

## تحلیل حساسیت معادلات نفوذ آب به خاک و ضرایب آنها نسبت به رطوبت اولیه و بار آبی

علی جوادی<sup>\*۱</sup> - محمود مشعل<sup>۲</sup> - حامد ابراهیمیان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۷

## چکیده

نفوذ آب به خاک فرایند پیچیده‌ای است که با تغییر عواملی مانند رطوبت اولیه خاک و بار آبی روی خاک تغییر می‌یابد. هدف اصلی این تحقیق برآورد ضرایب معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوییز، فیلیپ و هورتون و ارزیابی حساسیت این معادلات و ضرایب آنها نسبت به رطوبت اولیه خاک و بار آبی روی سطح خاک بود. بدین منظور نفوذ یک بعدی و دو بعدی با تغییر در رطوبت اولیه خاک و بار آبی سطح خاک از یک آبیاری دیگر با استفاده از حل معادله ریچاردز (مدل HYDRUS) شبیه‌سازی شد. خروجی مدل HYDRUS (نفوذ تجمعی نسبت به زمان) با استفاده از ابزار Solver نرم‌افزار اکسل برای تعیین ضرایب معادلات نفوذ مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج ارزیابی حساسیت معادلات نفوذ و ضرایب آنها در حالت شبیه‌سازی یک بعدی و دو بعدی نفوذ نشان داد که حساسیت معادلات نفوذ و ضرایب آنها دارای عملکرد مشابه بودند ولی از لحاظ کمی در اکثر موارد حساسیت معادلات و ضرایب آنها در حالت دو بعدی بیشتر از یک بعدی بود. در هر دو بعد ضرایب جذبی خاک از معادله فیلیپ به عنوان حساس‌ترین ضریب و معادله هورتون نیز به عنوان حساس‌ترین معادله نسبت به رطوبت اولیه و بار آبی مختلف شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: مدل HYDRUS، معادله ریچاردز، معادله فیلیپ، معادله کوستیاکوف-لوییز، معادله هورتون

## مقدمه

مطالعات آب و خاک برخوردار خواهد بود. هولزافل و همکاران (۸) به بررسی نفوذ در آبیاری جویچه‌ای پرداختند. نتایج آنها نشان داد که نفوذ آب در جویچه تحت عواملی چون شکل جویچه، اندازه جویچه و سطح تماس آب با خاک قرار می‌گیرد. رضایی‌پور و همکاران (۵) به آنالیز حساسیت ضریب جذب آب معادله فیلیپ نسبت به تغییرات دبی ورودی، سطح مقطع و درصد تغییرات ضرایب نفوذ پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در روش‌های یک نقطه‌ای شپارد و ویو اصلاح شده دبی ورودی و در روش راولز هدایت هیدرولیکی بیشترین تأثیر را روی ضریب جذب آب داشتند. ترنر (۱۶) به بررسی حساسیت ضرایب معادلات مختلف نفوذ نسبت به تغییرات شدت نفوذ پرداخت؛ نتایج نشان داد که ضریب سرعت نهایی نفوذ از معادله هورتون و ضریب جذب آب معادله فیلیپ حساسیت بالایی نسبت به سایر ضرایب این معادلات نسبت به تغییرات شدت نفوذ داشتند. دربندی و همکاران (۴) به بررسی میزان حساسیت ضرایب معادله‌های نفوذ کوستیاکوف، فیلیپ، هورتون، کوستیاکوف اصلاح شده و سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) نسبت به رطوبت اولیه خاک پرداختند. آن‌ها آزمایشات نفوذسنجی را با استفاده از استوانه‌های مضاعف در ۹ رطوبت اولیه مختلف خاک انجام دادند و نشان دادند که ضریب  $a_2$  معادله کوستیاکوف ( $Z = a_1 t^a$ ) و  $b$  کوستیاکوف-لوییز و ضریب  $S$  معادله فیلیپ حساسیت کمتر و ضرایب  $f_0$  مدل کوستیاکوف-لوییز و  $k$  معادله

مهم‌ترین مشخصه خاک از نظر کشاورزی نفوذ می‌باشد و وارد شدن آب به داخل خاک را نفوذ می‌گویند. نفوذ در آبیاری‌های کرتی و نوری به صورت یک بعدی (حرکت عمودی آب) و در آبیاری شیاری به صورت دو بعدی (حرکت قائم و جانبی آب) اتفاق می‌افتد. نفوذ با تغییر عواملی چون بافت، رطوبت اولیه خاک، مقدار جریان ورودی به مزرعه (بار آبی روی خاک) و عملیات زراعی تغییر می‌یابد. در بین این عوامل، رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک دارای تغییرات زیادی در طول فصل زراعی می‌باشند (۶). در نتیجه اندازه‌گیری نفوذ پذیری خاک در یک وضعیت خاص رطوبتی و بار آبی معتبر می‌باشد. مشکلات اندازه‌گیری نفوذ (پرهزینه و وقت‌گیر بودن آن) و همچنین تغییرپذیری نفوذ با تغییر رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک، شناسایی معادله نفوذی که دارای کمترین حساسیت نسبت به تغییرات رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک باشد از اهمیت خاصی در

۱- دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

\*- نویسنده مسئول: (Email: ali.javadi@ag.iut.ac.ir)

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

مدل HYDRUS (نفوذ تجمعی نسبت به زمان) و ابزار Solver نرم-افزار اکسل برای تعیین ضرایب معادلات کوستیاکوف-لوییز (۱۱)، فیلیپ (۱۲) و هورتون (۹) استفاده شد. سپس ارزیابی حساسیت معادلات و ضرایب کوستیاکوف-لوییز، فیلیپ و هورتون نسبت به رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک در برآورد نفوذ تجمعی انجام گردید.

### مدل HYDRUS

مدل HYDRUS به طور قابل توجهی برای مدل سازی جریان آب، در مناطق اشباع و غیراشباع مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا، در دانشگاه کالیفرنیا طراحی شده است. در این تحقیق برای مدل سازی یک بعدی فرآیند نفوذ از مدل HYDRUS-1D نسخه ۴/۱۵ (۱۴) و برای مدل سازی دو بعدی فرآیند نفوذ مدل HYDRUS (2D/3D) نسخه ۱/۱۱ (۱۳) استفاده گردید. پنج بافت خاک برای شبیه سازی نفوذ در نظر گرفته شد. پارامترهای هیدرولیکی هر بافت خاک براساس پایگاه داده مدل HYDRUS برای شبیه سازی نفوذ انتخاب گردید (جدول ۲). مدل هیدرولیکی برای شبیه سازی، مدل ون گنوختن-معلم بدون در نظر گرفتن پدیده پسماند بود. مدل ون گنوختن-معلم به صورت معادلات ۱ و ۲ که در آن  $h$  بار فشار آب در خاک (cm)،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع (min/cm)،  $\theta_s$  رطوبت اشباع (بی بعد)،  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده (بی بعد)،  $\alpha$  (1/cm)،  $n$  (بی بعد) و  $l$  (بی بعد) ضرایب مربوط به توابع هیدرولیکی خاک بودند، تعریف گردید (۱۳).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (1)$$

هورتون حساسیت بیشتری به تغییرات رطوبت اولیه خاک داشتند. نهایتاً معادله فیلیپ کمترین حساسیت و مدل کوستیاکوف اصلاح شده بیشترین حساسیت را به تغییرات رطوبت اولیه خاک داشتند. سپهوند و همکاران (۶) به ارزیابی حساسیت معادله های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک پرداختند. نتایج نمایانگر آن بود که در مجموع معادله کوستیاکوف دقیق ترین برآوردها و معادله سازمان حفاظت خاک آمریکا ضعیف ترین برآوردها را ارائه نمود. تحقیقات انجام یافته در مورد شبیه سازی حرکت آب در خاک با استفاده از HYDRUS نشان داده است که HYDRUS توانایی بالایی در شبیه سازی حرکت آب در خاک دارد (۷، ۱۰ و ۱۵).

مطالعه تحقیقات ارائه شده نشان دهنده کاستی هایی از جمله: تعداد کم حالت های بررسی حساسیت معادلات و ضرایب آنها (نسبت به بافت، رطوبت و بار آبی)، عدم بررسی هم زمان حساسیت معادلات و ضرایب آنها نسبت به رطوبت و بار آبی در طی آبیاری های مختلف و عدم بررسی حساسیت معادلات و ضرایب آنها در دو حالت نفوذ یک بعدی و دو بعدی بود. هدف این پژوهش، بررسی و مطالعه کاستی های ذکر شده و شناسایی معادلات و ضرایب حساس به تغییرات رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک از یک آبیاری به آبیاری دیگر بود.

### مواد و روش ها

معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوییز، فیلیپ و هورتون به همراه ضرایب آنها در جدول ۱ آورده شده است. در این تحقیق، نفوذ تجمعی یک بعدی و دو بعدی با تغییر رطوبت اولیه خاک و بار آبی سطح خاک از یک آبیاری به آبیاری دیگر، با استفاده از حل معادله ریچاردز (مدل HYDRUS) شبیه سازی گردید؛ یعنی در طی یک آبیاری بار آبی سطح خاک ثابت و رطوبت اولیه کل خاک در شروع آبیاری یکسان و بین آبیاری ها رطوبت و بار آبی متغیر بود. فرض شد که خروجی مدل HYDRUS (نفوذ تجمعی نسبت به زمان) همان نفوذ تجمعی که در واقعیت اتفاق می افتد، می باشد (بدون انجام کار مرزعه ای). از خروجی

جدول ۱ - معادلات نفوذ به کار رفته در این تحقیق

| معادله                                                         | پارامترها                                                                                                                           | نام معادله نفوذ |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $Z = at^b + f_0 t$                                             | $a$ و $(\text{cm}/\text{min})$ $f_0$ نفوذ نهایی (min) زمان $t$ ، $(\text{cm}/\text{min}^b)$ و ضرایب تجربی $b$ (-)                   | کوستیاکوف-لوییز |
| $Z = S\sqrt{t} + k_s t$                                        | $S$ ضریب جذبی خاک $(\text{cm}/\text{min}^{0.5})$ زمان $t$ (min)، $k_s$ ضریب هدایت هیدرولیکی منطقه انتقال $(\text{cm}/\text{min})$ و | فیلیپ           |
| $Z = f_f t + \left( \frac{f_i - f_f}{k} \right) (1 - e^{-kt})$ | $f_f$ سرعت نهایی نفوذ $(\text{cm}/\text{min})$ زمان $t$ (min)، $f_i$ سرعت اولیه نفوذ $(\text{cm}/\text{min})$ و $k$ ثابت تناسب (-)  | هورتون          |

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی بافتهای مختلف خاک

| پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنختن-معلم |                |                    |         |                     |         | بافت خاک |
|----------------------------------------|----------------|--------------------|---------|---------------------|---------|----------|
| $\theta_r (-)$                         | $\theta_s (-)$ | $\alpha (cm^{-1})$ | $n (-)$ | $K_s (min.cm^{-1})$ | $l (-)$ |          |
| ۰/۰۶۸                                  | ۰/۳۸           | ۰/۰۰۸              | ۱/۰۹    | ۰/۰۰۳۳              | ۰/۵     | رس       |
| ۰/۰۹۵                                  | ۰/۴۱           | ۰/۰۱۹              | ۱/۳۱    | ۰/۰۰۴۳              | ۰/۵     | لومرسی   |
| ۰/۰۷۸                                  | ۰/۴۳           | ۰/۰۳۶              | ۱/۵۶    | ۰/۰۱۷۳              | ۰/۵     | لوم      |
| ۰/۰۶۵                                  | ۰/۴۱           | ۰/۰۷۵              | ۱/۸۹    | ۰/۰۷۳۶              | ۰/۵     | لومشنی   |
| ۰/۰۴۵                                  | ۰/۴۳           | ۰/۱۴۵              | ۲/۶۸    | ۰/۴۹۵۰              | ۰/۵     | شن       |

پارامترها ثابت نگه داشته می‌شود. در این تحقیق حساسیت معادلات نفوذ و ضرایب آنها به وسیله دو رابطه شاخص حساسیت نسبی و مطلق و در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت؛ حالت اول، حالتی است که در آن بار آبی سطح خاک ثابت و رطوبت اولیه خاک افزایش می‌یابد و در حالت دوم برعکس این حالت بررسی می‌گردد. شاخص حساسیت نسبی و مطلق از روابط زیر به دست می‌آیند (۳):

$$SI_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\frac{X_i - X_{i-1}}{X_i + X_{i-1}}}{\frac{P_i - P_{i-1}}{P_i + P_{i-1}}} \quad (4)$$

$$SI_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\frac{X_i - X_{i-1}}{X_i + X_{i-1}}}{\frac{P_i - P_{i-1}}{P_i + P_{i-1}}} \right| \quad (5)$$

که در آن n تعداد نقاط پارامترهای خروجی،  $X_i$  مقدار جدید پارامتر خروجی با تغییر مقدار پارامتر ورودی از  $P_{i-1}$  به  $P_i$  مقدار قبلی پارامتر خروجی بدون تغییر در پارامتر ورودی  $(P_{i-1})$ ،  $SI_r$  شاخص حساسیت نسبی (بی‌بعد) و  $SI_a$  شاخص حساسیت مطلق (بی‌بعد) می‌باشد. هر معادله و یا ضریبی که مقدار شاخص حساسیت آن به صفر نزدیکتر باشد، حساسیت آن کمتر است. در این تحقیق ابتدا شاخص حساسیت چهار بار آبی ثابت (در طول یک آبیاری) که در آن رطوبت اولیه از یک آبیاری به آبیاری دیگر در حال افزایش می‌باشد  $(H = c \text{ و } \Theta \uparrow)$  با استفاده از روابط بالا محاسبه شد سپس میانگین این چهار حساسیت را با نماد  $MSI_a$  (و  $MSI_r$ ) نشان داده شد و از آن برای آنالیز حساسیت استفاده گردید. همین عمل در مورد پنج رطوبت اولیه ثابت بین آبیاری‌ها که بار آبی آن از یک آبیاری به آبیاری دیگر در حال افزایش است  $(H \uparrow \text{ و } \Theta = c)$  انجام شد. با استفاده از معیار  $MSI_r$  می‌توان فهمید که معادله یا ضریب نفوذ در حالت‌های بار آبی ثابت که رطوبت در حال افزایش و یا رطوبت اولیه ثابت که بار آبی در

$$k(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^m \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

برای شبیه‌سازی فرآیند نفوذ تجمعی توسط مدل HYDRUS، ستون خاک همگن (تک‌لایه) به عمق ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ستون خاک برابر ۱۰۰ سانتی‌متر (برای حالت دو بعدی)، شرط اولیه رطوبت حجمی یکسان در کل ستون خاک، شرط مرزی بار آبی ثابت در سطح خاک، شرط مرزی زهکشی آزاد در پایین ستون خاک، شرط مرزی بدون شدت جریان در طرفین ستون خاک (در حالت دو بعدی) و مدت مدل‌سازی ۷۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. در این تحقیق، چهار بار آبی ثابت روی سطح خاکها (۲/۵، ۵/۰، ۱۰/۰ و ۲۰/۰ سانتی‌متر) در طول مدت مدل‌سازی در نظر گرفته شد. شرایط اولیه نیز پنج مقدار رطوبت اولیه بین محدوده نقطه پژمردگی گیاهی تا ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد (۱). در کل ۱۰۰ حالت (۵ بافت  $\times$  ۵ رطوبت اولیه  $\times$  ۴ بار آبی) شبیه‌سازی شد.

### تعیین ضرایب معادلات نفوذ مختلف

پس از اینکه مدل سازی در شرایط مختلف رطوبتی و بار آبی ثابت انجام گرفت؛ داده‌های خروجی مدل (عمق آب نفوذ یافته نسبت به زمان) با استفاده از ابزار Solver نرم افزار اکسل ۲۰۱۳ با معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوییز، فیلیپ و هورتون برازش داده شد؛ این کار طوری انجام شد که شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) حداقل مقدار را داشت. شاخص آماری RMSE بصورت زیر تعریف گردید (۲):

$$RMSE = \sqrt{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right)} \quad (3)$$

که در آن  $P_i$  مقدار برازش داده شده،  $O_i$  مقدار مدل سازی شده و n تعداد داده‌های مدل‌سازی شده می‌باشد.

### شاخص حساسیت

حساسیت یک مدل نسبت به پارامترهای ورودی به صورت مقدار تغییر در پارامترهای خروجی تعریف می‌شود، در حالی که سایر

ضرایب  $b$ ،  $S$ ،  $k_s$  و  $f_i$  در حالت  $(\uparrow \Theta = c \text{ و } H = c)$  و ضرایب  $a$ ،  $S$  و  $f_i$  در حالت  $(\uparrow \Theta = c)$  دارای تغییراتی سیستماتیک بودند. با توجه به مقادیر  $MSI_a$ ، در حالت  $(\uparrow \Theta = c \text{ و } H = c)$  با سنگین تر شدن بافت خاک بر میزان حساسیت ضرایب معادلات نفوذ افزوده شد ولی در حالت  $(\uparrow \Theta = c \text{ و } H = c)$  با سنگین تر شدن بافت خاک حساسیت دارای تغییرات اندکی بود. دلیل بیشتر بودن حساسیت در حالت  $(\uparrow \Theta = c \text{ و } H = c)$  با سنگین تر شدن بافت نسبت به حالت  $(\uparrow \Theta = c)$  این بود که با توجه به رابطه دارسی ( $q = K \cdot i$ ) بار آبی در فرآیند نفوذ فقط بر شیب هیدرولیکی ( $i$ ) نفوذ تأثیر می گذارد ولی رطوبت اولیه علاوه بر شیب هیدرولیکی بر هدایت هیدرولیکی ( $K$ ) نیز تأثیر می گذارد و این باعث تغییرات چشمگیر نفوذ (در نتیجه تغییرات چشمگیر ضرایب) با تغییرات رطوبت اولیه نسبت به تغییرات بار آبی بود. دلیل افزایش یافتن حساسیت ضرایب با سنگین تر شدن بافت خاک این بود اگر دو خاک سنگین و سبک که دارای رطوبت اولیه ثابت باشند (مثلاً ۱۲ درصد) تحت مکش یکسان قرار دهیم خاک سنگین بافت مقدار رطوبت کمتری را نسبت به خاک سبک بافت از دست می دهد در نتیجه بازه رطوبتی بین نقطه پژمردگی تا ظرفیت زراعی در خاکهای سنگین بافت نسبت به خاکهای سبک بافت بیشتر است و چون در این تحقیق این بازه به پنج قسمت مساوی تقسیم شده است تغییرات رطوبتی و در نتیجه آن تغییرات نفوذ (یا ضرایب نفوذ) در خاکهای سنگین بافت نسبت به خاکهای سبک بافت بیشتر شد. رتبه بندی حساسیت ضرایب معادلات نفوذ در دو حالت  $(\uparrow \Theta = c \text{ و } H = c)$  و  $(\uparrow \Theta = c)$  نشان داد که رتبه بندی حساسیت در دو حالت ارزیابی در اکثر موارد مشابه هم بود. در نهایت با توجه به رتبه بندی انجام شده در حالت یک بعدی به ترتیب ضرایب  $S$ ،  $b$  و  $f_i$  با کسب کوچکترین رتبه نهایی به عنوان حساس ترین و ضرایب  $f_0$  و  $f_i$  با کسب بزرگترین رتبه نهایی کم حساس ترین ضرایب شناسایی شدند. در بندی و همکاران (۴) به بررسی حساسیت ضرایب معادلات نفوذ نسبت به رطوبت اولیه پرداخته بودند. نتایج آنها نشان داده بود که ضرایب  $f_0$  و  $k$  حساس ترین و ضرایب  $b$  و  $S$  کم حساس ترین ضرایب بودند که با نتایج این تحقیق همخوانی نداشت. همچنین نتایج ترنر (۱۶) نیز نشان داده بود که ضرایب  $f_0$  (مشابه نتایج در بندی و همکاران (۴) و عدم همخوانی با نتایج این تحقیق) و  $S$  (عدم همخوانی با نتایج در بندی و همکاران (۴) و مشابه نتایج این تحقیق) حساس ترین ضرایب بودند. یکی از دلایل ضد و نقیض بودن نتایج، طبیعت تغییرپذیر فرایند نفوذ آب به خاک است که موجب می شود تا حتی یک معادله نفوذ در دو خاک که ویژگی های فیزیکی بسیار مشابهی دارند، کارایی متفاوتی داشته باشند. همچنین، بسته به روش اندازه گیری نفوذ، شرایط اولیه و شرایط مرزی جریان آب در خاک متفاوت خواهد بود که می توان دست کم بخشی از تفاوت در نتایج به دست آمده را به این امر نسبت داد.

حال افزایش است چه روندی دارد. اختلاف مقدار قدر مطلق  $MSI_r$  و  $MSI_a$  سیستماتیک بودن این تغییرات را نشان می دهد که اگر اختلاف برابر صفر باشد نشان می دهد که تغییرات کاملاً سیستماتیک می باشد. در این تحقیق برای آنالیز حساسیت معادلات یا ضرایب نفوذ از روش رتبه بندی استفاده شد. برای رتبه بندی از معیار  $MSI_a$  برای حالت های بار آبی ثابت که رطوبت در حال افزایش و رطوبت اولیه ثابت که بار آبی در حال افزایش است، استفاده گردید. رتبه بندی بدین صورت بود که هر ضریبی (و یا معادله ای) که بزرگترین مقدار  $MSI_a$  را داشت پایین ترین رتبه یعنی یک؛ و برای سایر ضرایب (و یا معادلات) بر حسب میزان بزرگی معیار ارزیابی رتبه های دو الی آخر تعلق گرفت. ضریبی (و یا معادله ای) که در یک بافت خاک مجموع رتبه های کمتری در دو حالت ارزیابی را داشت به عنوان حساس ترین ضریب (و یا معادله) در آن بافت خاک شناسایی شد. در نهایت هر ضریب (و یا معادله) که مجموع رتبه های کسب شده کمتری در کلیه بافتهای خاک مورد بررسی در این تحقیق را داشت، کمترین رتبه نهایی به آن تعلق گرفت و به عنوان حساس ترین ضریب (و یا معادله) در کلیه بافتهای خاک انتخاب شد.

## نتایج و بحث

### آنالیز حساسیت ضرایب معادلات نفوذ در حالت یک بعدی

در جدول ۳ مقادیر حساسیت نسبی ( $MSI_r$ ) و حساسیت مطلق ( $MSI_a$ ) ضرایب معادلات مختلف نفوذ در کلاسهای مختلف بافتی آورده شده است. در دو حالت، رطوبت حجمی اولیه ثابت و بار آبی در حال افزایش  $(\uparrow \Theta = c)$  و رطوبت حجمی اولیه در حال افزایش و بار آبی ثابت  $(\uparrow \Theta = c \text{ و } H = c)$  به آنالیز حساسیت ضرایب معادلات نفوذ پرداخته شد. با توجه به مقادیر  $MSI_r$ ، ضرایب  $b$ ،  $S$  و  $f_i$  در تمامی بافتهای خاک در حالت  $(\uparrow \Theta = c \text{ و } H = c)$  دارای تغییرات کاهشی و در حالت  $(\uparrow \Theta = c)$  دارای تغییرات افزایشی بودند. همچنین ضرایب  $k_s$  و  $f_i$  دقیقاً رفتار عکس ضرایب بالا را داشتند. ضریب  $a$  نیز فقط در حالت  $(\uparrow \Theta = c)$  در تمامی بافتهای دارای روند افزایشی بود و در سایر ضرایب روند تغییراتی مشخصی مشاهده نشد. ضرایب  $a$ ،  $b$ ،  $S$  و  $f_i$  از جمله ضرایبی بودند که رابطه مستقیمی با نفوذ داشتند چنانچه با کاهش نفوذ در اثر افزایش رطوبت اولیه یا کاهش بار آبی، این ضرایب تغییراتی مشابه تغییرات نفوذ داشتند. با وجود اینکه ضرایب  $k_s$  و  $f_i$  نیز رابطه مستقیمی با نفوذ داشتند ولی چنانچه مشاهده گردید که روند عکس تغییرات نفوذ داشتند؛ با توجه به ساختار معادلات فیلپ و هورتون در برآزش با خروجی مدل HYDRUS، ضرایب  $k_s$  و  $f_i$  تأثیر کمی بر میزان آب نفوذ یافته داشتند و از تأثیر این ضرایب کاسته شده و بر مقدار ضرایب دیگر معادلات ( $S$  و  $f_i$ ) افزوده شد. با توجه به عدم اختلاف مقادیر قدر مطلق  $MSI_r$  و  $MSI_a$ ،

جدول ۳- شاخص حساسیت ضرایب معادلات نفوذ در حالت یک بعدی

| بافت خاک | شاخص حساسیت*                 | پارامترهای معادله نفوذ |       |       |       |         |                 |       |       |       |
|----------|------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|---------|-----------------|-------|-------|-------|
|          |                              | هورتون                 |       | فیلیپ |       |         | کوستیاکوف-لوییز |       |       |       |
|          |                              | $f_r$                  | $f_i$ | $k$   | $k_s$ | S       | $f_0$           | b     | a     |       |
| رس       | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>r</sub> (-)   | -۰/۵۲ | -۱/۸۴ | ۰/۳۲  | ۱/۲۴    | -۲/۴۵           | ۰/۱۴  | -۲/۳۵ | -۰/۱۰ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۲۳ | -۰/۳۲ | -۰/۱۱ | -۰/۰۶   | ۰/۴۸            | -۰/۰۳ | -۰/۱۲ | -۰/۲۵ |
|          | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>a</sub> (-)   | -۰/۵۲ | ۱/۸۴  | ۰/۵۸  | ۱/۲۴(۴) | ۲/۴۵            | ۰/۲۲  | ۲/۳۵  | -۰/۲۹ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۲۳ | ۰/۳۵  | ۰/۲۶  | ۰/۱۴    | ۰/۴۸            | ۰/۰۸  | -۰/۲۴ | -۰/۲۵ |
|          | رتبه                         |                        | ۶     | ۲     | ۴     | ۵       | ۱               | ۷     | ۳     | ۵     |
| لومرسی   | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>r</sub> (-)   | -۰/۴۳ | -۱/۱۷ | -۰/۰۳ | ۰/۵۱    | -۱/۱۶           | ۰/۰۶  | -۱/۲۱ | -۰/۰۲ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۱۹ | ۰/۲۸  | -۰/۰۱ | ۰/۰۳    | ۰/۳۱            | -۰/۰۲ | -۰/۱۹ | -۰/۰۷ |
|          | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>a</sub> (-)   | -۰/۴۳ | ۱/۱۷  | ۰/۳۳  | ۰/۵۱    | ۱/۱۶            | ۰/۱۴  | ۱/۲۱  | -۰/۰۶ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۱۹ | ۰/۲۹  | -۰/۰۹ | -۰/۰۴   | ۰/۳۱            | -۰/۰۲ | -۰/۱۹ | -۰/۰۷ |
|          | رتبه                         |                        | ۲     | ۱     | ۳     | ۳       | ۱               | ۵     | ۱     | ۴     |
| لوم      | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>r</sub> (-)   | -۰/۱۲ | -۰/۳۴ | ۰/۱۸  | ۰/۱۱    | -۰/۵۵           | -۰/۰۰ | -۰/۵۵ | -۰/۰۰ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۱۲ | ۰/۱۸  | -۰/۱۷ | -۰/۰۱   | ۰/۳۴            | -۰/۰۴ | -۰/۱۹ | -۰/۰۹ |
|          | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>a</sub> (-)   | -۰/۱۲ | ۰/۳۴  | ۰/۲۰  | ۰/۱۳    | ۰/۵۵            | ۰/۰۹  | ۰/۵۵  | -۰/۰۴ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۱۲ | ۰/۱۸  | ۰/۱۷  | ۰/۰۲    | ۰/۳۴            | -۰/۰۴ | -۰/۱۹ | -۰/۰۹ |
|          | رتبه                         |                        | ۵     | ۳     | ۴     | ۶       | ۱               | ۷     | ۲     | ۷     |
| لومشنی   | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>r</sub> (-)   | -۰/۰۵ | -۰/۱۶ | ۰/۱۹  | ۰/۰۵    | -۰/۳۷           | ۰/۰۸  | -۰/۲۹ | -۰/۰۵ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۰۱ | ۰/۱۶  | -۰/۳۲ | -۰/۱۲   | ۰/۴۷            | -۰/۰۲ | -۰/۲۱ | -۰/۱۷ |
|          | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>a</sub> (-)   | -۰/۰۵ | ۰/۱۶  | ۰/۲۲  | ۰/۰۸    | ۰/۳۷            | -۰/۰۹ | -۰/۲۹ | -۰/۰۶ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۰۱ | ۰/۱۶  | ۰/۳۲  | ۰/۱۲    | ۰/۴۷            | ۰/۲۰  | -۰/۲۹ | -۰/۱۷ |
|          | رتبه                         |                        | ۷     | ۴     | ۲     | ۶       | ۱               | ۳     | ۲     | ۵     |
| شن       | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>r</sub> (-)   | -۰/۰۰ | -۰/۰۰ | ۰/۲۸  | ۰/۰۲    | -۰/۲۴           | -۰/۰۱ | -۰/۱۳ | -۰/۱۲ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۰۰ | ۰/۲۴  | -۰/۱۲ | -۰/۰۵   | ۰/۵۱            | -۰/۰۲ | ۰/۴   | -۰/۰۹ |
|          | $H = c$<br>$\Theta \uparrow$ | MSI <sub>a</sub> (-)   | -۰/۰۰ | ۰/۰۲  | ۰/۲۸  | ۰/۰۲    | ۰/۲۴            | -۰/۰۱ | -۰/۱۳ | -۰/۱۲ |
|          | $\Theta = c$<br>$H \uparrow$ |                        | -۰/۰۰ | ۰/۲۴  | ۰/۱۳  | ۰/۰۵    | ۰/۵۱            | -۰/۰۲ | -۰/۴۰ | -۰/۰۹ |
|          | رتبه                         |                        | ۷     | ۳     | ۲     | ۵       | ۱               | ۶     | ۲     | ۴     |
|          |                              | رتبه نهایی             | ۶     | ۳     | ۴     | ۵       | ۱               | ۷     | ۲     | ۵     |

\*- رطوبت حجمی اولیه در حال افزایش و بارآبی ثابت ( $\Theta \uparrow$  و  $H = c$ ) و رطوبت حجمی اولیه ثابت و بارآبی در حال افزایش ( $H \uparrow$  و  $\Theta = c$ )

اولیه، پتانسیل ماتریک (که یکی از عوامل موثر در نفوذ می‌باشد) کاهش می‌یابد و دلیل تغییرات افزایشی نفوذ در حالت  $(\Theta = c \text{ و } H \uparrow)$  این بود که با افزایش بار آبی، شیب هیدرولیکی (که یکی از عوامل موثر در نفوذ می‌باشد) افزایش می‌یابد. با توجه به عدم اختلاف مقادیر قدر مطلق  $MSI_a$  و  $MSI_r$ ، تمامی معادلات در تمامی کلاسهای بافتی دارای تغییرات سیستماتیک بودند. با توجه به مقادیر  $MSI_a$  در هر دو حالت ارزیابی با سنگین تر شدن بافت خاک حساسیت معادلات نفوذ افزایش یافت دلیل این امر به خاطر تغییر پذیری زیاد نفوذ با تغییرات بافت خاک بود. تقریباً در تمامی کلاسهای بافت خاک حساسیت معادلات نفوذ در حالت  $(\Theta = c \text{ و } H \uparrow)$  نسبت به حالت  $(\Theta = c \text{ و } H \uparrow)$  بیشتر بود که دلیل این امر در بخش قبل توضیح داده شد. در نهایت با توجه به رتبه‌بندی انجام شده در هر دو بعد، مشابه نتایج سپهوند و همکاران (۶) معادله هورتون به عنوان حساس‌ترین معادله و معادلات کوستیاکوف-لوییز و فیلپ نیز حساسیتی مشابه در هر دو بعد داشتند.

### نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج ارزیابی حساسیت معادلات نفوذ و ضرایب آنها در حالت نفوذ یک بعدی و دو بعدی نشان داد که حساسیت معادلات و ضرایب آنها دارای عملکرد مشابه بودند ولی از لحاظ کمی در اکثر موارد حساسیت معادلات و ضرایب آنها در حالت دو بعدی بیشتر از یک بعدی بود. در هر دو بعد ضرایب  $S$  و  $b$  به عنوان حساس‌ترین ضریب و ضرایب  $f_0$  و  $f_1$  به عنوان کم‌حساس‌ترین ضرایب شناسایی شدند. دلیل حساس بودن ضرایب  $S$  و  $b$  این بود که این ضرایب علاوه بر وابستگی به خصوصیات بافت خاک به خصوصیات محیطی خاک مانند رطوبت و بار آبی نیز وابستگی داشتند ولی ضرایب کم حساس  $f_0$  و  $f_1$  حساسیت شدیدی به خصوصیات بافت داشتند تا تغییرات بار آبی و رطوبت. با توجه به نتایج بدست آمده توصیه می‌گردد در مواردی که رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک در یک آبیاری ثابت ولی بین آبیاری‌ها متغیر باشد از معادله هورتون که حساسیت بالایی به این شرایط دارد استفاده نگردد. حساس‌ترین ضرایب در هر یک از معادلات نفوذ عاملی مهمی در اندازه‌گیری و واسنجی معادله دارد (۱۶)؛ در نتیجه پیشنهاد می‌شود که ضرایبی که حساسیت بالایی دارند قبل از ضرایبی که حساسیت کمتری دارند، باید واسنجی شوند.

### آنالیز حساسیت ضرایب معادلات نفوذ در حالت دو بعدی

مطابق حالت یک بعدی در حالت دوبعدی نیز شاخص‌های حساسیت نسبی ( $MSI_r$ ) و حساسیت مطلق ( $MSI_a$ ) ضرایب معادلات مختلف نفوذ در کلاسهای مختلف بافتی محاسبه شد (جدول ۴). با توجه به مقادیر  $MSI_r$ ، ضرایب  $a$ ،  $b$ ،  $S$ ،  $f_1$  و  $f_0$  در تمامی بافتهای خاک در حالت  $(\Theta \uparrow \text{ و } H = c)$  دارای تغییرات کاهش و در حالت  $(\Theta = c \text{ و } H \uparrow)$  فقط ضرایب  $S$  و  $f_0$  دارای تغییرات افزایشی بودند. ضریب  $a$  نیز فقط در حالت  $(\Theta = c \text{ و } H \uparrow)$  در تمامی بافتهای دارای روند افزایشی بود و در سایر ضرایب روند تغییراتی مشخصی مشاهده نشد. مشابه حالت یک بعدی ضرایب  $a$ ،  $b$ ،  $S$ ،  $f_1$  و  $f_0$  با توجه به اینکه رابطه مستقیمی با نفوذ داشتند چنانچه با کاهش نفوذ در اثر افزایش رطوبت اولیه یا کاهش بار آبی، این ضرایب نیز تغییراتی مشابه تغییرات نفوذ داشتند. با توجه به عدم اختلاف مقادیر قدر مطلق  $MSI_a$  و  $MSI_r$ ، ضرایب  $S$  و  $f_0$  در حالت  $(\Theta \uparrow \text{ و } H = c)$  دارای تغییرات سیستماتیک بودند. با توجه به مقادیر  $MSI_a$ ، همانند حالت یک بعدی در حالت  $(\Theta \uparrow \text{ و } H = c)$  با سنگین تر شدن بافت خاک بر میزان حساسیت ضرایب معادلات نفوذ افزوده شد ولی در حالت  $(\Theta = c \text{ و } H \uparrow)$  با سنگین تر شدن بافت خاک، حساسیت ضرایب تغییرات اندکی داشت. رتبه‌بندی حساسیت ضرایب معادلات در دو حالت  $(\Theta \uparrow \text{ و } H = c)$  و  $(\Theta = c \text{ و } H \uparrow)$  نشان داد که رتبه‌بندی حساسیت در دو حالت ارزیابی در اکثر موارد مشابه هم بودند. در نهایت با توجه به رتبه‌بندی انجام شده در حالت دو بعدی و شرایط اولیه و مرزی مختلف به ترتیب ضرایب  $S$ ،  $f_1$  و  $b$  با کسب کوچکترین رتبه نهایی به عنوان حساس‌ترین و ضرایب  $f_0$  و  $f_1$  با کسب بزرگترین رتبه نهایی کم‌حساس‌ترین ضرایب شناسایی شدند.

### آنالیز حساسیت معادلات نفوذ

شاخص حساسیت معادلات در حالت‌های یک بعدی و دو بعدی در جدول ۵ آورده شده است. نتایج نشان داد حساسیت معادلات در هر دو حالت شبیه‌سازی یک و دو بعدی نفوذ مشابه بود ولی از لحاظ کمی در اکثر موارد حساسیت معادلات در حالت دو بعدی بیشتر از یک بعدی بود؛ دلیل این امر به خاطر متفاوت بودن فرآیند نفوذ یک بعدی و دو بعدی بود. با توجه به مقادیر  $MSI_r$  در تمامی کلاسهای بافتی خاکها، تمام معادلات نفوذ در حالت  $(\Theta \uparrow \text{ و } H = c)$  تغییرات کاهش و در حالت  $(\Theta = c \text{ و } H \uparrow)$  تغییرات افزایشی داشتند. دلیل تغییرات کاهش نفوذ در حالت  $(\Theta \uparrow \text{ و } H = c)$  این بود که با افزایش رطوبت

جدول ۴- شاخص حساسیت ضرایب معادلات نفوذ در حالت دو بعدی

| بافت خاک | پارامتر معادله نفوذ |       |       |       |       |                 |       |       |              |                      |
|----------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------------|----------------------|
|          | هورتون              |       |       | فیلیپ |       | کوستیاکوف-لوییز |       |       | شاخص حساسیت  |                      |
|          | $f_r$               | $f_i$ | $k$   | $k_s$ | $S$   | $f_0$           | $b$   | $a$   |              |                      |
| رس       | -۰/۴۸               | -۲/۳  | ۱/۰۶  | ۶/۳۴  | -۳/۱۲ | -۰/۲۴           | -۲/۹۹ | -۱/۸۰ | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>r</sub> (-) |
|          | ۰/۱۶                | ۰/۰۴  | -۰/۳۷ | -۰/۶۲ | ۰/۴۵  | ۰/۱۰            | ۰/۳۰  | ۰/۸۰  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۰/۴۹                | ۲/۸۷  | ۱/۳۵  | ۷/۷۷  | ۳/۲۴  | -۰/۴۸           | ۳/۴۲  | ۳/۶۳  | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>a</sub> (-) |
|          | ۰/۱۶                | ۰/۸۶  | ۰/۸۴  | ۱/۲۳  | -۰/۵۱ | ۰/۱۲            | ۰/۳۹  | ۰/۹۱  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۶                   | ۳     | ۵     | ۱     | ۴     | ۷               | ۴     | ۲     | رتبه         |                      |
| لومرسی   | -۰/۴۳               | -۱/۹۶ | -۰/۷۰ | ۱/۵۵  | -۱/۴۹ | -۰/۲۱           | -۱/۹۹ | ۰/۳۷  | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>r</sub> (-) |
|          | ۰/۱۷                | -۰/۳۲ | -۰/۶۷ | ۰/۲۰  | ۰/۲۳  | -۰/۰۵           | -۰/۱۳ | ۰/۲۷  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۰/۴۳                | ۱/۹۶  | ۰/۸۷  | ۳/۵۱  | ۱/۴۹  | ۰/۲۱            | ۱/۹۹  | ۰/۳۷  | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>a</sub> (-) |
|          | ۰/۱۷                | ۰/۴۷  | ۰/۶۷  | ۰/۶۰  | ۰/۲۳  | ۰/۰۸            | ۰/۱۵  | ۰/۲۷  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۵                   | ۲     | ۲     | ۱     | ۳     | ۶               | ۳     | ۴     | رتبه         |                      |
| لوم      | -۰/۱۴               | -۰/۷۰ | -۰/۲۲ | ۰/۲۷  | -۰/۶۸ | -۰/۰۵           | -۰/۸۳ | ۰/۱۰  | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>r</sub> (-) |
|          | ۰/۱۲                | ۰/۰۹  | -۰/۲۴ | ۰/۰۰  | ۰/۳۰  | -۰/۰۶           | ۰/۰۱  | ۰/۲۰  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۰/۱۴                | ۰/۷۰  | ۰/۲۶  | ۰/۲۷  | ۰/۶۸  | ۰/۰۷            | ۰/۸۳  | ۰/۱۰  | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>a</sub> (-) |
|          | ۰/۱۲                | ۰/۱۴  | ۰/۲۵  | ۰/۰۲  | ۰/۳۰  | ۰/۰۶            | ۰/۰۷  | ۰/۲۰  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۵                   | ۲     | ۳     | ۶     | ۱     | ۷               | ۳     | ۴     | رتبه         |                      |
| لومشنی   | -۰/۰۵               | -۰/۲۵ | ۰/۰۲  | ۰/۰۴  | -۰/۳۷ | ۰/۱۷            | -۰/۳۵ | -۰/۰۱ | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>r</sub> (-) |
|          | ۰/۰۰                | ۰/۲۰  | -۰/۱۸ | -۰/۱۳ | ۰/۴۴  | -۰/۳۲           | ۰/۲۱  | ۰/۱۴  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۰/۰۵                | ۰/۲۵  | ۰/۲۷  | ۰/۰۴  | ۰/۳۷  | ۰/۲۰            | ۰/۳۵  | ۰/۱۰  | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>a</sub> (-) |
|          | ۰/۰۰                | ۰/۲۰  | ۰/۱۸  | ۰/۳۹  | ۰/۴۴  | ۰/۳۲            | ۰/۲۱  | ۰/۱۴  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۷                   | ۴     | ۴     | ۵     | ۱     | ۳               | ۲     | ۶     | رتبه         |                      |
| شن       | ۰/۰۰                | -۰/۰۲ | ۰/۲۴  | ۰/۰۲  | -۰/۲۵ | ۰/۰۲            | -۰/۰۷ | -۰/۱۷ | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>r</sub> (-) |
|          | ۰/۰۰                | ۰/۲۷  | ۰/۰۶  | -۰/۰۵ | ۰/۴۴  | -۰/۰۲           | ۰/۴۲  | ۰/۰۰  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۰/۰۰                | ۰/۰۴  | ۰/۲۴  | ۰/۰۲  | ۰/۲۵  | ۰/۰۲            | ۰/۰۸  | ۰/۱۷  | H = c<br>θ ↑ | MSI <sub>a</sub> (-) |
|          | ۰/۰۰                | ۰/۲۷  | ۰/۰۷  | ۰/۰۵  | ۰/۴۴  | ۰/۰۲            | ۰/۴۲  | ۰/۰۲  | θ = c<br>H ↑ |                      |
|          | ۷                   | ۳     | ۲     | ۵     | ۱     | ۶               | ۲     | ۴     | رتبه         |                      |
|          | ۷                   | ۲     | ۳     | ۴     | ۱     | ۶               | ۲     | ۵     | رتبه نهایی   |                      |

جدول ۵- شاخص حساسیت معادلات نفوذ در حالت های یک بعدی و دو بعدی

| معادله نفوذ (دو بعدی) |        |                 | معادله نفوذ (یک بعدی) |        |                 | شاخص حساسیت          | بافت خاک |
|-----------------------|--------|-----------------|-----------------------|--------|-----------------|----------------------|----------|
| هورتون                | فیلیپ  | کوستیاکوف-لوییز | هورتون                | فیلیپ  | کوستیاکوف-لوییز |                      |          |
| -۱/۳۱۲                | -۱/۳۱۴ | -۱/۳۰۶          | -۰/۸۳۵                | -۰/۷۹۴ | -۰/۸۱۱          | H = c<br>θ ↑         | رس       |
| ۰/۲۶۴                 | ۰/۲۶۶  | ۰/۲۶۲           | ۰/۲۶۹                 | ۰/۲۵۹  | ۰/۲۵۸           | MSI <sub>r</sub> (-) |          |
| ۱/۳۱۲                 | ۱/۳۱۴  | ۱/۳۰۶           | -۰/۸۳۵                | ۰/۷۹۴  | ۰/۸۱۱           | H = c<br>θ ↑         | رس       |
| ۰/۲۶۴                 | ۰/۲۶۶  | ۰/۲۶۲           | ۰/۲۶۹                 | ۰/۲۵۹  | ۰/۲۵۸           | MSI <sub>a</sub> (-) |          |
| ۱                     | ۱      | ۲               | ۱                     | ۲      | ۲               | رتبه                 |          |
| -۰/۶۵۵                | -۰/۶۱۶ | -۰/۶۴۰          | -۰/۵۶۳                | -۰/۵۳۷ | -۰/۵۴۴          | H = c<br>θ ↑         | لومرسی   |
| ۰/۲۰۰                 | ۰/۲۱۳  | ۰/۲۰۵           | ۰/۲۱۸                 | ۰/۲۱۳  | ۰/۲۱۱           | MSI <sub>r</sub> (-) |          |
| ۰/۶۵۵                 | ۰/۶۱۶  | ۰/۶۴۰           | ۰/۵۶۳                 | ۰/۵۳۷  | ۰/۵۴۴           | H = c<br>θ ↑         | لومرسی   |
| ۰/۲۰۰                 | ۰/۲۱۳  | ۰/۲۰۵           | ۰/۲۱۸                 | ۰/۲۱۳  | ۰/۲۱۱           | MSI <sub>a</sub> (-) |          |
| ۱                     | ۱      | ۱               | ۱                     | ۲      | ۲               | رتبه                 |          |
| -۰/۲۳۰                | -۰/۲۰۲ | -۰/۲۱۱          | -۰/۱۸۸                | -۰/۱۸۵ | -۰/۱۸۷          | H = c<br>θ ↑         | لوم      |
| ۰/۱۳۹                 | ۰/۱۵۸  | ۰/۱۵۵           | ۰/۱۵۹                 | ۰/۱۵۶  | ۰/۱۵۴           | MSI <sub>r</sub> (-) |          |
| ۰/۲۳۰                 | ۰/۲۰۲  | ۰/۲۱۱           | ۰/۱۸۸                 | ۰/۱۸۵  | ۰/۱۸۷           | H = c<br>θ ↑         | لوم      |
| ۰/۱۳۹                 | ۰/۱۵۸  | ۰/۱۵۵           | ۰/۱۵۹                 | ۰/۱۵۶  | ۰/۱۵۴           | MSI <sub>a</sub> (-) |          |
| ۱                     | ۱      | ۱               | ۱                     | ۲      | ۲               | رتبه                 |          |
| -۰/۰۹۳                | -۰/۰۸۸ | -۰/۰۸۶          | -۰/۰۸۲                | -۰/۰۶۷ | -۰/۰۶۳          | H = c<br>θ ↑         | لومشنی   |
| ۰/۰۵۱                 | ۰/۰۵۱  | ۰/۰۴۶           | ۰/۰۵۵                 | ۰/۰۵۳  | ۰/۰۵۰           | MSI <sub>r</sub> (-) |          |
| ۰/۰۹۳                 | ۰/۰۸۸  | ۰/۰۸۶           | ۰/۰۸۲                 | ۰/۰۶۷  | ۰/۰۶۳           | H = c<br>θ ↑         | لومشنی   |
| ۰/۰۵۱                 | ۰/۰۵۱  | ۰/۰۴۶           | ۰/۰۵۵                 | ۰/۰۵۳  | ۰/۰۵۰           | MSI <sub>a</sub> (-) |          |
| ۱                     | ۲      | ۳               | ۱                     | ۲      | ۳               | رتبه                 |          |
| -۰/۰۰۸                | -۰/۰۰۶ | -۰/۰۰۶          | -۰/۰۰۷                | -۰/۰۰۴ | -۰/۰۰۵          | H = c<br>θ ↑         | شن       |
| ۰/۰۱۰                 | ۰/۰۰۵  | ۰/۰۰۸           | ۰/۰۱۱                 | ۰/۰۰۵  | ۰/۰۰۷           | MSI <sub>r</sub> (-) |          |
| ۰/۰۰۸                 | ۰/۰۰۶  | ۰/۰۰۶           | ۰/۰۰۷                 | ۰/۰۰۴  | ۰/۰۰۵           | H = c<br>θ ↑         | شن       |
| ۰/۰۱۰                 | ۰/۰۰۵  | ۰/۰۰۸           | ۰/۰۱۱                 | ۰/۰۰۵  | ۰/۰۰۷           | MSI <sub>a</sub> (-) |          |
| ۱                     | ۳      | ۲               | ۱                     | ۳      | ۲               | رتبه                 |          |
| ۱                     | ۲      | ۳               | ۱                     | ۲      | ۲               | رتبه نهایی           |          |



## منابع

- ۱- بای‌بوردی م. ۱۳۸۸. فیزیک خاک، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ نهم، ۶۷۴ ص.
- ۲- پرچمی عراقی ف.، میر لطیفی س.م.، قربانی دشتکی ش. و مهدیان م.ج. ۱۳۸۹. ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی و کاربری‌های اراضی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲، جلد ۴، ص ۱۹۳-۲۰۳.
- ۳- تقی‌زاده ز.، وردی‌نژاد و.ر.، ابراهیمیان ح. و خان‌محمدی ن. ۱۳۹۱. ارزیابی مرزعه‌ای و تحلیل سیستم آبیاری سطحی با WinSRFR (مطالعه موردی آبیاری جویچه‌ای). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۶، شماره ۶، ص ۱۴۵۹-۱۴۵۰.
- ۴- دربندی ص.، آیرملو ن.، جلیل‌زاده م. و دربندی ص. ۱۳۸۴. ارزیابی حساسیت ضرایب مدل‌های نفوذ به رطوبت اولیه خاک و تعیین مدل‌های ریاضی مربوطه. دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان، سوم و چهارم اسفند ماه، ص ۱۶۱۸-۱۶۲۵.
- ۵- رضایی‌پور ص.، قبادی‌نیا م.، طباطبایی س.ح.، شایان‌نژاد م. و نوروزی م.ر. ۱۳۹۳. ارزیابی روش‌های مختلف تعیین ضرایب معادله نفوذ فیلپ در فرایند آبیاری متوالی جویچه‌ها. نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۱، ص ۲۲۵-۲۳۸.
- ۶- سپهوند ع.، طایی سمیرمی م.، میرنیا س.ا. و مرادی ح.ر. ۱۳۸۹. ارزیابی حساسیت مدل‌های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شماره ۲، خرداد - تیر ۱۳۹۰، ص ۳۳۸-۳۴۶.
- 7- Ebrahimian H., Liaghat A., Parsinejad M., Abbasi F. and Navabian M. 2012. Comparison of one- and two dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(10): 929-938.
- 8- Holzapfel E.A., Jara J., Zuniga Marino M.A., Paredes J. and Bilib M. 2004. Infiltration parameters for furrow irrigation. *Agricultural Water Management* 68(1): 19-32.
- 9- Horton R.E. 1940. An Approach Towards a Physical Interpretation of Infiltration Capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5: 399-417.
- 10- Kandelous M.M. and Simunek J. 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface subsurface drip irrigation. *Journal of Irrigations Science*, 28:435-444.
- 11- Mezeencev V.J. 1948. Theory of formation of the surface runoff. *Meteorologiae Hidrologia*, 3: 33-40.
- 12- Philip J.R. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83: 345-357.
- 13- Simunek J., Sejna M. and Van Genuchten M.Th. 2006. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solute in variably-saturated media, Technical Manual, Version 1.11, PC progress prague, Czech Republic.
- 14- Simunek J., Sejna M. and Van Genuchten M.T. 2012. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 4.15, Department of Environment Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.
- 15- Siyal A.A., and Skaggs T.H. 2009. Measured and simulated soil patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Journal of Agricultural Water Management*. 96: 893-904.
- 16- Turner E. 2006. Comparison of Infiltration equationa and their field validation with rainfall simulatin. Thesis submitted to the faculty of the graduate school of the university of Maryland.



## Sensitivity Analysis of Different Infiltration Equations and Their Coefficients under Various Initial Soil Moisture and Ponding Depth

A. Javadi<sup>1\*</sup> - M. Mashal<sup>2</sup> - M.H. Ebrahimian<sup>3</sup>

Received: 23-11-2013

Accepted: 29-09-2014

### Abstract

Infiltration is a complex process that changed by initial moisture and water head on the soil surface. The main objective of this study was to estimate the coefficients of infiltration equations, Kostiakov-Lewis, Philip and Horton, and evaluate the sensitivity of these equations and their coefficients under various initial conditions (initial moisture soil) and boundary (water head on soil surface). Therefore, one-and two-dimensional infiltration for basin (or border) irrigation were simulated by changing the initial soil moisture and water head on soil surface from irrigation to other irrigation using the solution of the Richards' equation (HYDRUS model). To determine the coefficients of infiltration equations, outputs of the HYDRUS model (cumulative infiltration over time) were fitted using the Excel Solver. Comparison of infiltration sensitivity equations and their coefficients in one-and two-dimensional infiltration showed infiltration equations and their sensitivity coefficients were similar function but quantitatively in most cases sensitive two-dimensional equations and their coefficients were greater than one dimension. In both dimensions the soil adsorption coefficient Philip equation as the sensitive coefficient and Horton equation as the sensitive equation under various initial moisture soil and water head on soil surface were identified.

**Keywords:** HYDRUS Model, Horton Equation, Kostiakov-Lewis Equation, Philip Equation, Richards' Equation

1- PhD Student of Irrigation and Drainage Department, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology

(\* - Corresponding Author Email: ali.javadi@ag.iut.ac.ir)

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Aboureihan, University of Tehran

3- Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran