



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

صفحه‌های ۱۳۳-۱۴۷

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

تارخ احمدی<sup>۱</sup>، پیمان افراسیاب<sup>۲\*</sup>، معصومه دلبری<sup>۲</sup>

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

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۴

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۰۸

### چکیده

روش آزمایش نفوذ تک‌استوانه‌ای بیرکن در سال‌های اخیر به دلیل کم‌هزینه بودن و سادگی در اجرا بسیار مورد توجه قرار گرفته 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 مقایسه عملکرد الگوریتم BESTslope با روش پیشنهادی ساده و تعیین مقدار پارامتر ثابت  $\alpha$  به‌عنوان نسبت نیروی ثقل به نیروی کاپیلاری در بافت‌های لوم و لوم ماسه‌ای است. برای این منظور تعداد ۱۱۳ آزمایش نفوذ بیرکن در مزرعه تحقیقاتی سد سیستان با بافت غالب لومی و لوم ماسه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد مقدار  $K_s$  تخمین زده 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 به نسبت زیادی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار  $\alpha$  در خاک‌های لومی و لوم ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه برابر با متوسط مقدار به دست آمده در حالات ۳۱ و ۵۹ آزمایش منتخب و برابر با ۰/۰۱۳ تعیین شد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم BESTslope، بیرکن، پارامتر  $\alpha$ ، توانایی جذب خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع.

## مقدمه

استفاده از این آزمایش نفوذ در مجموع آسان تر می شود. روش ساده‌ای که در این تحقیق با علامت اختصاری BSm معرفی شده است، مقدار  $K_s$  را با توجه به مقدار شیب معادله خطی نفوذ در مرحله پایدار نفوذ ( $i_s^{exp}$ ) و پارامتر ثابت  $\alpha$  محاسبه می کند (۱۴). پارامتر  $\alpha$  برابر نسبت نیروی ثقل یا همان هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) به نیروی کاپیلاری یا نیروی ماتریک ( $\phi_m$ ) خاک است که در بافت‌های مختلف خاک ممکن است متفاوت باشد. مقدار  $S$  نیز از طریق مقدار  $K_s$  تخمین زده شده به دست می آید و در عمل نیازی به نوشتن برنامه برای فرایند محاسباتی نیست. در این تحقیق، ضمن مقایسه نتایج الگوریتم BESTslope و روش BSm در محاسبه پارامترهای هیدرولیکی خاک، مقدار  $\alpha$  نیز در بافت‌های لومی و لوم ماسه‌ای محاسبه شده است.

## مواد و روش‌ها

### نظریه

به طور کلی، نفوذ آب در خاک را می توان شامل دو مرحله 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 به راحتی میسر نیست. معادلات نفوذ تجمعی در مرحله گذرا ( $I(t)$ ) و پایدار ( $I_m$ ) (t) به ترتیب در روابط (۱a) و (۱b) ارائه شده است. با مشتق گیری از این معادلات سرعت نفوذ در مرحله گذرا ( $i(t)$ ) و پایدار ( $i_s$ ) به دست می آید (۷).

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

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

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

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

امروزه، روش آزمایش نفوذ بیرکن<sup>۱</sup> به دلیل سادگی در اجرا و هزینه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. سادگی این روش به دلیل استفاده از حلقه‌ای است که در حدود ۱ سانتی متر در زمین فرومی رود و حجم کم و ثابت آبی که به طور تکراری بر سطح خاک درون حلقه ریخته می شود. توجه به اینکه فرایند نفوذ آب در خاک ابتدا در مرحله گذرا<sup>۲</sup>، سپس در مرحله پایدار<sup>۳</sup> است، در آزمایش نفوذ داده‌های جمع آوری شده از چند دقیقه اول آزمایش اطمینان کمتری در مقایسه با داده‌هایی بعد قرائت شده وجود دارد (۱۵). تعیین مرحله پایدار در فرایند نفوذ آب در خاک راحت تر از تعیین مرحله گذراست، لذا روش‌های محاسباتی مبتنی بر داده‌های نفوذ در مرحله پایدار ساده تر از روش‌های محاسباتی مبتنی بر محاسبه پارامترهای هیدرولیکی بر اساس داده‌های نفوذ در مرحله گذرا یا روش‌های مبتنی بر تلفیق مراحل گذرا و پایدار است.

روش اصلی در محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و توانایی جذب خاک ( $S$ )، الگوریتم BESTslope<sup>۴</sup> است (۲). این الگوریتم پارامترهای هیدرولیکی را بر اساس تلفیق معادلات نفوذ در مراحل گذرا و پایدار محاسبه می کند. با توجه به اینکه فرایند محاسباتی این الگوریتم وقت گیر است، ضرورت برنامه نویسی برای حل این فرایند اجتناب ناپذیر است. در صورتی که در کنار آزمایش ساده نفوذ بیرکن روش محاسباتی ساده‌ای نیز برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی باشد که نیازی به نوشتن برنامه برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی نداشته باشد و نتایج آن نیز در مقایسه با الگوریتم BESTslope قابل قبول باشد،

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

## مدیریت آب و آبیاری

### 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 معادله نفوذ تجمعی در مرحله گذرا در قالب معادله (۴b) ارائه شد.

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

$$(4b)$$

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

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

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

در این رابطه، تغییرات مقدار k از ۵ تا  $N_{tot}$  است (۹).  
 $I_{est}(t_i)$  نفوذ تجمعی تخمین زده شده در  $t_i$ ،  $i_s^{exp}$  شیب خط برازش شده بر نقاط انتهایی در مرحله پایدار مطابق رابطه (۱e) و k تعداد داده‌ها از مجموع کل داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن در هر اجراست؛ برای مثال، وقتی  $k=7$ ، یعنی هفت داده اول آزمایش نفوذ بیرکن برای برازش بر رابطه (۴b) انتخاب شده است. مقدار خطای نسبی برازش ( $Er$ ) نیز مطابق رابطه (۶) در هر مقدار k محاسبه می‌شود (۹).

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

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 ( $\bar{Er}$ ) نیز مورد قبول است (۲). در صورتی که خطای نسبی از ۱۰ درصد بیشتر نباشد، تخمین دقیق و اگر خطا از ۵ درصد

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

در این روابط، t مدت زمان سپری شده 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 مرحله پایدار است که برای رگرسیون خطی انتخاب می‌شود. در این تحقیق مقدار  $N_{end}$  برابر با ۳ است.

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

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

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

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

در این روابط، r شعاع حلقه (L) و  $K_0$  هدایت هیدرولیکی در رطوبت اولیه 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  $\gamma = 0.75$  و  $\beta = 0.60$  (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 صرف نظر می‌شود. بنابراین، روابط تقریبی (۳a) و (۳b) برای استخراج پارامترهای B و C به دست می‌آید (۳).

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

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

در این روابط، مقدار پارامترهای B و C به ترتیب برابر با ۰/۴۶۷ و ۰/۶۳۹ است (۳).

(۱۰) رابطه (۱۲) به دست می‌آید (۱۴).

$$\varnothing_m = \frac{K_s}{\alpha} \quad (11)$$

$$K_s = \frac{i_s^{exp}}{1 + \frac{\alpha}{\pi}} \quad (12)$$

رابطه (۱۱) شکل دیگر رابطه (۱۰) است. بر اساس رابطه (۱۲) با تعیین  $i_s^{exp}$  و در نظر گرفتن پارامتر  $\alpha$  در بافت خاک مورد نظر مقدار  $K_s$  به سادگی محاسبه می‌شود. رابطه بین  $S$  و  $\Phi$  نیز با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود (۱).

$$S = [\gamma_\omega (\theta_s - \theta_0) \varnothing_m]^{1/2} \quad (13)$$

ر این رابطه،  $\gamma_\omega$  پارامتر جبهه خیس شدگی و برابر با  $1/818$  در نظر گرفته می‌شود (۱). با ترکیب رابطه (۱۱) و (۱۳)، رابطه (۱۴) برای محاسبه پارامتر هیدرولیکی  $S$  به دست می‌آید.

$$S = [\gamma_\omega (\theta_s - \theta_0) \frac{K_s}{\alpha}]^{1/2} \quad (14)$$

در این تحقیق، مجموع روابط (۱۲) و (۱۴) روش محاسباتی ساده‌ای در آزمایش بیرکن است و با علامت اختصاری BS<sub>m</sub> در محاسبه  $K_s$  و  $S$  استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا مقدار  $K_s$  با رابطه (۱۲)، سپس مقدار  $S$  با رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود و نیازی به فرایند محاسباتی مربوط به محاسبه  $S$ ،  $Er$  و  $t_{max}$  در الگوریتم BESTslope نیست. همچنین، برخلاف BESTslope تمامی مقادیر  $K_s$  در روش BS<sub>m</sub> مثبت است. در این تحقیق، ضمن مقایسه نتایج روش‌های BESTslope و BS<sub>m</sub> در محاسبه پارامترهای هیدرولیکی، روشی نیز برای محاسبه مقدار  $\alpha$  در بافت لومی و لوم ماسه‌ای ارائه شده است.

پژوهش حاضر در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زابل به مساحت ۱۰۰ هکتار در عرض جغرافیایی  $30^{\circ}54'53''$  شمالی و طول جغرافیایی  $61^{\circ}31'18''$  شرقی انجام شد. آزمایش نفوذ بیرکن در ۱۱۳ نقطه مشخص به فاصله

بیشتر نباشد، تخمین خیلی دقیق در نظر گرفته می‌شود (۳). پس از محاسبه  $S$ ، مقدار  $K_s$  از رابطه (۴a) تخمین زده می‌شود. مقدار  $t_{max}$  (مدت زمان نفوذ در مرحله گذرا) نیز با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید (۹).

$$t_{max} = \frac{1}{\alpha(1-B)} \left( \frac{S}{K_s} \right)^2 \quad (7)$$

برای هر مقدار  $k$  مقادیر متناظر  $t_k$  (زمان سپری شده از آزمایش نفوذ)،  $S$ ،  $K_s$ ،  $t_{max}$  و  $Er$  در جدولی به دست می‌آید. در نهایت، مقادیر  $S$  و  $K_s$  متناظر با حداکثر مقدار  $t_{max}$  که  $t_k \leq t_{max}$  باشد، نتایج اولیه این الگوریتم معرفی می‌شود.

## روش BS<sub>m</sub>

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

$$K_s = i_s^{exp} - \frac{\alpha \varnothing_m}{\pi} \quad (8)$$

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

$$\varnothing_m = \int_{h_i} K(h) dh \quad (9)$$

در این رابطه  $h_i$  پتانسیل فشاری خاک تعریف شده در بازه  $-\infty < h_i < 0$ ، هدایت هیدرولیکی غیراشباع و در واقع پارامتر  $\Phi_m$  برابر با مساحت سطح زیرمنحنی  $K(h)$  در مقابل  $h$  در بازه  $-\infty < h_i < 0$  است. با تقسیم هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) بر پتانسیل فلاکس ماتریک ( $\Phi_m$ ) پارامتری به نام  $\alpha$  ( $L^{-1}$ ) معرفی می‌شود (۱۲).

$$\alpha = \frac{K_s}{\varnothing_m} \quad (10)$$

مقدار پارامتر  $\alpha$  در بافت‌های ماسه‌ای، لومی و رسی به ترتیب برابر با  $0/036$ ،  $0/012$  و  $0/004$  بر میلی‌متر تخمین زده شده است (۱۲، ۱۳). با ترکیب روابط (۸) و

## مدیریت آب و آبیاری

$$K_{SBSm} = a + b * K_{SBESTslope} \quad (15)$$

$$S_{BSm} = c + d * S_{SBESTslope} \quad (16)$$

در این روابط، پارامترهای  $K_{SBSm}$  و  $S_{BSm}$  تابع مقدار  $\alpha$  است. با تغییر مقدار  $\alpha$  مقدار  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  نیز تغییر می‌کند. در این تحقیق برای بررسی میزان انطباق رابطه خطی (15) و (16) برخط 1:1 ( $y=x$ )، از ضریب تعیین وزنی  $(\omega r^2)^1$  استفاده شد که در آن  $r^2$  ضریب تعیین در رابطه خطی بین دو روش است (8).

$$\omega r^2 \begin{cases} |b| \cdot r^2 & \text{for } b \leq 1 \\ |b|^{-1} \cdot r^2 & \text{for } b > 1 \end{cases} \quad (17)$$

در این رابطه، هرچه مقدار  $\omega r^2$  به عدد 1 نزدیک‌تر باشد، انطباق با خط 1:1 بهتر است. مقدار  $\alpha$  نیز پارامتری ثابت برای هر دو بافت مورد نظر بر اساس حداقل اختلاف بین مقدار  $\omega r^2$  در پارامترهای  $K_s$  و  $S$  و نزدیک به صفر بودن مقادیر  $a$  و  $c$  به دست آمده است. با یک بار تعیین مقدار  $\alpha$ ، مقادیر  $K_s$  و  $S$  نیز به راحتی از طریق روابط (12) و (14) محاسبه می‌شود.

برای مقایسه مقدار  $K_s$  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  $K_s$  بر مقدار حداقل  $K_s$  بین  $BESTslope$  و روش  $BSm$  به دست می‌آید (1). اگر مقدار این فاکتور کمتر از 3 باشد، اختلاف (خطای) بین دو روش قابل قبول است (4). برای مقایسه درصد اختلاف مقادیر تخمین زده شده  $S$  به روش  $BSm$  با مقادیر  $S$  تخمین زده شده با مدل  $BESTslope$  علاوه بر پارامتر  $\omega r^2$  از پارامتر  $Pd_s^3$  (درصد نسبی اختلاف) طبق تعریف رابطه (18) استفاده شده است.

تقریبی 80 متر انجام شد. برای انجام آزمایش نفوذ بیرکن از حلقه‌ای فلزی به قطر 150 میلی‌متر استفاده شد که به اندازه 1 سانتی‌متر درون زمین فرو برده شده بود. سطح خاک قبل از انجام آزمایش از بقایای ریشه و برگ گیاهان پاک شد. 150 میلی‌لیتر آب به آرامی و به گونه‌ای روی سطح خاک ریخته شد که ساختمان سطح خاک درون حلقه به هم نخورد. 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 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 نمونه دست‌نخورده برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه ( $\theta_0$ ) و وزن مخصوص ظاهری خاک ( $\rho_b$ ) و نمونه‌ای برای تعیین بافت خاک از هر نقطه مشخص تهیه شد. در این پژوهش، رطوبت اشباع خاک ( $\theta_s$ ) برابر با تخلخل خاک (ε) (10، 11، 16) و وزن مخصوص حقیقی خاک ( $\rho_s$ ) در تمامی آزمایش‌ها برابر با 2/65 گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است (1، 2). 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 (6).

### معیارهای ارزیابی

اگر رابطه  $K_s$  در الگوریتم  $BESTslope$  با  $K_s$  در روش  $BSm$  به صورت خطی فرض شود، پارامترهای  $a$  و  $b$  به ترتیب عرض از مبدأ و شیب معادله 15 است. همچنین، اگر رابطه  $S$  در الگوریتم  $BESTslope$  و روش  $BSm$  مطابق معادله (16) و به صورت خطی تعریف شود، پارامترهای  $c$  و  $d$  نیز به ترتیب عرض از مبدأ و شیب این رابطه است.

1. weighting  $r^2$
2. factor of difference
3. relative difference percentage

## مدیریت آب و آبیاری

تک تک آن‌ها مقدار Er محاسبه شده کمتر از ۵/۵ درصد باشد (Nselected = ۳۱). حالت دوم، انتخاب ۵۹ آزمایش (Nselected = ۵۹) است با مقدار متوسط خطای نسبی برازش ( $\bar{Er}$ ) 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 مزرعه آزمایشی لومی و لوم ماسه‌ای است. جدول ۲ نیز نشان می‌دهد که رطوبت نسبی و اولیه 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 محدوده مطالعاتی وجود دارد.

$$Pd_s = \left( \frac{S - \hat{S}}{\hat{S}} \right) * 100 \quad (18)$$

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

در این پژوهش فرایندهای محاسباتی مورد نیاز و مربوط به الگوریتم BESTslope در محیط نرم‌افزاری PTC Mathcad Prime 3.1 Math (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 انجام شده در دوازده آزمایش مقدار Ks در الگوریتم BESTslope منفی به دست آمده بود، در نهایت ۱۰۱ آزمایش آزمایشی موفق یا آزمایش‌هایی در نظر گرفته شد که امکان مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج به دست آمده از روش BSm وجود دارد. مقایسه نتایج دو روش BESTslope و BSm در سه حالت انجام شد. حالت اول، انتخاب آزمایش‌هایی است که در

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

بافت خاک (USDA class)	آماره 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

جدول ۲. آماره‌های توصیفی وزن مخصوص ظاهری ( $\rho_b$ )، رطوبت اولیه ( $\theta_0$ )، تخلخل ( $\varepsilon$ ) و

رطوبت نسبی اولیه (Se) ( $N_{selected} = 101$ )

Se ( $cm^3/cm^3$ )	$\dagger\varepsilon$ ( $cm^3/cm^3$ )	$\theta_0$ ( $cm^3/cm^3$ )	$\rho_b$ ( $gr/cm^3$ )	آماره توصیفی	بافت خاک (USDA class)
۰/۱۴۱	۰/۳۵۱	۰/۰۸۰	۱/۱۴۰	حداقل	
۰/۲۶۰	۰/۵۷۰	۰/۱۲۰	۱/۷۲۰	حداکثر	
۰/۲۲۳	۰/۴۶۵	۰/۱۰۳	۱/۴۱۸	متوسط حسابی	لوم و لوم ماسه‌ای
۰/۲۲۶	۰/۴۶۴	۰/۱۰۰	۱/۴۲۰	میانه	
۹/۵۲۲	۸/۱۹۰	۷/۸۹۹	۷/۱۲۰	درصد ضریب تغییرات	

† در این تحقیق درصد رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) با تخلخل خاک ( $\varepsilon$ ) مساوی فرض شده است.

منتخب با مقدار متوسط خطای نسبی برازش ( $\overline{ET}$ ) کمتر از ۱۰ درصد بررسی شد (جدول ۳ و شکل ۱).  $b_s^{exp}$  عرض از مبدأ خط برازش شده بر سه نقطه انتهایی (داده انتهایی) در مرحله پایدار است. در تمامی آزمایش‌ها منتخب در هر دو بافت خاک بازه تغییرات مقادیر  $b_s^{exp}$  بین ۱۲ تا ۳۷ میلی‌متر بود که به یکدیگر نزدیک است. بازه 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  $b_s^{exp}$  و  $i_s^{exp}$  در هر دو بافت خاک تقریباً مساوی بود و درصد ضریب تغییرات آن‌ها نیز در هر دو بافت اختلاف زیادی با یکدیگر ندارد.

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 محاسبه مقدار بهینه پارامتر  $\alpha$  و آماره‌های توصیفی خصوصیات فیزیکی خاک مورد آزمایش، مقدار بهینه پارامتر  $\alpha$  در هر دو بافت مذکور و در حالت‌های سه‌گانه تعیین شده است.

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

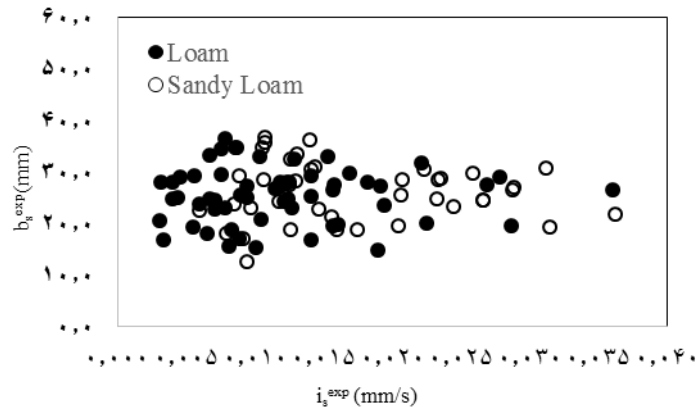
با توجه به اینکه روش BSm بر اساس داده‌های نفوذ در مرحله پایدار است، بازه تغییرات شیب ( $i_s^{exp}$ ) و عرض از مبدأ ( $b_s^{exp}$ ) منحنی نفوذ در مرحله پایدار در ۱۰۱ آزمایش

جدول ۳. آماره‌های توصیفی شیب ( $i_s^{exp}$ ) و عرض از مبدأ ( $b_s^{exp}$ ) معادله خط نفوذ ( $N_{selected} = 101$ )

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

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵



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

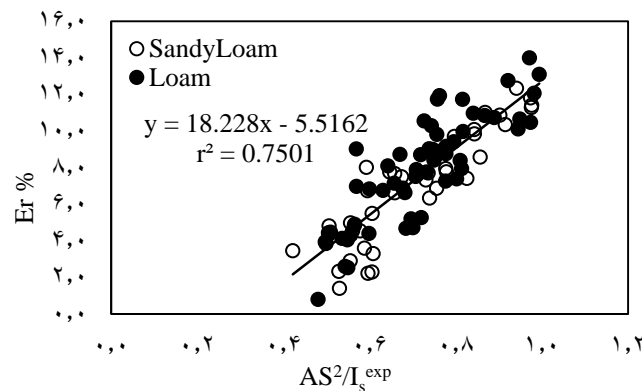
تغییرات  $A.S^2/I_s^{exp}$  در الگوریتم BESTslope بین ۰/۴ تا ۱/۰ است (شکل ۲). مطابق جدول ۴، مقدار متوسط خطای نسبی ( $\overline{Er}$ ) و درصد ضریب تغییرات در الگوریتم BESTslope به ترتیب ۷/۴۷۸ و ۱۹/۹۹۹ است.

### 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 ( $r^2=0.75$ ) افزایش یافته است، ولی در ۱۰۱ آزمایش منتخب با  $\overline{Er}$  کمتر از ۱۰ درصد بازه

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

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



شکل ۲. تغییرات پارامتر  $AS^2/I_s^{exp}$  در برابر Er

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵



### محاسبه پارامترهای هیدرولیکی در ۳۱ آزمایش

#### منتخب

از مجموع ۱۱۳ آزمایش بیرکن در ۳۱ آزمایش مقدار متوسط و حداکثر  $E_r$  به ترتیب  $3/8$  و  $5/5$  درصد است. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، ملاک تعیین مقدار مناسب (بهینه) پارامتر  $\alpha$  در خاک مورد نظر حداقل شدن اختلاف مقدار ضریب تعیین وزنی ( $\omega r^2$ ) بین  $S$  و  $K_s$  است. نتایج به‌دست آمده از مقادیر مختلف  $\alpha$  در جدول ۵ و شکل ۳ نشان می‌دهد که در مقدار  $\alpha = 0/012$  مقادیر  $a$  و  $c$  تقریباً نزدیک به صفر و به ترتیب برابر با  $-0/0002$  و  $0/0679$  است. مقدار  $b$  و  $d$  نیز نزدیک به عدد ۱ و به ترتیب برابر با  $1/0148$  و  $0/9335$  است. مقدار پارامتر  $\omega r^2$  در  $S$  و  $K_s$  به ترتیب برابر با  $0/860$  و  $0/9054$  است که به یکدیگر بسیار نزدیک و اختلاف مقدار آن‌ها ( $\Delta \omega r^2$ ) در  $\alpha = 0/012$  به حداقل مقدار رسیده و برابر با مقدار اندک  $0/0448$  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  $\alpha$  در هر دو بافت در نظر گرفته شده است. شکل ۴ الف و ب نیز رابطه  $S$  و  $K_s$  را بین دو

الگوریتم BESTslope و BSm در  $\alpha = 0/012$  نشان می‌دهد. جداول ۶ و ۷ نیز آماره‌های توصیفی  $K_s$  و  $S$  را در ۳۱ آزمایش منتخب و  $\alpha = 0/012$  نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جداول در  $\alpha = 0/012$  مقادیر متوسط  $K_s$  با یکدیگر برابر و مقادیر متوسط  $S$  نیز اختلاف اندکی با یکدیگر دارد. همچنین، نزدیکی مقدار درصد تغییرات در  $\alpha = 0/012$  نیز نزدیکی بازه تغییرات  $K_s$  و  $S$  را در هر دو روش نشان می‌دهد. در ۳۱ آزمایش منتخب مقدار حداقل حداکثر  $f_D$  نیز همان‌گونه که مطلوب و مورد نظر است در  $\alpha = 0/012$  کمتر از ۳ و به ترتیب برابر با  $1/006$  و  $1/480$  است. مقدار  $Pds$  نیز در  $\alpha = 0/012$  از  $17/377$  تا  $7/979$  متغیر است که در مجموع اختلاف اندکی را بین BESTslope و BSm در محاسبه  $S$  نشان می‌دهد. با جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده، مقدار  $\alpha$  در این حالت در خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای برابر با  $0/012$  محاسبه شده است که برابر با مقدار  $\alpha$  به‌دست آمده در تحقیقات گذشته است (۴).

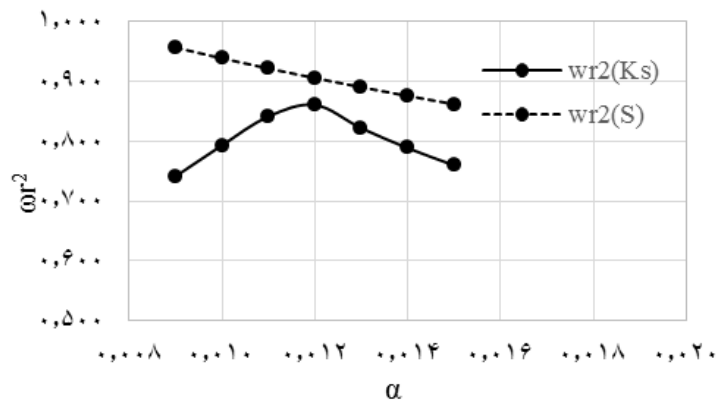
جدول ۵. تغییر پارامترهای رگرسیون در برابر تغییر مقدار  $\alpha$  (Nselected = ۳۱)

$\Delta \omega r^2$	$\omega r^2(S)$	$r^2$	d	C	$\omega r^2(K_s)$	$r^2$	b	a	$\alpha$
0/2148	0/9562	0/9699	0/9859	0/0718	0/7414	0/8733	0/8490	0/0002-	0/009
0/1452	0/9384	0/9699	0/9675	0/0704	0/7932	0/8733	0/9083	0/0002-	0/010
0/0800	0/914	0/9699	0/9500	0/0691	0/8414	0/8733	0/9635	0/0002-	0/011
0/0448	0/9054	0/9699	0/9335	0/0679	0/8606	0/8733	1/0148	0/0002-	0/012
0/0684	0/8902	0/9699	0/9178	0/0668	0/8218	0/8733	1/0627	0/0002-	0/013
0/0871	0/8756	0/9699	0/9028	0/0675	0/7885	0/8733	1/1075	0/0002-	0/014
0/1021	0/8619	0/9699	0/8886	0/0647	0/7597	0/8733	1/1495	0/0002-	0/015

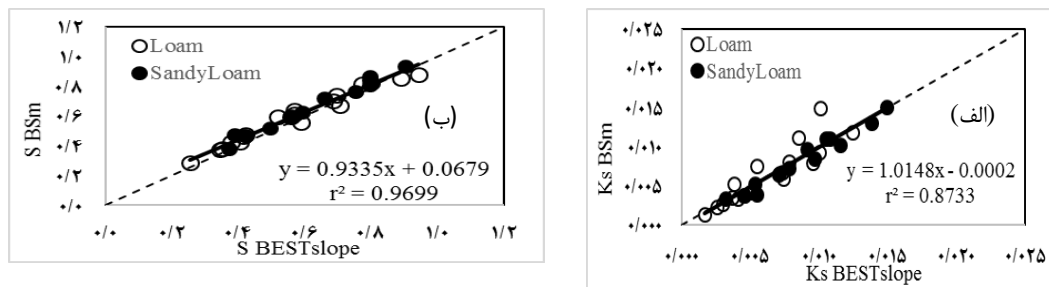
$\alpha$ : انتخاب شده در خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵



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



شکل ۴. مقایسه الگوریتم‌های BSm و BESTslope در تخمین الف)  $K_s$  ( $\text{mm s}^{-1}$ ) و ب)  $S$  ( $\text{mm s}^{0.5}$ ) (Nselected = ۳۱)

جدول ۶. آماره‌های توصیفی پارامتر  $K_s$  در سه حالت

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

جدول ۷. آماره‌های توصیفی پارامتر S در سه حالت

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

برای Ks و S به ترتیب ۰/۷۲۷ و ۰/۸۲۴ است که اختلاف مقدار آنها ( $\Delta\omega r^2$ ) در  $\alpha = 0/014$  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  $\omega r^2$  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  $\alpha$  به دست آمده برای بافت لوم و لوم ماسه‌ای ( $\alpha = 0/014$ ) اختلاف اندکی با حالت قبل ( $0/012$ ) دارد.

### محاسبه پارامترهای هیدرولیکی 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 محاسبه مقدار بهینه پارامتر  $\alpha$  انتخاب شد. جدول ۸ و شکل ۵ نشان می‌دهد که از مجموع مقادیر مختلف پارامتر  $\alpha$ ، در مقدار  $\alpha = 0/014$  مقادیر a و c تقریباً نزدیک به صفر و به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱۵ و ۰/۰۴۷۵ است. مقدار b و d نیز نزدیک به ۱ و به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸ و ۰/۸۸۵ است. مقدار پارامتر  $\omega r^2$

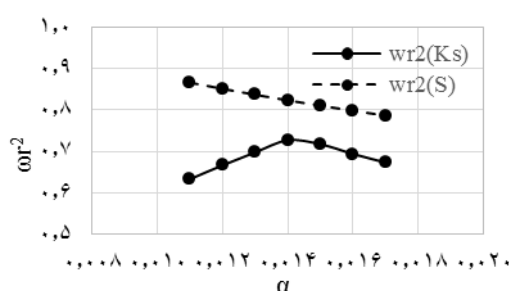
جدول ۸. تغییر پارامترهای رگرسیون در برابر تغییر مقدار  $\alpha$  (Nselected = ۵۹)

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

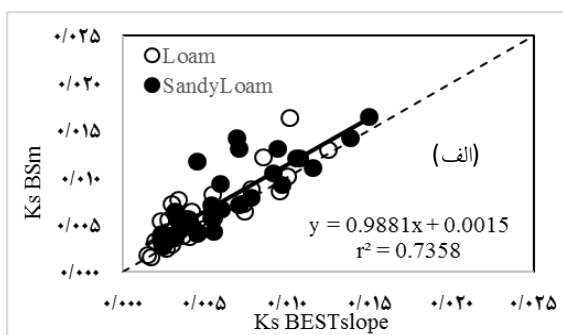
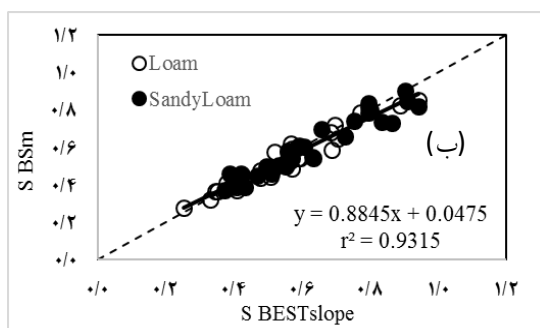
†:  $\alpha$  انتخاب شده برای خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای

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 محاسبه S نشان می‌دهد. در مجموع، بر اساس نتایج به‌دست آمده از ۵۹ آزمایش منتخب، مقدار بهینه  $\alpha$  در خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای برابر با ۰/۰۱۴ تعیین شد که به مقدار  $\alpha$  محاسبه شده در حالت قبل (۳۱ آزمایش) نزدیک است.

شکل ۶ (الف و ب) رابطه Ks و S را بین دو الگوریتم BESTslope و BSm در  $\alpha=0/014$  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 BESTslope و BSm در  $\alpha=0/014$  با یکدیگر اختلاف اندکی دارد. حداقل و حداکثر مقدار  $f_D$  نیز به ترتیب برابر است با ۱/۰۰۶ و ۲/۶۰ که در تمام



شکل ۵. تغییر مقدار  $wr^2(Ks)$  و  $wr^2(S)$  در برابر تغییر  $\alpha$  (Nselected = ۵۹)



شکل ۶. مقایسه الگوریتم‌های BESTslope و BSm در تخمین (الف)  $K_s$  ( $\text{mm s}^{-1}$ ) و (ب)  $S$  ( $\text{mm s}^{0.5}$ ) (Nselected = ۵۹)

و نسبت به دو حالت قبل متوسط خطای نسبی برآزش بیشتر است. نتایج به‌دست آمده در جدول ۹ و شکل ۷ نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر پارامتر  $wr^2$  برای Ks و S در  $(\Delta wr^2)$  در  $\alpha=0/020$  به حداقل مقدار رسیده و برابر با ۰/۰۸۱۴ است. در این حالت مقادیر  $wr^2$  برای Ks و S

### محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای ۱۰۱ آزمایش منتخب

در حالت سوم، همه ۱۰۱ آزمایش منتخب از مجموع ۱۱۳ آزمایش بیرکن برای محاسبه مقدار بهینه پارامتر  $\alpha$  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

### مدیریت آب و آبیاری

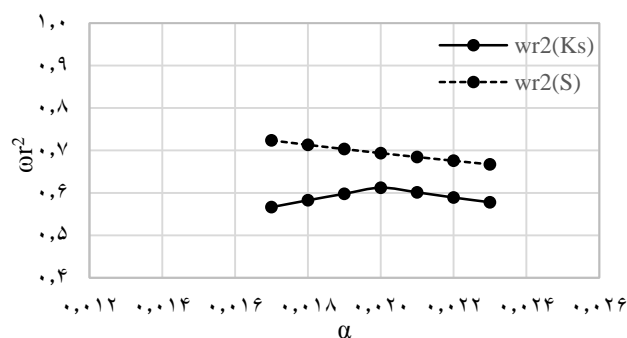
متوسط  $K_s$  و  $S$  در هر دو روش  $BESTslope$  و  $BSm$  نسبت به دو حالت قبل با یکدیگر اختلاف بیشتری دارد. حداقل و حداکثر مقدار  $f_D$  نیز در ۸۰ درصد آزمایش‌های منتخب کمتر از ۳ و نسبت به دو حالت قبل مقداری افزایش داشته است. مقدار  $Pds$  نیز از  $-۲۹/۶۶۹$  تا  $+۷/۹۷۹$  متغیر است. در مجموع، مانند 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 ( $N_{selected} = 101$ )، مقدار  $\alpha$  در خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای برابر با  $0/020$  محاسبه شد که با مقدار  $\alpha$  به‌دست آمده در تحقیقات گذشته برای خاک‌های مشابه (۴)  $0/006$  اختلاف دارد که اختلاف قابل توجهی است.

به ترتیب برابر با  $0/612$  و  $0/694$  است. همچنین، مقادیر  $a$  و  $c$  تقریباً نزدیک به صفر و به ترتیب برابر با  $0/036$  و  $0/0228$  است. مقدار  $b$  نیز نزدیک به عدد ۱ و برابر با  $0/998$  و مقدار  $d$  با مقداری اختلاف نسبت به عدد ۱ برابر با  $0/788$  است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد و تا حدودی قابل پیش‌بینی نیز بوده است، با افزایش متوسط خطای نسبی در این حالت مقدار  $wr^2$  برای هر دو پارامتر  $K_s$  و  $S$  نسبت به دو حالت قبل (۳۱ و ۵۹ آزمایش) کمتر است و با عدد ۱ فاصله قابل توجهی دارد. مقدار  $\alpha$  نیز برای بافت لوم و لوم ماسه‌ای نسبت به دو حالت قبل اختلاف قابل توجهی دارد. شکل ۸ (الف و ب) رابطه  $K_s$  و  $S$  را بین الگوریتم‌های  $BESTslope$  و  $BSm$  در  $\alpha = 0/020$  نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جداول ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر

جدول ۹. تغییر پارامترهای رگرسیون در برابر تغییر مقدار  $\alpha$  ( $N_{selected} = 101$ )

$\Delta wr^2$	$wr^2(S)$	$r^2$	d	C	$wr^2(K_s)$	$r^2$	b	A	$\alpha$
0/1573	0/7237	0/8805	0/8219	0/0301	0/5664	0/6135	0/9232	0/033	0/017
0/1306	0/7132	0/8805	0/8100	0/0297	0/5826	0/6135	0/9496	0/034	0/018
0/1054	0/7033	0/8805	0/7987	0/0292	0/5979	0/6135	0/9745	0/035	0/019
0/0814	0/6937	0/8805	0/7878	0/0288	0/6123	0/6135	0/9980	0/036	0/020
0/0832	0/6845	0/8805	0/7774	0/0285	0/6013	0/6135	1/0203	0/036	0/021
0/0866	0/6775	0/8805	0/7674	0/0285	0/5891	0/6135	1/0415	0/037	0/022
0/0893	0/6672	0/8805	0/7577	0/0277	0/5779	0/6135	1/0616	0/037	0/023

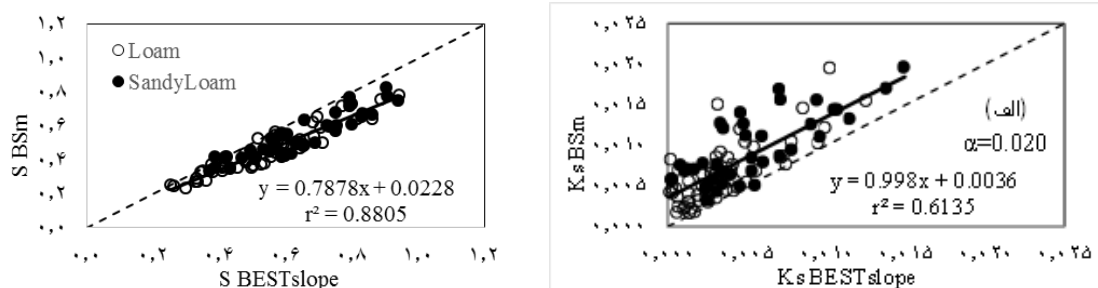
†  $\alpha$  انتخاب شده برای خاک‌های لوم و لوم ماسه‌ای



شکل ۷. تغییر مقدار  $wr^2(S)$  و  $wr^2(K_s)$  در برابر تغییر  $\alpha$  ( $N_{selected} = 101$ )

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵



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

### نتیجه‌گیری

BSm انتخاب شد، در حالات ۱ و ۲ به یکدیگر بسیار نزدیک بود ولی با حالت ۳ اختلاف قابل توجهی داشت. بنابراین، با توجه به اینکه افزایش متوسط خطای نسبی برازش به بیش از ۵/۵ درصد (حالت سوم) اختلاف معناداری را در محاسبه مقدار  $\alpha$  با دو حالت دیگر و با مقدار به دست آمده در تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، مقدار بهینه  $\alpha$  در خاک‌های لومی و لوم ماسه‌ای برابر با متوسط مقادیر  $\alpha$  به دست آمده از حالات ۱ و ۲ و برابر با ۰/۱۳ پیشنهاد شد. این پژوهش نشان داد با تعیین مقدار  $\alpha$  در خاک‌های لومی و لوم ماسه‌ای، محاسبه مقدار پارامترهای هیدرولیکی  $K_s$  و  $S$  بر اساس آزمایش نفوذ بیرکن و روش ساده محاسباتی ارائه شده (روش BSm) به سادگی امکان پذیر است. در تحقیقات آینده، انجام آزمایش‌های بیشتر بیرکن در بافت‌های مختلف خاک از جمله بافت‌های لوم و لوم ماسه‌ای به منظور تعیین دقیق‌تر مقادیر  $\alpha$  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 Processes. 28: 1095-1103

این پژوهش به منظور مقایسه الگوریتم اصلی آزمایش نفوذ بیرکن (BESTslope) با الگوریتم ساده شده BSm در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک ( $K_s$  و  $S$ ) و انتخاب مقدار بهینه پارامتر  $\alpha$  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 تک تک نقاط کمتر از ۵/۵ درصد بود (حالت ۱) مقایسه شد. نتایج نشان داد که آماره‌های توصیفی  $K_s$  برای حالات ۱ و ۲ به یکدیگر نزدیک است و با نتایج حالت ۳ که خطای متوسط نسبی افزایش یافته است به نسبت اختلاف زیادی دارد، ولی آماره‌های توصیفی پارامتر  $S$  در مجموع برای هر دو روش BESTslope و BSm در هر سه حالت اختلاف قابل توجهی نشان نداد. مقدار بهینه پارامتر  $\alpha$  که بر اساس حداقل اختلاف بین مقدار ضریب تعیین وزنی ( $wr^2$ ) تخمین  $K_s$  و  $S$  با دو الگوریتم BESTslope و

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) Poned 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.