری ثابت برای هر دو بافت مورد نظر بر اساس حداقل اختلاف بین مقدار ωr^2 در پارامترهای Ks و S و نزدیک به صفر بودن مقادیر a و c به‌دست آمده است. با یک بار تعیین مقدار α، مقادیر Ks و S نیز به‌راحتی از طریق روابط (۱۲) و (۱۴) محاسبه می‌شود.

برای مقایسهٔ مقدار Ks در الگوریتم BESTslope و روش BSm از فاکتور f_D[2] نیز استفاده شده است که فاکتور تفاوت در هر آزمایش بیرکن است. این فاکتور در هر آزمایش بیرکن از تقسیم مقدار حداکثر Ks بر مقدار حداقل Ks بین BESTslope و روش BSm به‌دست می‌آید (۱). اگر مقدار این فاکتور کمتر از ۳ باشد، اختلاف (خطای) بین دو روش قابل‌قبول است (۴). برای مقایسهٔ درصد اختلاف مقادیر تخمین‌زده شدهٔ S به‌روش BSm با مقادیر S تخمین‌زده شده با مدل BESTslope علاوه‌بر پارامتر ωr^2 از پارامتر Pd_s[3] (درصد نسبی اختلاف) طبق تعریف رابطهٔ (۱۸) استفاده شده است.

1. weighting r2
2. factor of difference
3. relative difference percentage

Archive of SID
www.SID.ir

$$Pd_s = \left(\frac{S - \hat{S}}{\hat{S}}\right)*۱۰۰ \qquad (۱۸)$$

در این رابطه، مقدار $\hat{S}$ برابر با ضریب توانایی جذب خاک تخمین‌زده شده با مدل BESTslope و مقدار S نیز برابر با ضریب توانایی جذب خاک تخمین‌زده شده با مدل BSm است.

در این پژوهش فرایندهای محاسباتی مورد نیاز و مربوط به الگوریتم BESTslope در محیط نرم‌افزاری PTC Mathcad Prime 3.1Math (Soft Engineering and Education, 2015) انجام شد. نمودارها و جداول مورد نیاز در محیط نرم‌افزار Excel 2013 تهیه شد.

نتایج و بحث

با توجه به اینکه از مجموع ۱۱۳ آزمایش انجام‌شده در دوازده آزمایش مقدار Ks در الگوریتم BESTslope منفی به‌دست آمده بود، در نهایت ۱۰۱ آزمایش آزمایشی موفق یا آزمایش‌هایی در نظر گرفته شد که امکان مقایسهٔ نتایج آن‌ها با نتایج به‌دست آمده از روش BSm وجود دارد. مقایسهٔ نتایج دو روش BESTslope و BSm در سه حالت انجام شد. حالت اول، انتخاب آزمایش‌هایی است که در تک‌تک آن‌ها مقدار Er محاسبه‌شده کمتر از ۵/۵ درصد باشد (Nselected = ۳۱). حالت دوم، انتخاب ۵۹ آزمایش (Nselected = ۵۹) است با مقدار متوسط خطای نسبی برازش $(\overline{Er})$ کمتر از ۵/۵ درصد. حالت سوم، انتخاب ۱۰۱ آزمایش (Nselected = ۱۰۱) است که متوسط Er در آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد باشد. در حالت اول، هجده آزمایش در بافت لومی و سیزده آزمایش در بافت لوم ماسه‌ای، در حالت دوم ۳۱ آزمایش در بافت لومی و ۲۸ آزمایش در بافت لوم ماسه‌ای و در حالت سوم ۵۷ آزمایش در بافت لوم و ۴۴ آزمایش در بافت لوم ماسه‌ای است.

بررسی خصوصیات فیزیکی خاک

جداول ۱ و ۲ آماره‌های توصیفی مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک منطقه را در ۱۰۱ آزمایش موفق نشان می‌دهد. بر اساس نتایج جدول ۱، بافت غالب خاک مزرعهٔ آزمایشی لومی و لوم ماسه‌ای است. جدول ۲ نیز نشان می‌دهد که رطوبت نسبی و اولیهٔ خاک (Se) در تمامی نقاط آزمایش کمتر از ۰/۲۶ است. همچنین، مقدار درصد ضریب تغییرات در جدول نشان می‌دهد که در مجموع شرایط یکنواختی در خاک محدودهٔ مطالعاتی وجود دارد.

جدول ۱. آماره‌های توصیفی درصد رس، سیلت و ماسه (Nselected = ۱۰۱)

بافت خاک (USDA class)	آمارهٔ توصیفی	درصد ماسه (Sand %)	درصد سیلت (Silt %)	درصد رس (Clay %)
	حداقل	۲۰/۰۰	۱۵/۶۰	۱۱/۶۰
	حداکثر	۷۰/۸۰	۵۰/۲۰	۳۵/۶۰
لوم و لوم ماسه‌ای	متوسط حسابی	۴۷/۸۵	۳۱/۵۳	۲۰/۶۲
	میانه	۴۸/۰۰	۳۱/۶۰	۲۰/۰۰
	درصد ضریب تغییرات	۲۴/۴۵	۲۸/۱۱	۲۵/۵۳

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. آماره‌های توصیفی وزن مخصوص ظاهری (ρ_b)، رطوبت اولیه (θ_0)، تخلخل (ε) و رطوبت نسبی اولیه (Se) (Nselected = ۱۰۱)

بافت خاک (USDA class)	آماره توصیفی	ρ_b (gr/cm^3)	θ_0 (cm^3/cm^3)	†ε (cm^3/cm^3)	Se (cm^3/cm^3)
لوم و لوم ماسه‌ای	حداقل	۱/۱۴۰	۰/۰۸۰	۰/۳۵۱	۰/۱۴۱
	حداکثر	۱/۷۲۰	۰/۱۲۰	۰/۵۷۰	۰/۲۶۰
	متوسط حسابی	۱/۴۱۸	۰/۱۰۳	۰/۴۶۵	۰/۲۲۳
	میانه	۱/۴۲۰	۰/۱۰۰	۰/۴۶۴	۰/۲۲۶
	درصد ضریب تغییرات	۷/۱۲۰	۷/۸۹۹	۸/۱۹۰	۹/۵۲۲

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

با بررسی اولیه مشخص شد که از مجموع کل آزمایش‌ها، ۶۵ آزمایش در بافت لومی و ۴۸ آزمایش در بافت لوم ماسه‌ای است. لازم به ذکر است که با توجه به نزدیکی خصوصیات بافت‌های لوم و لوم ماسه‌ای در محاسبهٔ مقدار بهینهٔ پارامتر α و آماره‌های توصیفی خصوصیات فیزیکی خاک مورد آزمایش، مقدار بهینهٔ پارامتر α در هر دو بافت مذکور و در حالت‌های سه‌گانه تعیین شده است.

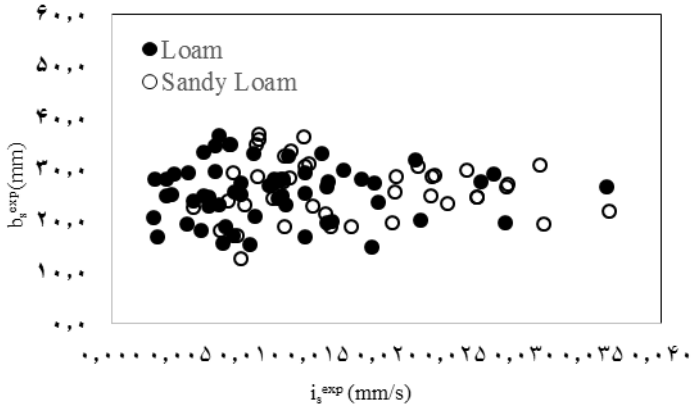
تغییرات i_s^{exp} و b_s^{exp} در آزمایش‌های منتخب

با توجه به اینکه روش BSm بر اساس داده‌های نفوذ در مرحلهٔ پایدار است، بازهٔ تغییرات شیب (i_s^{exp}) و عرض از مبدأ (b_s^{exp}) منحنی نفوذ در مرحلهٔ پایدار در ۱۰۱ آزمایش منتخب با مقدار متوسط خطای نسبی برازش ($\overline{Er}$) کمتر از ۱۰ درصد بررسی شد (جدول ۳ و شکل ۱). b_s^{exp} عرض از مبدأ خط برازش‌شده بر سه نقطهٔ انتهایی (دادهٔ انتهایی) در مرحلهٔ پایدار است. در تمامی آزمایش‌ها منتخب در هر دو بافت خاک بازهٔ تغییرات مقادیر b_s^{exp} بین ۱۲ تا ۳۷ میلی‌متر بود که به یکدیگر نزدیک است. بازهٔ تغییرات مقادیر i_s^{exp} نیز در هر دو بافت به یکدیگر تا حدودی نزدیک است، البته حدود ۷۰ درصد از مقادیر i_s^{exp} بزرگ‌تر از ۰/۰۲ میلی‌متر بر ثانیه مربوط به بافت لوم ماسه‌ای است. مقادیر متوسط i_s^{exp} و b_s^{exp} در هر دو بافت خاک تقریباً مساوی بود و درصد ضریب تغییرات آن‌ها نیز در هر دو بافت اختلاف زیادی با یکدیگر ندارد.

جدول ۳. آماره‌های توصیفی شیب (i_s^{exp}) و عرض از مبدأ (b_s^{exp}) معادلهٔ خط نفوذ (Nselected = ۱۰۱)

آمارهٔ توصیفی	i_s^{exp} (mm/s)		b_s^{exp}(mm)	
	لوم	لوم ماسه‌ای	لوم	لوم ماسه‌ای
حداقل	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۶۰	۱۳/۸۳۸	۱۲/۵۳۷
حداکثر	۰/۰۳۶۱	۰/۰۳۶۳	۳۶/۲۸۱	۳۶/۶۱۵
متوسط	۰/۰۱۲۱	۰/۰۱۷۴	۲۵/۳۲۵	۲۵/۹۷۷
میانه	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۴۴	۲۵/۴۳۳	۲۶/۳۲۳
درصد ضریب تغییرات	۵۷/۸۹۸	۴۴/۷۴	۲۱/۴۵۱	۲۱/۹۱۷

Archive of SID
www.SID.ir



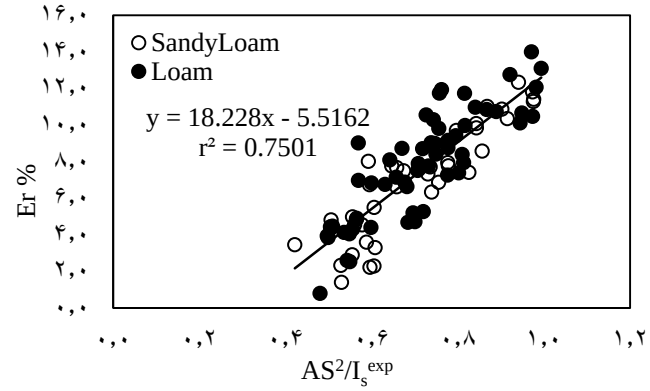
شکل ۱. تغییرات شیب معادلهٔ خط نفوذ i_s^{exp} در برابر تغییرات b_s^{exp} (Nselected = ۱۰۱)

تغییرات Er در الگوریتم BESTslope

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش Er پارامتر $A.S^2/I_S^{exp}(s^{-1})$ نیز با همبستگی بالایی (r^2=۰/۷۵) افزایش یافته است، ولی در ۱۰۱ آزمایش منتخب با $\overline{Er}$ کمتر از ۱۰ درصد بازهٔ تغییرات $A.S^2/I_S^{exp}$ در الگوریتم BESTslope بین ۰/۴ تا ۱/۰ است (شکل ۲). مطابق جدول ۴، مقدار متوسط خطای نسبی ($\overline{Er}$) و درصد ضریب تغییرات در الگوریتم BESTslope به‌ترتیب ۷/۴۷۸ و ۱۹/۹۹۹ است.

جدول ۴. آماره‌های توصیفی Er و AS^2/I_S^{exp} (Nselected = ۱۰۱)

آمارهٔ توصیفی	Er	AS^2/I_S^{exp}
حداقل	۰/۷۹۳	۰/۴۲۲
حداکثر	۱۳/۹۹۴	۰/۹۹۴
متوسط	۷/۴۷۸	۰/۷۱۳
میانه	۷/۶۸۴	۰/۷۱۹
درصد ضریب تغییرات	۴۰/۱۲۴	۱۹/۹۹۹



شکل ۲. تغییرات پارامتر I_S^{exp}/AS در برابر Er

Archive of SID
www.SID.ir

محاسبهٔ پارامترهای هیدورلیکی در ۳۱ آزمایش منتخب

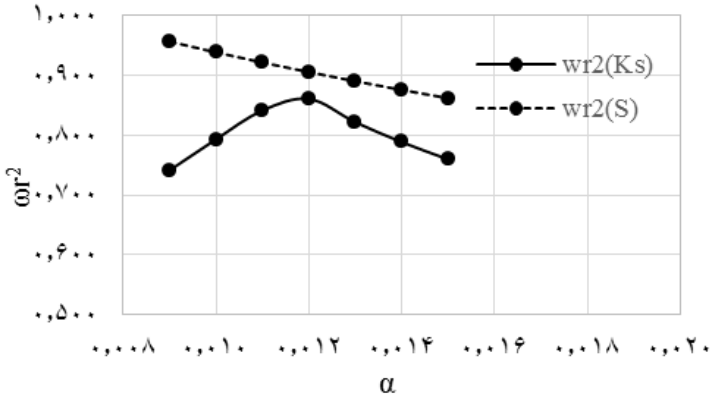
از مجموع ۱۱۳ آزمایش بیرکن در ۳۱ آزمایش مقدار متوسط و حداکثر Er به‌ترتیب ۳/۸ و ۵/۵ درصد است. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، ملاک تعیین مقدار مناسب (بهینه) پارامتر α در خاک مورد نظر حداقل‌شدن اختلاف مقدار ضریب تعیین وزنی (ωr^2) بین Ks و S است. نتایج به‌دست آمده از مقادیر مختلف α در جدول ۵ و شکل ۳ نشان می‌دهد که در مقدار α=۰/۰۱۲ مقادیر a و c تقریباً نزدیک به صفر و به‌ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۲- و ۰/۰۶۷۹ است. مقدار b و d نیز نزدیک به عدد ۱ و به‌ترتیب برابر با ۱/۰۱۴۸ و ۰/۹۳۳۵ است. مقدار پارامتر ωr^2 در Ks و S به‌ترتیب برابر با ۰/۸۶۰ و ۰/۹۰۵۴ است که به یکدیگر بسیار نزدیک و اختلاف مقدار آن‌ها ($\Delta\omega r^2$) در α=۰/۰۱۲ به‌حداقل مقدار رسیده و برابر با مقدار اندک ۰/۰۴۴۸ است. با توجه به اینکه مجموعه نتایج به‌دست آمده در این حالت در بافت‌های لومی و لوم ماسه‌ای به یکدیگر نزدیک است، یک مقدار برای پارامتر α در هر دو بافت در نظر گرفته شده است. شکل ۴ الف و ب نیز رابطهٔ Ks و S را بین دو الگوریتم BESTslope و BSm در α=۰/۰۱۲ نشان می‌دهد. جداول ۶ و ۷ نیز آماره‌های توصیفی Ks و S را در ۳۱ آزمایش منتخب و α=۰/۰۱۲ نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جداول در α=۰/۰۱۲ مقادیر متوسط Ks با یکدیگر برابر و مقادیر متوسط S نیز اختلاف اندکی با یکدیگر دارد. همچنین، نزدیکی مقدار درصد تغییرات در α=۰/۰۱۲ نیز نزدیکی بازهٔ تغییرات K_S و S را در هر دو روش نشان می‌دهد. در ۳۱ آزمایش منتخب مقدار حداقل و حداکثر f_D نیز همان‌گونه که مطلوب و مورد نظر است در α=۰/۰۱۲ کمتر از ۳ و به‌ترتیب برابر با ۱/۰۰۶ و ۱/۴۸۰ است. مقدار Pds نیز در α=۰/۰۱۲ از ۱۷/۳۷۷- تا ۷/۹۷۹+ متغیر است که در مجموع اختلاف اندکی را بین BESTslope و BSm در محاسبهٔ S نشان می‌دهد. با جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده، مقدار α در این حالت در خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای برابر با ۰/۰۱۲ محاسبه شده است که برابر با مقدار α به‌دست آمده در تحقیقات گذشته است (۴).

جدول ۵. تغییر پارامترهای رگرسیون در برابر تغییر مقدار α (Nselected = ۳۱)

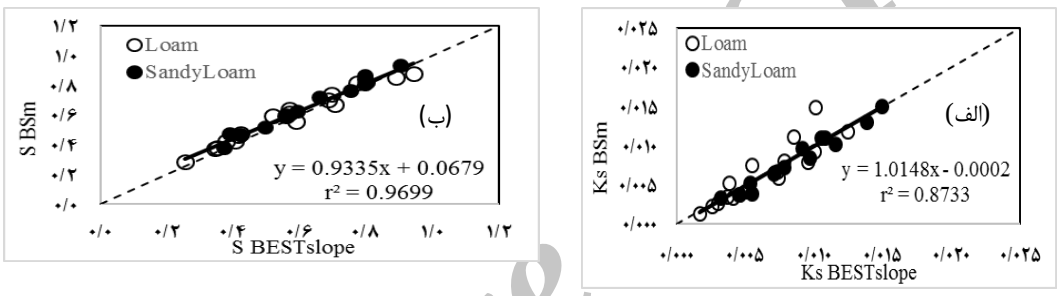
α	a	b	r^2	wr^2(Ks)	C	d	r^2	wr^2(S)	Δwr^2
۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۲-	۰/۸۴۹۰	۰/۸۷۳۳	۰/۷۴۱۴	۰/۰۷۱۸	۰/۹۸۵۹	۰/۹۶۹۹	۰/۹۵۶۲	۰/۲۱۴۸
۰/۰۱۰	۰/۰۰۰۲-	۰/۹۰۸۳	۰/۸۷۳۳	۰/۷۹۳۲	۰/۰۷۰۴	۰/۹۶۷۵	۰/۹۶۹۹	۰/۹۳۸۴	۰/۱۴۵۲
۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۲-	۰/۹۶۳۵	۰/۸۷۳۳	۰/۸۴۱۴	۰/۰۶۹۱	۰/۹۵۰۰	۰/۹۶۹۹	۰/۹۱۴	۰/۰۸۰۰
†۰/۰۱۲	۰/۰۰۰۲-	۱/۰۱۴۸	۰/۸۷۳۳	۰/۸۶۰۶	۰/۰۶۷۹	۰/۹۳۳۵	۰/۹۶۹۹	۰/۹۰۵۴	۰/۰۴۴۸
۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۲-	۱/۰۶۲۷	۰/۸۷۳۳	۰/۸۲۱۸	۰/۰۶۶۸	۰/۹۱۷۸	۰/۹۶۹۹	۰/۸۹۰۲	۰/۰۶۸۴
۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۲-	۱/۱۰۷۵	۰/۸۷۳۳	۰/۷۸۸۵	۰/۰۶۷۵	۰/۹۰۲۸	۰/۹۶۹۹	۰/۸۷۵۶	۰/۰۸۷۱
۰/۰۱۵	۰/۰۰۰۲-	۱/۱۴۹۵	۰/۸۷۳۳	۰/۷۵۹۷	۰/۰۶۴۷	۰/۸۸۸۶	۰/۹۶۹۹	۰/۸۶۱۹	۰/۱۰۲۱

†: α انتخاب‌شده در خاک‌های لوم ولوم ماسه‌ای

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۳. تغییر مقدار $wr^2(Ks)$ و$wr^2(S)$ **در برابر تغییر** α **(**Nselected = **۳۱)**



شکل ۴. مقایسهٔ الگوریتم‌های BESTslope و BSm **در تخمین الف)** K_s (mms^{-1}) **و ب)** S $(mms^{0.5})$ **(**Nselected = **۳۱)**

جدول ۶. آماره‌های توصیفی پارامتر Ks **در سه حالت**

آماره‌های توصیفی	Nselected= ۳۱		Nselected= ۵۹		Nselected= ۱۰۱	
	BSm	BESTslope	BSm	BESTslope	BSm	BESTslope
حداقل	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱
حداکثر	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۶۴	۰/۰۱۴۹.	۰/۰۱۹۶	۰/۰۱۴۹
متوسط	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۴۲
میانه	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۳۳
درصد ضریب تغییرات	۵۱/۶۰	۴۶/۹۴	۵۳/۰۹	۵۷/۵۷	۵۳/۰۹	۷۸/۵۹

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۷. آماره‌های توصیفی پارامتر S در سه حالت

آماره‌های توصیفی	Nselected= ۳۱		Nselected= ۵۹		Nselected= ۱۰۱	
	BSm	BESTslope	BSm	BESTslope	BSm	BESTslope
حداقل	۰/۲۸۳	۰/۲۵۴	۰/۲۷۳	۰/۵۴	۰/۲۵۰	۰/۲۵۴
حداکثر	۰/۹۳۴	۰/۹۴۳	۰/۹۰۳	۰/۹۴۳	۰/۸۲۶	۰/۹۴۳
متوسط	۰/۶۲۲	۰/۵۹۳	۰/۵۶۴	۰/۵۸۴.	۰/۵۱۶	۰/۵۸۱
میانه	۰/۶۱۲	۰/۵۷۰	۰/۵۴۱	۰/۵۶۸	۰/۴۹۵	۰/۵۷۰
درصد ضریب تغییرات	۲۸/۹۴۸	۳۲/۰۰۶	۲۸/۵۳۸	۳۰/۰۷۹	۲۸/۵۳۸	۲۸/۴۳۷

محاسبهٔ پارامترهای هیدورلیکی در ۵۹ آزمایش منتخب

در این حالت از مجموع ۱۱۳ آزمایش بیرکن، ۵۹ آزمایش با مقدار متوسط Er کمتر از ۵/۵ درصد ($\overline{Er} < 5.5\%$) و حداکثر Er برابر با ۸/۴ درصد برای محاسبهٔ مقدار بهینهٔ پارامتر α انتخاب شد. جدول ۸ و شکل ۵ نشان می‌دهد که از مجموع مقادیر مختلف پارامتر α، در مقدار α=۰/۰۱۴ مقادیر a و c تقریباً نزدیک به صفر و به‌ترتیب برابر با ۰/۰۰۱۵ و ۰/۰۴۷۵ است. مقدار b و d نیز نزدیک به ۱ و به‌ترتیب برابر با ۰/۹۸۸ و ۰/۸۸۵ است. مقدار پارامتر ωr^2 برای Ks و S به‌ترتیب ۰/۷۲۷ و ۰/۸۲۴ است که اختلاف مقدار آن‌ها ($\Delta\omega r^2$) در α =۰/۰۱۴ به حداقل مقدار رسیده و برابر با ۰/۰۹۶۹ است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، هر چند با افزایش خطای متوسط ($\overline{Er}$) در این حالت مقدار پارامتر ωr^2 برای Ks و S نسبت به حالت قبل کمتر و از طرفی مقدار $\Delta\omega r^2$ در این حالت نسبت به حالت قبل بیشتر است، مقدار α به‌دست آمده برای بافت لوم و لوم ماسه‌ای (α=۰/۰۱۴) اختلاف اندکی با حالت قبل (α=۰/۰۱۲) دارد.

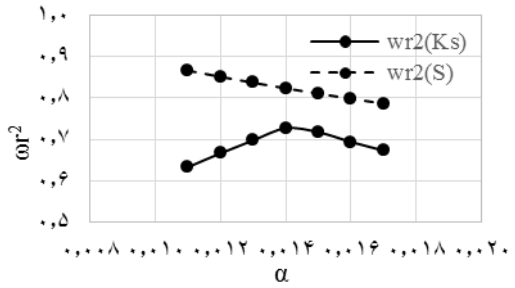
جدول ۸. تغییر پارامترهای رگرسیون در برابر تغییر مقدار α (Nselected = ۵۹)

α	a	b	r^2(Ks)	wr^2(Ks)	c	d	r^2(S)	wr^2(S)	Δwr^2
۰/۰۱۱	۰/۰۰۱۳	۰/۸۵۹۶	۰/۷۳۵۸	۰/۶۳۲۵	۰/۰۵۰۰	۰/۹۳۰۷	۰/۹۳۱۵	۰/۸۶۶۹	۰/۲۳۴۵
۰/۰۱۲	۰/۰۰۱۴	۰/۹۰۵۴	۰/۷۳۵۸	۰/۶۶۶۲	۰/۰۴۹۱	۰/۹۱۴۵	۰/۹۳۱۵	۰/۸۵۱۹	۰/۱۸۵۷
۰/۰۱۳	۰/۰۰۱۴	۰/۹۴۸۲	۰/۷۳۵۸	۰/۶۹۷۷	۰/۰۴۸۳	۰/۸۹۹۱	۰/۹۳۱۵	۰/۸۳۷۵	۰/۱۳۹۸
†۰/۰۱۴	۰/۰۰۱۵	۰/۹۸۸۱	۰/۷۳۵۸	۰/۷۲۷۰	۰./۰۴۷۵	۰/۸۸۴۵	۰/۹۳۱۵	۰/۸۲۳۹	۰/۰۹۶۹
۰/۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۱/۰۲۵۶	۰/۷۳۵۸	۰/۷۱۷۴	۰/۰۴۶۸	۰/۸۷۰۶	۰/۹۳۱۵	۰/۸۱۱۰	۰/۰۹۳۵
۰/۰۱۶	۰/۰۰۱۶	۱/۰۶۰۸	۰/۷۳۵۸	۰/۶۹۳۶	۰/۰۴۶۱	۰/۸۵۷۳	۰/۹۳۱۵	۰/۷۹۸۶	۰/۱۰۴۹
۰/۰۱۷	۰/۰۰۱۶	۱/۰۹۳۹	۰/۷۳۵۸	۰/۶۷۲۶	۰/۰۴۵۴	۰/۸۴۴۶	۰/۹۳۱۵	۰/۷۸۶۷	۰/۱۱۴۱

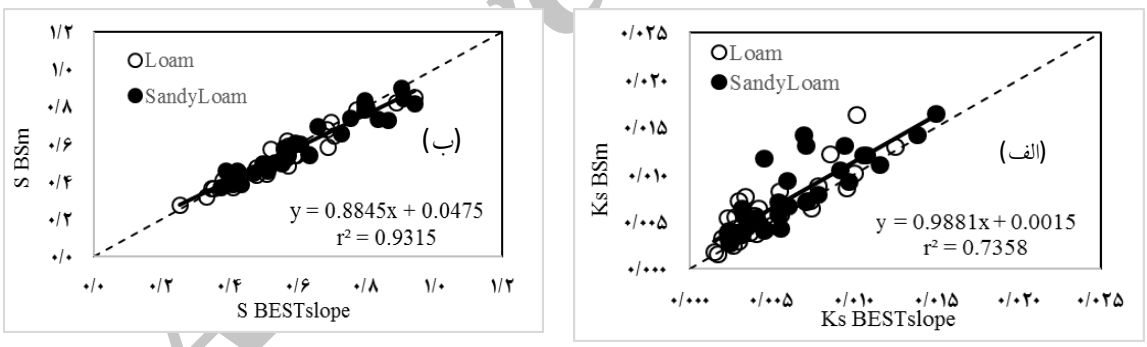
† : α انتخاب‌شده برای خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای

Archive of SID
www.SID.ir

شکل ۶ (الف و ب) رابطهٔ Ks و S را بین دو الگوریتم BESTslope و BSm در α=۰/۰۱۴ نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جداول ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر متوسط Ks و S و نیز درصد ضریب تغییرات آن‌ها در دو الگوریتم BESTslopen و BSm در α =۰/۰۱۴ با یکدیگر اختلاف اندکی دارد. حداقل و حداکثر مقدار f_D نیز به‌ترتیب برابر است با ۱/۰۰۶ و ۲/۶۰ که در تمام آزمایش‌های منتخب کمتر از ۳ است. مقدار Pds نیز از ۲۲/۸۵۱- تا ۷/۹۷۹+ متغیر است و مانند حالت قبل اختلاف اندکی را بین BESTslope و BSm در محاسبهٔ S نشان می‌دهد. در مجموع، بر اساس نتایج به‌دست آمده از ۵۹ آزمایش منتخب، مقدار بهینهٔ α در خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای برابر با ۰/۰۱۴ تعیین شد که به مقدار α محاسبه شده در حالت قبل (۳۱ آزمایش) نزدیک است.



شکل ۵. تغییر مقدار wr^2(Ks) و wr^2(S) در برابر تغییر α–(Nselected = ۵۹)



شکل ۶. مقایسهٔ الگوریتم‌های BESTslope و BSm در تخمین الف) K_s (mms^{-1}) و ب) S ($mms^{0.5}$) (Nselected = ۵۹)

محاسبهٔ پارامترهای هیدورلیکی برای ۱۰۱ آزمایش منتخب

در حالت سوم، همهٔ ۱۰۱ آزمایش منتخب از مجموع ۱۱۳ آزمایش بیرکن برای محاسبهٔ مقدار بهینهٔ پارامتر α در بافت لوم و لوم ماسه‌ای در نظر گرفته شد. در این حالت مقدار متوسط Er کمتر از ۱۰ درصد و حداکثر Er ۱۳/۹۹ درصد و نسبت به دو حالت قبل متوسط خطای نسبی برازش بیشتر است. نتایج به‌دست آمده در جدول ۹ و شکل ۷ نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر پارامتر ωr^2 برای Ks و S ($\Delta\omega r^2$) در α =۰/۰۲۰ به‌حداقل مقدار رسیده و برابر با ۰/۰۸۱۴ است. در این حالت مقادیر ωr^2 برای Ks و S

www.SID.ir

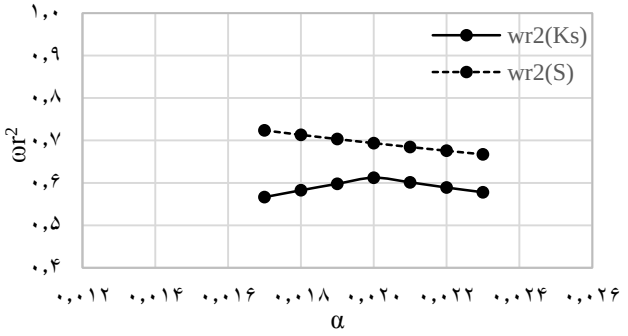
به‌ترتیب برابر با ۰/۶۱۲ و ۰/۶۹۴ است. همچنین، مقادیر a و c تقریباً نزدیک به صفر و به‌ترتیب برابر با ۰/۰۰۳۶ و ۰/۰۲۲۸ است. مقدار b نیز نزدیک به عدد ۱ و برابر با ۰/۹۹۸ و مقدار d با مقداری اختلاف نسبت به عدد ۱ برابر با ۰/۷۸۸ است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد و تا حدودی قابل‌پیش‌بینی نیز بوده است، با افزایش متوسط خطای نسبی در این حالت مقدار ωr^2 برای هر دو پارامتر Ks و S نسبت به دو حالت قبل (۳۱ و ۵۹ آزمایش) کمتر است و با عدد ۱ فاصلهٔ قابل‌توجهی دارد. مقدار α نیز برای بافت لوم و لوم ماسه‌ای نسبت به دو حالت قبل اختلاف قابل‌توجهی دارد. شکل ۸ (الف و ب) رابطهٔ Ks و S را بین الگوریتم‌های BESTslope و BSm در α= ۰/۰۲۰ نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در جداول ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر متوسط Ks و S در هر دو روش BESTslope و BSm نسبت به دو حالت قبل با یکدیگر اختلاف بیشتری دارد. حداقل و حداکثر مقدار f_D نیز در ۸۰ درصد آزمایش‌های منتخب کمتر از ۳ و نسبت به دو حالت قبل مقداری افزایش داشته است. مقدار Pds نیز از ۲۹/۶۶۹- تا ۷/۹۷۹+ متغیر است. در مجموع، مانند دو حالت قبل اختلاف اندک بین BESTslope و BSm در محاسبه توانایی جذب خاک را نشان می‌دهد. در مجموع، بر اساس یافته‌های به‌دست آمده در این حالت (Nselected = ۱۰۱)، مقدار α در خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای برابر با ۰/۰۲۰ محاسبه شد که با مقدار α به‌دست آمده در تحقیقات گذشته برای خاک‌های مشابه (۴) ۰/۰۰۶ اختلاف دارد که اختلاف قابل‌توجهی است.

جدول ۹. تغییر پارامترهای رگرسیون در برابر تغییر مقدار α (Nselected = ۱۰۱)

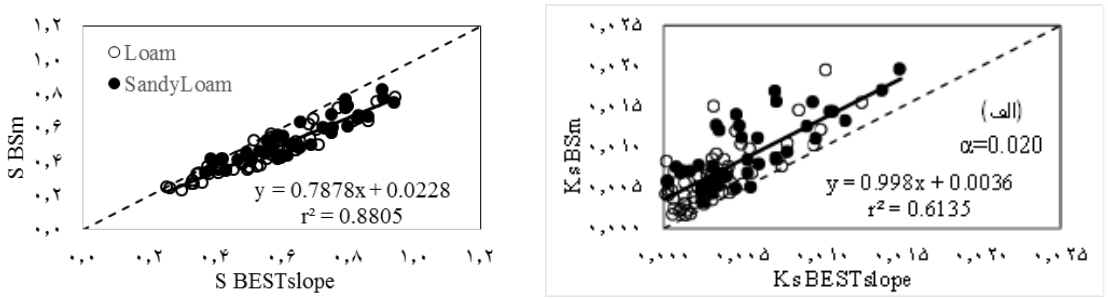
α	A	b	r^2	wr^2(Ks)	C	d	r^2	wr^2(S)	Δwr^2
۰/۰۱۷	۰/۰۰۳۳	۰/۹۲۳۲	۰/۶۱۳۵	۰/۵۶۶۴	۰/۰۳۰۱	۰/۸۲۱۹	۰/۸۸۰۵	۰/۷۲۳۷	۰/۱۵۷۳
۰/۰۱۸	۰/۰۰۳۴	۰/۹۴۹۶	۰/۶۱۳۵	۰/۵۸۲۶	۰/۰۲۹۷	۰/۸۱۰۰	۰/۸۸۰۵	۰/۷۱۳۲	۰/۱۳۰۶
۰/۰۱۹	۰/۰۰۳۵	۰/۹۷۴۵	۰/۶۱۳۵	۰/۵۹۷۹	۰/۰۲۹۲	۰/۷۹۸۷	۰/۸۸۰۵	۰/۷۰۳۳	۰/۱۰۵۴
†۰/۰۲۰	۰/۰۰۳۶	۰/۹۹۸۰	۰/۶۱۳۵	۰/۶۱۲۳	۰/۰۲۸۸	۰/۷۸۷۸	۰/۸۸۰۵	۰/۶۹۳۷	۰/۰۸۱۴
۰/۰۲۱	۰/۰۰۳۶	۱/۰۲۰۳	۰/۶۱۳۵	۰/۶۰۱۳	۰/۰۲۸۵	۰/۷۷۷۴	۰/۸۸۰۵	۰/۶۸۴۵	۰/۰۸۳۲
۰/۰۲۲	۰/۰۰۳۷	۱/۰۴۱۵	۰/۶۱۳۵	۰/۵۸۹۱	۰/۰۲۸۵	۰/۷۶۷۴	۰/۸۸۰۵	۰/۶۷۷۵	۰/۰۸۶۶
۰/۰۲۳	۰/۰۰۳۷	۱/۰۶۱۶	۰/۶۱۳۵	۰/۵۷۷۹	۰/۰۲۷۷	۰/۷۵۷۷	۰/۸۸۰۵	۰/۶۶۷۲	۰/۰۸۹۳

† α انتخاب‌شده برای خاک‌های لوم ولوم ماسه‌ای



شکل ۷. تغییر مقدار wr^2(Ks) وwr^2(S) در برابر تغییر α (Nselected = ۱۰۱)

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۸. مقایسهٔ الگوریتم‌های BESTslope و BSm **در تخمین الف)** (K_s (mms^{-1}) **و ب)** S($mms^{0.5}$) –(Nselected = ۱۰۱)

نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌منظور مقایسهٔ الگوریتم اصلی آزمایش نفوذ بیرکن (BESTslope) با الگوریتم ساده‌شدهٔ BSm در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک (Ks و S) و انتخاب مقدار بهینهٔ پارامتر α در بافت‌های لوم و لوم ماسه‌ای منطقه انجام شد. نخست، آزمایش‌های منجر به مقادیر منفی و غیرمنطقی پارامترهای مورد نظر حذف شد. در نهایت، نتایج مربوط به تعداد ۱۰۱ آزمایش موفق که متوسط خطای برازش (Er) آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد بود (حالت ۳) با نتایج مربوط به ۵۹ آزمایش که متوسط خطای برازش آن‌ها کمتر از ۵/۵ درصد بود (حالت ۲) و نتایج مربوط به ۳۱ آزمایش که خطای نسبی برازش در تک‌تک نقاط کمتر از ۵/۵ درصد بود (حالت ۱) مقایسه شد. نتایج نشان داد که آماره‌های توصیفی Ks برای حالات ۱ و ۲ به یکدیگر نزدیک است و با نتایج حالت ۳ که خطای متوسط نسبی افزایش یافته است به‌نسبت اختلاف زیادی دارد، ولی آماره‌های توصیفی پارامتر S در مجموع برای هر دو روش BESTslope و BSm در هر سه حالت اختلاف قابل‌توجهی نشان نداد. مقدار بهینهٔ پارامتر α که بر اساس حداقل اختلاف بین مقدار ضریب تعیین وزنی (wr^2) تخمین Ks و S با دو الگوریتم BESTslope و BSmانتخاب شد، در حالات ۱ و ۲ به‌یکدیگر بسیار نزدیک بود ولی با حالت ۳ اختلاف قابل‌توجهی داشت. بنابراین، با توجه به اینکه افزایش متوسط خطای نسبی برازش به بیش از ۵/۵ درصد (حالت سوم) اختلاف معناداری را در محاسبهٔ مقدار α با دو حالت دیگر و با مقدار به‌دست آمده در تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، مقدار بهینهٔ α در خاک‌های لومی و لوم ماسه‌ای برابر با متوسط مقادیر α به‌دست آمده از حالات ۱ و ۲ و برابر با ۰/۰۱۳ پیشنهاد شد. این پژوهش نشان داد با تعیین مقدار α در خاک‌های لومی و لوم ماسه‌ای، محاسبهٔ مقدار پارامترهای هیدورلیکی Ks و S بر اساس آزمایش نفوذ بیرکن و روش سادهٔ محاسباتی ارائه‌شده (روش BSm) به‌سادگی امکان‌پذیر است. در تحقیقات آینده، انجام آزمایش‌های بیشتر بیرکن در بافت‌های مختلف خاک از جمله بافت‌های لوم و لوم ماسه‌ای به‌منظور تعیین دقیق‌تر مقادیر α پیشنهاد می‌شود.

منابع

1. Bagarello V., Di Prima S., Iovino M. and Provenzano G. (2014a) Estimating field-saturated soil hydraulic conductivity by a simplified Beerkan infiltration experiment. Hydrological Processess. 28: 1095-1103

Archive of SID
www.SID.ir

2. 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.

3. Di Prima S., Lassabatere L., Bagarello V., Iovino M. and Angulo-Jaramillo R. (2016) testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. Geoderma. 262: 20-34.

4. Elrick D.E. and Reynolds W.D. (1992) Methods for analyzing constant-head well permeameter data. Soil Science Society of America. 56: 320-323

5. Gardner W.R. (1958) Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science. 85: 228-232.

6. Gee G.W. and Or D. (2002) 2.4 Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), Methods of soil analysis. Part 4, Physical methods. : SSSA Book Series. 5. Soil Science Society of America. Inc. Madison. WI. 255-293.

7. Haverkamp R., Ross P., Smetten K. and Parlange J. (1994) Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation. Water Resources Research. 30: 2931-2935.

8. Krause P., Boyle D.P. and Base F. (2005) Comparison of different efficiency criteria for hydrological model. Advances in Geosciences. 5: 89-97.

9. Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca R., Braud I. and Haverkamp R. (2006) Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments. Soil Science Society of America.70: 521-532.

10. Mubarak I., Mailhol J., Angulo-Jaramillo R., Ruelle P., Boivin P. and Khaledian M. (2009) temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. Geoderma. 150: 158-165.

11. Mubarak I., Angulo-Jaramillo R., Mailhol J.C., Ruelle P., Khaledian M. and Vauclin M. (2010) Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: is infiltration method dependent? Agricultural Water Management. 97: 1517-1526.

12. Reynolds W.D. and Elrick D.E. (1990) Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. Soil Science Society of America. 54: 1233-1241.

13. Reynolds W. and Elrick D.E. (2002) 3.4.1.1 Principles and parameter definitions. In Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods, Dane JH, Topp GC (eds). SSSA Book Series, No. 5. Science Society of America. Madison Wisconsin, USA: 797-801.

14. Vandervaere J.P., Vauclin M. and Elrick D.E. (2000) Transient flow from tension infiltrometers: I. The two-parameter equation. Soil Science Society of America. 64: 1263-1272.

15. 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.

16. Xu X., Kiely G. and Lewis G. (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.

17. Xu X., Lewis C., Liu W., Albertson J. and Kiely G. (2012). Analysis of single-ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: Comparison of BEST and Wu methods. Agriculture Water Management. 107: 34-41.

18. Yilmaz D., Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R., Deneeleand D. and Legret M. (2010) Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. Vadose Zone. 9: 107-116.

Archive of SID
www.SID.ir