

ارزیابی حساسیت مدل‌های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک

علیرضا سپهوند^{*۱} - مجید طایی سمیرمی^۲ - سید خلاق میرنیا^۳ - حمیدرضا مرادی^۴

تاریخ دریافت: ۸۹/۴/۹

تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۱

چکیده

نفوذ از جمله پدیده‌های مهمی است که متأثر از پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی خاک می‌باشد. به واسطه هزینه زیاد و زمان‌بر بودن اندازه‌گیری نفوذ، تخمین نفوذ با استفاده از مدل‌های نفوذ منطقی به نظر می‌رسد. همچنین با توجه به تغییرپذیری رطوبت خاک در اثر عوامل مختلف، تعیین مدلی مناسب جهت تخمین صحیح نفوذ حائز اهمیت می‌باشد. لذا تحقیق حاضر با هدف تعیین حساسیت مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، فیلیپ، هورتون، سازمان حفاظت خاک آمریکا و گرین-آمیت اصلاح شده نسبت به سطوح مختلف رطوبتی انجام شد. این مطالعه در منطقه‌ای واقع در بخش مورموری استان ایلام و با لحاظ شرایط همگنی خاک و شیب انجام شد. در این تحقیق با ایجاد چهار سطح رطوبتی شاهد، ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر در کرت‌هایی به ابعاد یک متر مربع، اندازه‌گیری نفوذ با استفاده از روش استوانه‌های مضاعف صورت گرفت. در ادامه با استفاده از معیارهای سنجش خطا شامل درصد خطای نسبی (RE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی (EF) و ضریب تبیین (R^2) مدل برتر انتخاب گردید. نتایج نشان داد که در مجموع مدل کوستیاکوف در سطوح مختلف رطوبت خاک، تخمین بهتری را از میزان نفوذ در مقایسه با سایر مدل‌ها از خود نشان داده است. ولی مدل‌های فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا و مدل هورتون با افزایش مقدار رطوبت خاک، مقدار نفوذ را با دقت بالاتری برآورد می‌نمایند. در مجموع مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا نسبت به سایر مدل‌ها کمترین حساسیت را به تغییر سطوح رطوبتی داشته است. بنابراین مدل‌های کوستیاکوف و فیلیپ به‌عنوان مدل‌های مناسب برای تخمین نفوذپذیری خاک توصیه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: نفوذ، مدل‌های نفوذ، استوانه‌های مضاعف، منطقه مورموری

مقدمه

عمدتاً عمودی است. به همین دلیل است که سرعت نفوذ در ابتدا سریع ولی و سپس پس از گذشت مدتی تقلیل یافته و به مقدار ثابتی که فقط نتیجه عمل نیروی ثقل است می‌رسد (۲). ارائه یک مدل جهت تعیین متوسط سرعت نفوذ یک منطقه از نظر هیدرولوژیکی حائز اهمیت می‌باشد. برای تعیین متوسط نفوذ یک منطقه معادلات زیادی معرفی شده که از آن جمله می‌توان به معادلات گرین-آمپ، هورتون، فیلیپ،... اشاره داشت. این معادلات در صورتی که خاک منطقه همگن باشد نتیجه مطلوبی ارائه می‌کنند. اما این خصوصیات به‌ندرت در یک منطقه مشاهده می‌شود زیرا در بین پارامترهای نفوذ، هدایت هیدرولیکی به‌شدت تحت تأثیر تغییرات مکانی است. عموماً مدل‌های نفوذ به مدل‌های فیزیکی، تجربی و نیمه تجربی تقسیم می‌شوند. مدل‌های فیزیکی با استفاده از قوانین و روابط اثبات شده مانند قانون بقای جرم و قانون بقای انرژی و تلفیق آن‌ها و دستیابی به یک سری معادلات ریاضی مانند فیلیپ و گرین-آمپ به دست آمده‌اند. مهم‌ترین حسن این معادلات که بر اساس قوانین فیزیکی وضع شده‌اند و با دانستن برخی خصوصیات فیزیکی خاک معادله نفوذ قابل تعیین است. شیوه دوم استفاده از روابط تجربی از قبیل

مهمترین مشخصه خاک از نظر کشاورزی نفوذ می‌باشد و وارد شدن آب به داخل خاک را نفوذ می‌گویند. مقدار آبی که در یک دوره زمانی مشخص در خاک نفوذ می‌کند نفوذ تجمعی و میانگین سرعت وارد شدن آب به داخل خاک را طی یک دوره زمانی، متوسط سرعت نفوذ و سرعت نفوذ آب به داخل خاک را در یک لحظه معین از زمان را سرعت نفوذ لحظه‌ای گویند (۵). وارد شدن آب به داخل خاک در نتیجه تأثیر توأم نیروهای ثقلی و موئینگی صورت می‌گیرد. نیروی ثقل فقط در جهت قائم عمل می‌کند اما نیروی موئینگی در ابتدا که خاک خشک بوده و منافذ موئین خالی از آب است هم در جهت عمودی و هم در جهت افقی عمل می‌کند ولی بعد از پر شدن منافذ خاک و اشباع شدن خاک تنها نیروی ثقل عمل کرده و جریان نفوذ

۳، ۲، ۱- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

*- نویسنده مسؤل: Email: (sepahvand1982@yahoo.com)

گرین-آمپت اصلاح شده و Hydrus-Id شبیه سازی کردند و نتایج را با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه و دریافتند که نتایج مدل گرین-آمپت اصلاح شده با واقعیت هم‌خوانی بیشتری دارد. نشاط و پاره‌کار (δ) به مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک پرداختند و با مقایسه مدل‌ها اظهار داشتند مدلی که بیشترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین واریانس (S^2) را داشته به عنوان بهترین مدل معرفی شد و بررسی نفوذ روی سه نوع بافت خاک رسی و لوم نشان داد که مدل کوستیاکوف مناسب‌ترین مدل برای برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در کلیه شرایط می‌باشد (۵).

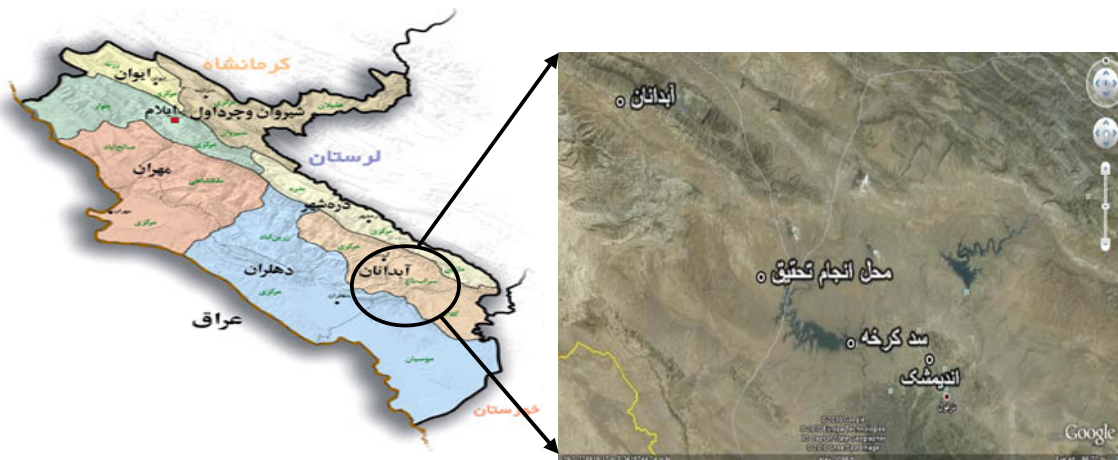
بسته به محتوای رطوبت خاک ویژگی‌های مختلف پدیده نفوذ اعم از سرعت لحظه‌ای، نفوذ تجمعی، متوسط سرعت نفوذ، نفوذ نهایی و هم‌چنین زمان تا تثبیت نفوذ تغییر می‌یابد. بنابراین استفاده از معادلاتی که بتوانند در شرایط مختلف رطوبتی پدیده نفوذ را مدل نمایند غیر قابل اجتناب می‌باشد. بنابراین هدف از تحقیق حاضر تعیین بهترین مدل برای تخمین نفوذ در شرایط مختلف رطوبتی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه با مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 50' 47''$ طول شرقی و $6^{\circ} 38' 32''$ عرض شمالی در بخش مورموری استان ایلام واقع شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه به همراه محل نمونه برداری روی نقشه ایران و استان در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمایش‌ها ابتدا با استفاده از پیمایش صحرایی و با لحاظ شرایط مکانی مناسب، به‌ویژه همگن بودن خاک از لحاظ خصوصیات بافتی و به‌صورت ارائه شده در شکل ۱ تعیین شد. کلاس بافتی خاک منطقه مورد مطالعه با توجه به درصد‌های بافتی رس ۱۴ درصد، سیلت ۵۰ درصد و ماسه ۳۶ درصد، در مرز لوم سیلتی و لومی است.

کوستیاکوف و هورتون است. تأثیر گرفتن از شرایط زمانی، مکانی و نارسایی پارامترهای معادلات در تبیین مفاهیم فیزیکی از نقص‌های عمده این‌گونه معادلات می‌باشد (۴ و ۱۲). در مقایسه بین مدل‌های فیزیکی و تجربی مشخص شده که معادلات فیزیکی جزئیات نفوذ را نسبت به معادلات تجربی بهتر نشان می‌دهند (۱۲). رطوبت اولیه خاک تأثیر زیادی روی مقدار آب نفوذ یافته در طی یک دوره بارش و زمان ثابت شدن نفوذ دارد، هر چه رطوبت اولیه خاک بیشتر باشد سرعت اولیه نفوذ به دلیل کاهش گرادیان مکش کمتر خواهد بود و خاک زودتر به مرحله نفوذ نهائی می‌رسد که در نتیجه آن مقدار زیادی از این بارش به جای نفوذ در خاک و اضافه شدن به منابع آب زیرزمینی روی سطح زمین جاری شده و از دسترس خارج می‌شود (۲ و ۱۰). لذا دانستن میزان آب نفوذ یافته در طول یک بارش برای مدیریت منابع آب و کشاورزی بسیار حائز اهمیت است. برای رسیدن به این مقصود باید برای مقادیر متفاوت رطوبت قبلی خاک بهترین مدل برآورد نفوذ را شناسایی کنیم.

تاکنون در زمینه نفوذ آب در خاک تحقیقات بی شماری صورت گرفته است، در سال ۱۹۵۶ اصول اساسی حرکت آب در خاک توسط داریس ارائه شد. چو و میگل (۶) میزان نفوذ در لایه‌های خاک تحت شرایط مختلف بارش در شرایطی که آب روی سطح خاک جمع شده باشد تعیین نمودند. آن‌ها برای تعیین میزان نفوذ در شرایطی که آب روی سطح خاک جمع شده باشد و در شرایطی که آب روی سطح خاک جمع نشده باشد از مدل گرین-آمپت و مدل عددی استفاده کردند و نتایج را با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که پیش‌بینی دو مدل فوق با مقادیر مشاهداتی انطباق بالایی داشته است. ما و همکاران (۱۳) به مدل‌سازی نفوذ در خاک‌های لایه‌ای با استفاده از مدل گرین-آمپت اصلاح شده و Hydrus-Id پرداختند. آن‌ها فرایند نفوذ را با سه مدل گرین-آمپت اصلاح نشده،



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

برای تعیین مقدار نفوذ تجمعی پیشنهاد کرد. اگر از رابطه فوق مشتق گرفته شود به صورت رابطه ۲ بیان می‌گردد و برای محاسبه نفوذ لحظه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (۷).

$$i(t) = ct^{-a} \quad (1)$$

$$I = \frac{c}{1-a} t^{1-a} \quad (2)$$

در این روابط c و a ضرایب مختلفی برای خاک‌های مختلف بوده و مقدار c و a به ترتیب بزرگتر از صفر و بین صفر تا یک می‌باشد و به روش تجربی تعیین می‌شود، t زمان و i میزان نفوذ در زمان t و I نفوذ تجمعی است (۳).

مدل هورتون: ساده‌ترین و کاربردی‌ترین معادله نفوذ، معادله هورتون می‌باشد. هورتون در سال ۱۹۴۰ پس از مشاهده‌های فراوان درباره چگونگی نفوذ آب در خاک به این نتیجه رسید که ظرفیت نفوذ خاک با افزایش زمان به شدت و تقریباً به صورت توانی نسبت به زمان کاهش می‌یابد، به طوری که در ابتدای بارندگی ظرفیت آن حداکثر f_0 و در نهایت به مقدار ثابت f_c می‌رسد. معادله هورتون به صورت رابطه ۳ بیان می‌گردد (۱).

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

در این رابطه f_t نفوذ در زمان t از شروع بارندگی بر حسب میلی‌متر بر ساعت، f_c شدت نفوذ نهایی بر حسب میلی‌متر بر ساعت، f_0 شدت نفوذ اولیه بر حسب میلی‌متر بر ساعت و t زمان از شروع بارندگی بر حسب ساعت و k ثابت هورتون است که بستگی به کاربری اراضی و جنس خاک دارد.

مدل گرین-آمپت: گرین و آمپت در سال ۱۹۱۱ معادله‌ای در شرایط یکنواخت برای نفوذ ارائه دادند. اساس این رابطه از معادله ریچاردز گرفته شده است (۱۲) که به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود:

$$I = K(H_o + S_w + L) / L \quad (4)$$

در این رابطه K ضریب هدایت هیدرولیکی خاک، H_o ارتفاع آب انباشته شده در سطح خاک، S_w پتانسیل آب خاک در جبهه رطوبتی، L فاصله سطح خاک تا جبهه رطوبتی و I شدت نفوذ می‌باشد (۸). به دلیل اینکه مدل گرین-آمپت قادر نبود طی آزمایش‌هایی پدیده نفوذ را به درستی شبیه‌سازی کند، و بالا بودن ریشه میانگین مربعات خطا، این مدل بعداً در سال ۱۹۸۰ توسط Hachum و Alfara به صورت رابطه ۵ اصلاح شد و مدل اصلاح شده گرین-آمپت را برای تعیین نفوذ در خاک‌هایی با لایه‌بندی مختلف به کار بردند (۶ و ۱۲).

$$I = \frac{A}{i} + B \quad (5)$$

در این معادله I سرعت نفوذ، i نفوذ تجمعی و A و B ضرایبی هستند که از روی آزمایش نفوذ به دست می‌آیند. رابطه گرین-آمپت خیلی

از طرفی خصوصیات مختلف تأثیر گذار بر میزان نفوذ خاک نظیر تخلخل، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت جرمی، رطوبت حجمی خاک و رطوبت واقعی خاک در محدوده مورد بررسی اندازه‌گیری شد که مقادیر آن‌ها به ترتیب ۵۰ درصد، ۱/۴۳ گرم بر سانتی متر مکعب، ۲/۹ درصد، ۴/۱۷ درصد و ۰/۳۹۵ گرم بر سانتی متر مکعب بود.

ابتدا با اضافه کردن حجم آب به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر در پلات یک متر مربعی سطح رطوبتی مورد نظر تأمین شد و بعد از ۶۰ دقیقه از استوانه‌های مضاعف به دلیل معمول بودن شیوه و تأمین اطلاعات مفید در صورت کاربرد صحیح (۱۶) جهت اندازه‌گیری نفوذ به صورت شکل ۲ استفاده شد. برای افزایش دقت نتایج، اندازه‌گیری نفوذ در هر یک از تیمارها با چهار تکرار صورت پذیرفت. همچنین برای ایجاد امکان مقایسه و نیز ارزیابی تأثیر تیمارهای مختلف رطوبت اولیه با شرایط معمول، اندازه‌گیری نفوذ خاک بدون رطوبت با تکرار مشابه نیز لحاظ گردید.



شکل ۲- استوانه‌های مضاعف و پلات ۱ متر مربعی نصب شده در محل تحقیق

نتایج حاصل از تحقیق به دو صورت ترسیم نمودار و مقایسه بین مقادیر واقعی و تخمین حاصل از مدل‌های مختلف نفوذ ارائه گردید. جهت بررسی نموداری نتایج، ابتدا با تهیه بانک اطلاعاتی در نرم افزار EXCEL 2003 یک پایه زمانی مشترک برای تمامی آزمایش‌ها لحاظ گردید. بدین ترتیب پایه زمانی ۹۰ دقیقه با توجه به مدت زمان ثابت شدن سرعت نفوذ در تیمارهای مختلف انتخاب شد و نمودارهای آهنگ تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان در تیمارهای مختلف ترسیم گردید. در ادامه تحقیق با استفاده از مدل‌های کوستیاکوف، گرین-آمپت اصلاح شده، هورتون، SCS و فیلیپ، ضرایب مربوط به نفوذ محاسبه شد.

مدل‌های نفوذ

مدل کوستیاکوف: کوستیاکوف در سال ۱۹۳۲ رابطه تجربی ۱ را

بهبوده یا حالتی که مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند برابر با صفر و مقدار کارایی یا راندمان مدل در این حالت به یک نزدیک می‌شود. مقدار کارایی مدل نیز نشان دهنده صحت برآزش داده‌ها می‌باشد و از منفی بی‌نهایت در بدترین حالت، تا یک در زمان برآزش کامل داده‌ها تغییر می‌کند. از بین مدل‌های مذکور مدلی که از ضریب کارایی بالاتر، درصد خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطا نزدیک به صفر برخوردار باشد به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای تعیین ضرایب نفوذ در تیمار رطوبت مورد نظر انتخاب شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (10)$$

$$RE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \frac{O_i - P_i}{O_i} \quad (11)$$

$$EF = \left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right) / \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \quad (12)$$

در روابط فوق، P_i مقدار برآورد شده، O_i مقدار مشاهده شده، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده و N تعداد داده‌های اندازه‌گیری نفوذ است.

نتایج

ابتدا با استفاده از بانک اطلاعاتی ذخیره شده در نرم افزار اکسل و همچنین با توجه به اثر رطوبت قبلی بر ویژگی‌های متعدد پدیده نفوذ اقدام به محاسبه ویژگی‌هایی از قبیل نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ، متوسط سرعت نفوذ، سرعت نفوذ نهایی، متوسط نرخ کاهش نفوذ و زمان تا لحظه تثبیت نفوذ نموده که نتایج حاصل از این محاسبات در جدول ۱ آمده است.

بر اساس مقادیر حاصله بیشترین و کمترین نفوذ تجمعی به ترتیب متعلق به تیمار شاهد و تیمار رطوبت ۱۵ لیتر می‌باشد. همچنین حداکثر سرعت نفوذ با مقدار ۲۰/۴ سانتی‌متر بر ساعت متعلق به تیمار شاهد و حداقل آن متعلق به تیمار رطوبت ۱۵ لیتر می‌باشد. ابتدا با استفاده از رابطه ۱۳ اقدام به محاسبه متوسط سرعت نفوذ نموده که بر این اساس بیشترین و کمترین متوسط سرعت نفوذ به ترتیب در تیمار شاهد و تیمار رطوبت ۱۵ لیتر مشاهده گردید.

$$\bar{I} = \frac{CF}{T} \quad (13)$$

که در این رابطه \bar{I} متوسط سرعت نفوذ، CF مقدار نفوذ تجمعی در کل مدت زمان اندازه‌گیری نفوذ و T کل زمان اندازه‌گیری (۱/۵ ساعت) محسوب می‌گردد. در ادامه پارامتر سرعت نفوذ نهایی مورد محاسبه قرار گرفت که بر اساس محاسبات بیشترین آن در تیمار شاهد و کمترین مقدار آن در تیمارهای رطوبت ۱۰ و ۱۵ لیتر ارزیابی گردید متوسط شیب کاهش نفوذ در تعیین اثرات رطوبت بر روند

ساده است و پارامترهای آن را می‌توان به‌سادگی از روی خصوصیات فیزیکی خاک به‌دست آورد (۱۱). بنابراین مدل اصلاح شده گرین-آمپت به وفور در تحقیقات هیدرولوژی هم‌چون مدل SWAT (۹) و مدل‌های فرسایش مثل WEPP (۹) کاربرد دارد. به‌همین دلیل در این تحقیق به‌جای مدل گرین-آمپت از مدل گرین-آمپت اصلاح شده استفاده شد.

مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا^۱ (SCS): کارشناسان

سازمان حفاظت خاک آمریکا در سال ۱۹۸۹ بر اساس مدل کوستیاکوف آزمایش‌های زیادی در مزارع انجام دادند که نهایتاً منجر به روشی در محاسبه نفوذ گردید که به مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا معروف است و به صورت رابطه ۶ ارائه گردید:

$$i(t) = at^b + c \quad (6)$$

در این رابطه، a می‌تواند بر حسب اینچ یا سانتی‌متر (بسته به این‌که i بر حسب اینچ یا سانتی‌متر بیان شود) توصیف شود. ضرایب a و b تابعی از شماره منحنی نفوذ بوده که از جدول استاندارد SCS استخراج می‌گردد (۵).

مدل فیلیپ: فیلیپ در سال ۱۹۵۷ معده ریچاردز را برای جریان

غیر اشباع به صورت سری توابع توانی حل نمود و به صورت رابطه ۷ ارائه کرد:

$$I(t) = St^{\frac{1}{2}} + (K_2 + K_0)t + K_3t^{\frac{3}{2}} + K_4t^2 + \dots + K_nt^{\frac{n}{2}} \quad (7)$$

در این رابطه n از صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کند. در عمل معادله ساده شده فیلیپ برای تعیین نفوذ تجمعی به صورت رابطه ۸ به کار می‌رود:

$$I(t) = St^{\frac{1}{2}} + Kt \quad (8)$$

اگر از رابطه ۸ مشتق گرفته شود به صورت رابطه ۹ بیان می‌گردد و برای محاسبه نفوذ لحظه‌ای از آن استفاده می‌گردد (۱۴).

$$i(t) = \frac{1}{2}St^{-\frac{1}{2}} + K \quad (9)$$

در این رابطه K ضریب ثابت و تابع هدایت هیدرولیکی خاک بوده و S ضریب جذبی خاک نام دارد. ضرایب K و S از طریق برآزش بهترین نمودار به داده‌های مشاهده‌ای به‌دست می‌آیند (۷).

سپس برای ارزیابی دقت مدل‌های نفوذ از پارامترهای آماری خطای نسبی^۲ (RE)، ضریب کارایی مدل^۳ (EF) و ریشه میانگین مربعات خطا^۴ (RMSE) استفاده شد. ریشه میانگین مربعات خطای نسبی مبنی اختلاف کلی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمینی بوده و میانگین کامل انحراف و درصد خطای نسبی در حالت

- 1- Soil Conservation Service
- 2- Relative Error
- 3- Modeling Efficiency
- 4- Root Mean Square Error

تغییرات سرعت نفوذ در زمان‌های مختلف حائز اهمیت بوده که با توجه به این مساله این پارامتر با استفاده از رابطه ۱۴ مورد محاسبه قرار گرفت.

$$I_r = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{T} \quad (14)$$

در این رابطه I_r متوسط شیب کاهش نفوذ نسبت به زمان (سانتی‌متر بر مجذور ساعت)، I_{\max} و I_{\min} به ترتیب حداکثر و حداقل سرعت نفوذ (سانتی‌متر بر ساعت) و T کل مدت زمان اندازه‌گیری نفوذ بر حسب ساعت است. با توجه به این رابطه حداکثر و حداقل شیب کاهش نفوذ به ترتیب در تیمار شاهد و تیمار رطوبت ۱۵ لیتر مشاهده شد. در ادامه زمان تا لحظه تثبیت نفوذ برای تمامی حالات محاسبه شد که نتایج حاکی از طولانی‌ترین زمان برای تیمار شاهد می‌باشد. این در حالی است که کوتاه‌ترین زمان تا لحظه تثبیت نفوذ متعلق به تیمار رطوبت ۱۵ لیتر می‌باشد. برای مقایسه کلی تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان اقدام به ترسیم نمودارهای مربوط به نفوذ آب در تیمارهای مختلف رطوبت نموده که نتایج حاصله در شکل ۳ آمده -

است.

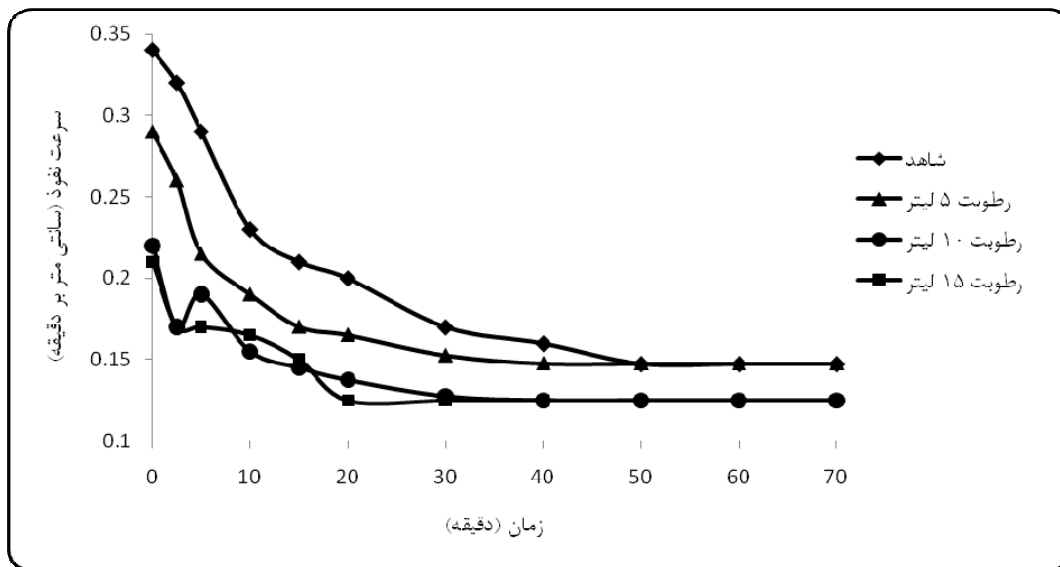
با توجه به این نمودارها بیشترین سرعت نفوذ در تیمار شاهد مشاهده می‌شود. در صورتی که کمترین سرعت نفوذ در تیمار رطوبت ۱۵ لیتر ارزیابی می‌گردد. بر اساس شکل ۳ هر چه رطوبت اولیه بیشتر شده است زمان تثبیت شدن نفوذ کاهش یافته است.

معیارهای سنجش خطا در رابطه با هر یک از مدل‌ها و سطوح رطوبتی جهت مقایسه و انتخاب مدل در قالب جداول ۲ تا ۵ آورده شده است.

محاسبه معیارهای سنجش خطا در رابطه با تیمار شاهد، ارائه شده در جدول ۲ حاکی از آن است که مدل کوستیاکوف به ترتیب از ضرایب کارایی و تبیین ۰/۹۷۹ و ۰/۹۶۷ و هم‌چنین ریشه میانگین مربعات خطا و درصد خطای نسبی به ترتیب ۰/۰۷۳ و ۰/۴۱۸ برخوردار است. این در حالی است که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در قیاس با سایر مدل‌ها از ضرایب کارایی و تبیین پایین‌تری برخوردار است.

جدول ۱- ویژگی‌های مختلف مورد اندازه‌گیری نفوذ در تیمارهای سطوح مختلف رطوبت

تیمار	نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) تا زمان ۷۰ دقیقه	حداکثر سرعت نفوذ (سانتی‌متر بر ساعت)	متوسط سرعت نفوذ (سانتی‌متر بر ساعت)	سرعت نفوذ نهایی (سانتی‌متر بر ساعت)	زمان تا لحظه تثبیت نفوذ (ساعت)	شیب کاهش نفوذ (سانتی‌متر بر مجذور ساعت)
شاهد	۲/۶۷	۲۰/۴	۱/۷۸	۹	۱	۱۴/۴
۵ لیتر	۲/۳۲۹	۱۷/۴	۱/۵۵۳	۸/۸۲	۰/۸۳	۱۱/۵۲
۱۰ لیتر	۱/۸۹۵	۱۳/۲	۱/۲۶۳	۷/۵	۰/۶۷	۸/۲
۱۵ لیتر	۱/۸۶۵	۱۲/۶	۱/۲۴۳	۷/۵	۰/۵	۷/۶



شکل ۳- آهنگ تغییرات سرعت نفوذ در شرایط مختلف رطوبتی خاک

جدول ۲- معیارهای سنجش خطا برای هر یک از مدل‌ها در سطح رطوبتی شاهد

نوع مدل	ضریب کارایی	ریشه میانگین مربعات خطا	درصد خطای نسبی	ضریب تبیین
کوستیاکوف	۰/۹۷۹	۰/۰۷۳	-۰/۴۱۸	۰/۹۶۷
گرین-آمیت اصلاح شده	۰/۸۵۷	۰/۸۱۵	-۱۷/۱۰	۰/۸۵۷
هورتون	۰/۸۷۴	۰/۷۶۴	-۰/۲۴۶	۰/۹۳۵
سازمان حفاظت خاک آمریکا	۰/۶۹۷	۰/۲۷۸	-۱۷/۶۳	۰/۲۳۹
فیلیپ	۰/۸۹۰	۰/۱۶۷	-۳/۵۲۷	۰/۹۳۴

جدول ۳- معیارهای سنجش خطا برای هر یک از مدل‌ها در سطح رطوبتی ۵ لیتر

نوع مدل	ضریب کارایی	ریشه میانگین مربعات خطا	درصد خطای نسبی	ضریب تبیین
کوستیاکوف	۰/۹۸۷	۰/۰۶۶	-۰/۳۲۳	۰/۹۷۷
گرین-آمیت اصلاح شده	۰/۸۶۰	۰/۰۱۷	-۱۳/۲۳	۰/۸۶۰
هورتون	۰/۷۵۸	۱/۰۶۲	۱۰/۱۱	۰/۸۶۹
سازمان حفاظت خاک آمریکا	۰/۷۴۴	۰/۲۷۴	-۱۶/۸۲	۰/۲۸۴
فیلیپ	۰/۹۲۰	۰/۱۶۳	-۲/۹۱۶	۰/۹۳۶

جدول ۴- معیارهای سنجش خطا برای هر یک از مدل‌ها در سطح رطوبتی ۱۰ لیتر

نوع مدل	ضریب کارایی	ریشه میانگین مربعات خطا	درصد خطای نسبی	ضریب تبیین
کوستیاکوف	۰/۹۸۸	۰/۰۴۹	-۰/۲۲۶	۰/۹۸۶
گرین-آمیت اصلاح شده	۰/۹۳۹	۰/۳۷۲	۳/۷۲۵	۰/۹۳۹
هورتون	۰/۸۸۱	۰/۵۱۸	۴/۹۹۲	۰/۸۶۸
سازمان حفاظت خاک آمریکا	۰/۶۳۱	۰/۲۸۷	-۲۹/۹۵	۰/۰۰۹
فیلیپ	۰/۹۳۲	۰/۱۲۲	-۲/۳۴۵	۰/۹۵۳

جدول ۵- معیارهای سنجش خطا برای هر یک از مدل‌ها در سطح رطوبتی ۱۵ لیتر

نوع مدل	ضریب کارایی	ریشه میانگین مربعات خطا	درصد خطای نسبی	ضریب تبیین
کوستیاکوف	۰/۹۸۷	۰/۰۵۱	-۰/۲۴۷	۰/۹۸۵
گرین-آمیت اصلاح شده	۰/۹۰۵	۰/۴۴۸	-۱۱/۲۵	۰/۹۰۶
هورتون	۰/۶۴۹	۰/۸۶۴	۲۲/۴۲	۰/۶۹۰
سازمان حفاظت خاک آمریکا	۰/۵۹۱	۰/۲۹۶	-۳۲/۱۲	۰/۰۱۱
فیلیپ	۰/۹۳۲	۰/۱۲۲	-۲/۳۹	۰/۹۴۷

ترتیب دارای ضرایب کارایی و تبیین ۰/۹۸۸ و ۰/۹۸۶ بوده و ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۰۴۹ می‌باشد. این در حالی است که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در قیاس با سایر مدل‌ها از ضرایب کارایی و تبیین پایین‌تری برخوردار است.

محاسبه معیارهای سنجش خطا در رابطه با تیمار رطوبت ۱۵ لیتر، ارائه شده در جدول ۵ حاکی از آن است که مدل کوستیاکوف به ترتیب از ضرایب کارایی و تبیین ۰/۹۸۷ و ۰/۹۸۵ و هم‌چنین دارای ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۰۵۱ است. این در حالی است که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در قیاس با سایر مدل‌ها دارای

محاسبه معیارهای سنجش خطا در رابطه با تیمار رطوبت ۵ لیتر، ارائه شده در جدول ۳ حاکی از آن است که مدل کوستیاکوف به ترتیب از ضرایب کارایی و تبیین ۰/۹۸۷ و ۰/۹۶۷ بر خوردار بوده و هم‌چنین مدل گرین-آمیت اصلاح شده دارای ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۰۱۷ است. این در حالی است که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در قیاس با سایر مدل‌ها از ضرایب کارایی و تبیین پایین‌تری برخوردار است.

محاسبه معیارهای سنجش خطا در رابطه با تیمار رطوبت ۱۰ لیتر، ارائه شده در جدول ۴ حاکی از آن است که مدل کوستیاکوف به

ضرایب کارایی و تبیین پایین‌تری برخوردار است.

بحث و نتیجه گیری

با توجه به شکل ۳ هر چه میزان رطوبت اولیه زیاد شده میزان نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ، متوسط سرعت نفوذ، سرعت نفوذ نهایی، متوسط نرخ کاهش نفوذ و زمان تا لحظه تثبیت نفوذ کاهش یافته که این کاهش به دلیل صفر شدن نیروی ماتریک است، زیرا نفوذ متأثر از دو نیروی ماتریک و ثقل می‌باشد که پس از مدتی نیروی ماتریک صفر شده و فقط نیروی ثقل موجب نفوذ شده که میزان آن نسبت به نیروی ماتریک خیلی کم است (۱۵). نتایج مندرج در جدول ۲ هم‌چنین نشان می‌دهد که متوسط نرخ کاهش نفوذ و حداکثر سرعت نفوذ بیش‌ترین تأثیر از سطوح رطوبت ۱۰ و ۱۵ لیتر را پذیرفته است. سطح رطوبت ۵ لیتر نتوانسته بلافاصله سرعت اولیه که به‌طور متداول حداکثر سرعت نفوذ را به خود اختصاص می‌دهد دچار افت نماید. بنابراین سرعت حداکثر، کم‌تر تحت تأثیر رطوبت اولیه قرار گرفته، اما سطوح رطوبت ۱۰ و ۱۵ لیتر سرعت اولیه را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه آن سرعت نفوذ نهایی را بیشتر کاهش داده است. بنابراین اثر سطوح رطوبت ۱۰ و ۱۵ لیتر در کاهش سرعت نهایی نفوذ حداکثر بوده است. هر چه میزان رطوبت اولیه بیشتر شده اختلاف بین مقادیر این پارامترها کمتر شده است که این عامل متأثر از تأثیر کم رطوبت اولیه در مقادیر بالاست. علاوه بر موارد فوق همان‌طوری که در جدول ۲ و شکل ۳ مشاهده می‌شود بیشترین تأثیر سطوح رطوبت بالا بر روی زمان تا لحظه تثبیت نفوذ می‌باشد. که در سطح رطوبت ۱۵ لیتر این کاهش ۵۰ درصد است. هم‌چنین در شکل ۳ مشاهده می‌شود که در سطح رطوبت ۱۰ لیتر پس از کاهش اولیه یک افزایش میزان نفوذ وجود دارد که این افزایش به‌طور عمده مبین نقش مقیاس مکانی بر تغییر الگوی منحنی‌های نفوذ می‌باشد که در این راستا سرکار و همکاران (۱۵) نیز بر اهمیت نقش مقیاس مکانی بر تغییر شکل منحنی‌های نفوذ اذعان داشته‌اند.

محاسبه معیارهای سنجش خطا در رابطه با تیمار شاهد، ارائه شده در جدول ۳ حاکی از آن است که مدل کوستیاکوف به ترتیب با ضرایب کارایی و تبیین ۰/۹۷۹ و ۰/۹۶۷ و هم‌چنین ریشه میانگین مربعات خطا و درصد خطای نسبی به ترتیب ۰/۰۷۳ و ۰/۴۱۸ به‌عنوان مدل برتر انتخاب می‌گردد. این در حالی است که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در قیاس با سایر مدل‌ها از ضرایب کارایی و تبیین پایین‌تری برخوردار است. بنابراین به‌عنوان نامناسب‌ترین تخمین‌گر نفوذ انتخاب شد. هم‌چنین معیارهای سنجش خطای محاسبه شده برای تیمار شاهد نشان می‌دهد که تمامی مدل‌ها دچار

کم تخمینی^۱ شده‌اند.

در ادامه بررسی معیارهای سنجش خطای مدل‌ها برای تیمارهای ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر دلالت بر آن دارد که مشابه با تیمار شاهد مدل کوستیاکوف کماکان از قابلیت بالا در تخمین نفوذ برخوردار بوده و مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا مطابق با تیمار شاهد دارای عملکرد ضعیفی بوده است. تحلیل کلی نتایج مندرج در جداول ۲ تا ۵ مبین آن است که ضرایب کارایی و تبیین مدل کوستیاکوف تا سطح رطوبتی ۱۰ لیتر افزایش داشته و هم‌چنین درصد خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطا نیز تا سطح رطوبتی مذکور کاهش داشته است. با آن‌که با افزایش میزان رطوبت (۱۵ لیتر) نسبت به سطح رطوبتی متوسط (۱۰ لیتر) ضرایب تبیین و کارایی کاهش و درصد خطای نسبی و میانگین مربعات خطا افزایش یافته است. اما دقت مدل کاهش نداشته است و با ۱۰ لیتر تفاوت محسوسی ندارد. حتی دقت مدل کوستیاکوف در سطح رطوبتی ۱۵ لیتر بیشتر از شاهد و ۵ لیتر است. در صورتی که مدل هورتون در شرایط رطوبتی پایین عملکرد مناسب‌تری داشته است به‌طوری که با افزایش سطح رطوبت ضرایب کارایی و تبیین کاهش داشته و میانگین مربعات خطا و درصد خطای نسبی در رطوبت ۱۵ لیتر افزایش یافته است. مدل گرین-آمپت اصلاح شده در تحقیق حاضر نسبت به تغییرات سطح رطوبتی عملکردی تقریباً مشابه با مدل کوستیاکوف داشته است و با افزایش رطوبت تا سطح رطوبتی متوسط (۱۰ لیتر) ضرایب تبیین و کارایی آن افزایش و درصد خطای نسبی و میانگین مربعات خطا کاهش می‌یابد و در سطح رطوبتی بالا (۱۵ لیتر) بالعکس از دقت آن کاسته می‌شود. که این نتایج با نتایج ما و همکاران (۱۳) هم‌خوانی دارد. مدل فیلیپ و سازمان حفاظت خاک آمریکا نسبت به تغییر میزان رطوبت حساسیت قابل توجهی نداشته‌اند، به‌ویژه در مورد مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا چنین نیست. در این زمینه نشاط و پاره‌کار (۵) نشان دادند که مدل کوستیاکوف از قابلیت بالایی تخمین نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در قیاس با مدل‌های فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا، گرین-آمپت اصلاح شده و هورتون برخوردار بود که از این حیث منطبق با نتایج تحقیق حاضر می‌باشد. ولی در مجموع در تمام سطوح رطوبتی دقت مدل فیلیپ بعد از مدل کوستیاکوف بیشتر از سایر مدل‌هاست و به‌عنوان دومین مدل برتر انتخاب می‌شود.

منابع

- ۱- صفوی ح.ر. ۱۳۸۵. هیدرولوژی مهندسی، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۶۰۳ ص.
- ۲- علیزاده ا. ۱۳۸۳. فیزیک خاک، انتشارات دانشگاه فردوسی، ۴۳۸ ص.
- ۳- علیزاده ا. ۱۳۸۵. اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ بیست و سوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۸۰۸ ص.
- ۴- محمدی م.ح. و رفاهی ح.ق. ۱۳۸۴. تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۶(۶): ۱۳۹۱-۱۳۹۸.
- ۵- نشاط ع. و پاره‌کار م. ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۳): ۱۰-۱.
- 6- Chu X., and Miguel A.M. 2005. Determination of ponding condation and infiltration into layered soils undfr unsteady rainfall. *Journal of hydrology*, 313:195-207.
- 7- Delleur J.W. 2007. *The Handbook of Groundwater Engineering*. 2nd Edition, CRC Press, Taylor & Francis, 1342pp.
- 8- Esteves M., Faucher S., Galle S., and Vauclin M. 2000. Overland flow and infiltration modeling for small plots during unsteady rainfall. *Journal of hydrology*, 228:265-282.
- 9- Flanagan D.C., Ascough J.C., Nearing M.A., and Laflen J.M. 2001. The Water Erosion Prediction Project (WEPP) modem. In: Harmon, R.S., Doe III, W.W., (Eds), *Land-scape Erosion and Evolution Modeling*. Kluwer Acad. Publ., Norwell, MA, pp: 145-199.
- 10- Gandolfi C., and Savi F. 2000. A Mathematical Model for the Coupled Simulation of Surface Runoff and Infiltration. *Engineering Resource*, 75: 49-55.
- 11- Govindaraju R.S., Corradini C., and Morbidelli R. 2006. A semi-analytical model of expected areal-average infiltration under spatial heterogeneity of rainfall and soil saturated hydraulic conductivity. *Journal of Hydrology*, 316: 184-194.
- 12- Loaiciga H.A., and Huang A. 2007. Ponding analysis with Green-Ampt infiltration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(1):109-112.
- 13- Ma Y., Feng S., Su D., Gao G., and Huo Z. 2009. Modeling Water Infiltration in a Large Layered Soil Column With a Modified Green- Ampt Model and HYDRUS-1 D. *Computers in Agriculture*, doi: 10.1016/j. compag. 2009. 07.006
- 14- Philip J.R. 1957. The theory of infiltration, Moisture profiles and relation to experiment. *Soil Sci*, 84: 163-175.
- 15- Sarkar R., Dutta S., and Panigrahy S. 2008. Effect of scale on infiltration in a macropore-dominated hillslope. *Currunt Science*, 94: 490-494.
- 16- Ward A.D., Trimble S.W. 2004. *Environmental Hydrology*. Second Edition, CRC Press LLC, Pp 475.



Assessing the Sensitivity of Infiltration Models to Variability of Soil Moisture

A. Sepahvand^{1*} - M. Taie Semiromi² - S.K. Mirnia³ - H.R. Moradi⁴

Received:30-6-2010

Accepted:20-2-2011

Abstract

Infiltration is one of the most important phenomena which is affected by the soil physical and hydraulic characteristics. Measurement of infiltration needs the high cost and is time consuming, therefore estimation of infiltration is necessary. Also, due to variability of soil moisture, it is important to determine the appropriate model for the estimating the infiltration rate. The present study was carried out for determining the sensitivity of infiltration models including Kostiakov, Philip, Horton, Soil Conservation Service (SCS) and modified Green – Ampt models at different levels of the soil moisture. To consider the homogeneity of soil and slope, this research carried out in Mour Mouri region, of Ilam province. In this study the infiltration rate was measured by using Double Ring Infiltrometer in the prepared plats (1 m²) at four levels of soil moisture, including control (0), 5, 10 and 15 liters. Afterward the best model was selected by some criteria of error assessment, such as percentage of relative error (RE), root mean square error (RMSE), modeling efficiency coefficient (EF) and coefficient of determination (R²). The results showed that generally, the Kostiakov model can estimate the infiltration rate better than other infiltration models with increasing the soil moisture, the precision of Horton model increased.

Keywords: Infiltration, Models infiltration, Double Ring Infiltrometer, Mour Mouri region

1,2,3,4- MSc Student, Farmer MSc Student, Associate Professor and Assistant Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resource, University of Tarbiat Modares, Respectively
(* - Corresponding Author Email: Sepahvand1982@yahoo.com)