



دانشگاه گیلان

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد هفدهم، شماره سوم، ۱۳۸۹
www.gau.ac.ir/journals

برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک با استفاده از توابع انتقالی در خاک‌های آهکی

فرزین پرچمی عراقی^۱، * سیدمجید میرلطیفی^۲، شجاع قربانی دشتکی^۳
و محمدحسین مهدیان^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه تربیت مدرس تهران،
^۲ دانشیار گروه آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ^۳ استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه شهرکرد،
^۴ استادیار سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهران
تاریخ دریافت: ۸۸/۹/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۱۶

چکیده

به منظور جلوگیری از تخریب اراضی و آلودگی خاک و آب، شناخت فرآیندهای مربوطه و کمی نمودن روابط بین آن‌ها امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. فرآیند نفوذ آب به خاک یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژی است. از سوی دیگر، اندازه‌گیری آن دشوار، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. در این پژوهش، امکان برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک، در زمان‌های مشخصی از آغاز فرآیند نفوذ با استفاده از ویژگی‌های زودپافت خاک و به کمک توابع انتقالی خاک مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری به روش استوانه‌های مضاعف در ۲۱۰ نقطه از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری شد. خاک‌ها در محدوده بافتی لوم تا رسی قرار داشت. همچنین، با حفر پروفیل در نزدیکی نقاط اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک، لایه‌های پدوژنیک خاک مشخص و از دو افق بالایی نمونه‌برداری و ویژگی‌های رطوبت اولیه، جرم ویژه ظاهری خاک، فراوانی نسبی ذرات، میزان ماده آلی، درصد سنگ‌ریزه، میزان آهک، ظرفیت زراعی و رطوبت پژمردگی دایم اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از این ویژگی‌ها و رگرسیون چندگانه گام به گام، توابعی پارامتریک برای برآورد نفوذ تجمعی در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰، ۲۴۰ و ۲۷۰ دقیقه از ابتدای آزمایش نفوذپذیری و زمان نفوذ پایه پی‌ریزی گردید. نتایج اعتباریابی توابع پی‌ریزی شده بیانگر آن بود که تمامی توابع پی‌ریزی شده، نفوذ تجمعی را کم‌برآورد نموده‌اند. همچنین، با افزایش زمان از

* مسئول مکاتبه: mirlat_m@modares.ac.ir

ابتدای آزمایش نفوذپذیری، مقدار آماره ریشه میانگین مربعات خطا افزایش یافت. مقادیر آماره کارایی مدل در تمامی توابع استخراج شده مقداری مثبت و به‌طورکلی، با گذشت زمان از ابتدای آزمایش نفوذپذیری، دارای روندی افزایشی بود. این امر بیانگر آن بود که با افزایش زمان از ابتدای آزمایش نفوذپذیری، کارایی مدل‌های رگرسیونی پی‌ریزی شده، بهبود یافته است. همچنین، توابع انتقالی پی‌ریزی شده منحنی نفوذ تجمعی را با میانگین خطایی برابر با $6/90$ سانتی‌متر برآورد نمودند. نتایج نشان داد که در سطح احتمال ۱ درصد، می‌توان منحنی نفوذ تجمعی برآورد شده را به‌عنوان یکی از تکرارهای یک آزمایش نفوذپذیری معتبر پذیرفت.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی خاک، فرآیند نفوذ، مدل کوستیاکوف- لوییز، نفوذ تجمعی

مقدمه

نفوذ آب به خاک به‌عنوان فرآیند اولیه ورود آب از سطح خاک به داخل ناحیه غیراشباع خاک می‌باشد. این فرآیند نقشی بسیار مهم در چرخه آبی طبیعت ایفا می‌نماید. نفوذ آب به خاک مهم‌ترین منبع تامین‌کننده آب برای ادامه حیات گیاهان می‌باشد (ترنر، ۲۰۰۶). کمی کردن پدیده نفوذ آب به خاک در مدیریت حوزه‌های آبخیز از اهمیت بسیاری برخوردار است (موخیبیر، ۲۰۰۸). پیش‌بینی سیل خیزی، فرسایش خاک و انتقال آلاینده‌ها همگی به‌میزان روان‌آب ایجاد شده بستگی دارد که خود به‌طور مستقیم به پدیده نفوذ آب به خاک وابسته می‌باشد (زانیس، ۲۰۰۶). همچنین، کمی کردن نفوذ آب به خاک، به‌منظور تعیین مقدار آب قابل دسترس برای رشد گیاه و تخمین مقدار آب اضافی مورد نیاز که باید از طریق آبیاری برای رشد گیاه تامین شود و نیز طراحی سیستم‌های آبیاری دارای اهمیت می‌باشد.

اهمیت فرآیند نفوذ سبب گردیده است، مدل‌های فیزیکی و تجربی گوناگونی به‌منظور کمی نمودن آن ارایه گردد (آرجیرو کاسترتیس و کرکایدز، ۲۰۰۳؛ ویلر، ۲۰۰۵). از آنجا که فرضیه‌ها و پارامترهای به‌کار رفته در هر یک از این مدل‌ها با هم متفاوت است، بنابراین کارایی هر یک به فرضیه‌های به‌کار رفته در استخراج آن‌ها و دسترسی به داده‌های مورد نیاز هر یک از این مدل‌ها محدود می‌گردد (سای، ۲۰۰۶). همچنین، از آنجا که ویژگی‌های خاک دارای تغییرات پیوسته زمانی و مکانی است، تعمیم نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری خالی از اشکال نخواهد بود. تغییرات مکانی خاک سبب تغییرات بسیار زیادی در نفوذپذیری خاک می‌گردد (ماچیوال و همکاران، ۲۰۰۶). همین‌طور، در بعضی از مدل‌های

ارایه شده ضرایب ثابتی وجود دارد که به دلیل تعیین مقادیر آن‌ها براساس اطلاعات مربوط به تعدادی محدود از نمونه‌های خاک، کاربرد آن‌ها را با خطا همراه می‌کند. بنابراین برای کاربرد این مدل‌ها، انجام آزمایش‌هایی به منظور واسنجی و تعیین پارامترهای آن‌ها الزامی است. اما اندازه‌گیری این ویژگی‌ها پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد. همین‌طور، مقادیر به دست آمده برای این ضرایب فقط در صورتی قابل استفاده است که شرایط خاک از نظر خصوصیات فیزیکی آن، مشابه با شرایط خاک در زمان تعیین این ضرایب باشد.

از این‌رو، پژوهش‌هایی به منظور برآورد این پارامترها با استفاده از روش‌های غیرمستقیم و ویژگی‌های زود یافت خاک مانند جرم ویژه ظاهری و فراوانی نسبی ذرات که اندازه‌گیری آن‌ها ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌باشد، صورت گرفته است (جین و کومار، ۲۰۰۴؛ محمدی و رفاهی، ۲۰۰۵؛ قربانی دشتکی و همایی، ۲۰۰۷؛ قربانی دشتکی و همکاران، ۲۰۰۹b). یکی از روش‌های غیرمستقیم که در سال‌های اخیر در برآورد دیگر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته است، پی‌ریزی توابع انتقالی خاک^۱ می‌باشد. تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از اطلاعات موجود خاک که به وسیله معادلات رگرسیونی صورت می‌گیرد، توابع انتقالی خاک نامیده می‌شود (بوما، ۱۹۸۹). در این روش تلاش بر آن است تا ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با حداکثر دقت، کم‌ترین هزینه و در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با استفاده از اطلاعات و داده‌های موجود در بیش‌تر مطالعات خاک‌شناسی برآورد گردد. تاکنون، پژوهش‌هایی متعدد در زمینه برآورد منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی صورت گرفته است. اما در زمینه مدل‌سازی فرآیند نفوذ آب به خاک پژوهش‌هایی انگشت‌شمار در دست می‌باشد. طی پژوهشی، محمدی و رفاهی (۲۰۰۵) با استفاده از داده‌های نفوذ جمع‌آوری شده در خاک‌های بدون درز و ترک مناطق مختلف کشور استرالیا، امکان برآورد پارامترهای مدل‌های کوستیاکوف (۱۹۳۲)، فیلیپ (۱۹۵۷) و هورتون (۱۹۴۰) را مورد بررسی قرار دادند. به منظور پی‌ریزی توابع انتقالی از روش رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام استفاده شد. در این پژوهش، توابع انتقالی برای تمام پارامترهای مدل‌های کوستیاکوف و فیلیپ به دست آمد. اما رابطه خطی معنی‌داری بین پارامتر نمایی مدل هورتون و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده استخراج نگردید. همچنین، پارامترهای برآورد شده برای مدل کوستیاکوف با داده‌های واقعی مطابقت بیش‌تری داشت.

قربانی‌دشتکی (۲۰۰۸) امکان دست‌یابی به توابعی تخمین‌گر برای برآورد پارامترهای مدل‌های نفوذ فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز (مزنسو، ۱۹۴۸) و هورتون را مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی دو افق سطحی خاک و به کمک رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام، توابع انتقالی برای برآورد پارامترهای مدل‌های یاد شده در سه کاربری آیش، مرتع و گندم پی‌ریزی شد. در این پژوهش، پی‌ریزی توابع انتقالی برای تمامی پارامترهای مدل فیلیپ در کاربری آیش و مدل هورتون در کاربری گندم، امکان‌پذیر نگردید. همچنین، نتایج اعتباریابی توابع پی‌ریزی شده بیانگر آن بود که این توابع نفوذ تجمعی در برخی از خاک‌ها را مقداری منفی برآورد کردند. نتایج نشان داد توابع پی‌ریزی شده برای برآورد پارامترهای مدل فیلیپ و هورتون با میانگین خطای به ترتیب، برابر با ۹/۳۹ و ۹/۹۱ سانتی‌متر دارای بهترین عملکرد در برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک بود.

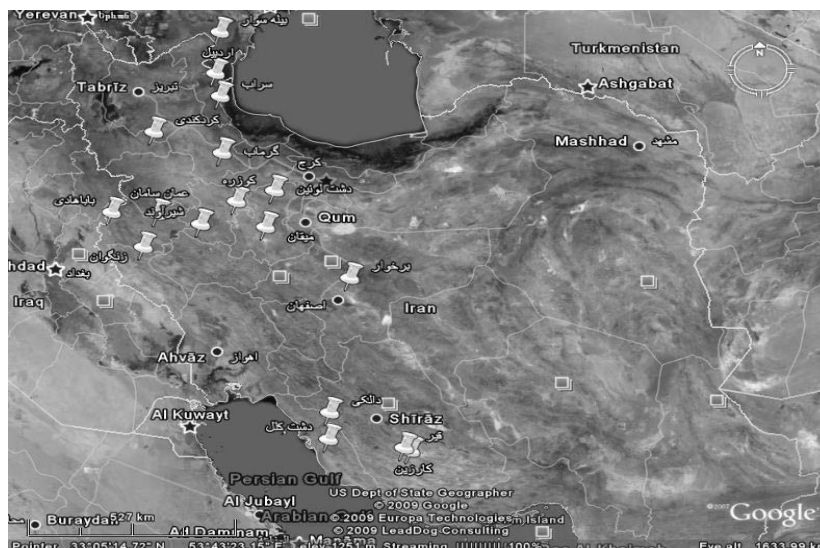
همان‌طور که اشاره شد، محدود پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی نفوذ، در ارتباط با برآورد پارامترهای مدل‌های نفوذ بوده است. اما هر یک از مدل‌های نفوذ نیز دارای فرضیه‌ها و محدودیت‌های خاص خود می‌باشد. به گونه‌ای که تطابق نداشتن فرضیه‌های به‌کار رفته در ساختار مفهومی مدل‌های نفوذ با شرایط واقعی، سبب کاهش دقت آن‌ها در برآورد نفوذ آب به خاک شده است (ترنر، ۲۰۰۶). همچنین، هر یک از پارامترهای این مدل‌ها نیز دارای حساسیت‌های متفاوتی می‌باشند. از سوی دیگر، در صورتی که پارامترهای مدل‌های نفوذ از طریق برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تعیین گردد، هر مدل با خطاهای متفاوتی بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش می‌یابد. همچنین، در هنگام برازش مدل‌های نفوذ، مقادیر این پارامترها باید در دامنه مقادیر معقول فیزیکی خود قرار داشته باشد. این امر می‌تواند سبب افزایش خطای برآورد پارامترهای نفوذ و در نتیجه برآورد نفوذ اندازه‌گیری شده گردد. همچنین بازه زمانی، که پارامترهای برآورد شده در آن صدق می‌کنند، مشخص نمی‌باشد. چالش دیگری که فراروی این رویکرد وجود دارد آن است که زمانی نفوذ اندازه‌گیری شده قابل برآورد می‌باشد که توابع برآوردکننده برای تمامی پارامترهای موجود در یک مدل قابل استخراج باشند. اما همان‌طور که اشاره شد، نتایج محدود پژوهش‌های صورت گرفته بیانگر آن است که به دلیل استخراج نشدن توابع انتقالی برای برخی از پارامترهای یک مدل معین، برآورد نفوذ اندازه‌گیری شده امکان‌پذیر نگشته است. همین‌طور، در صورتی که مقادیر برآورد شده برای هر یک از این پارامترها در دامنه مقادیر معقول فیزیکی خود قرار نداشته باشد، این مقادیر قابل استفاده نبوده و مدل‌سازی نفوذ با شکست مواجه خواهد شد. بنابراین، به نظر می‌رسد برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک در زمان‌های مشخصی از آغاز فرآیند نفوذ از طریق روش‌های غیرمستقیم و ویژگی‌های زود یافت خاک

مفیدتر از برآورد هر یک از پارامترهای مدل‌های نفوذ که تعداد آن‌ها نیز کم نیست، می‌باشد. همچنین، از آنجا که نفوذ تجمعی دارای مفهوم فیزیکی روشنی بوده و به راحتی قابل اندازه‌گیری است، کمی کردن فرآیند نفوذ با استفاده از مفهوم نفوذ تجمعی، بیان واقعی‌تری از پدیده نفوذ آب به خاک بوده و مفاهیمی مانند سرعت نفوذ متوسط، سرعت نفوذ لحظه‌ای و سرعت نفوذ پایه از طریق این مفهوم قابل اشتقاق می‌باشند. همین‌طور، پس از برآورد مقادیر نفوذ تجمعی، امکان تعیین پارامترهای هر کدام از مدل‌های نفوذ از طریق برازش بر مقادیر برآورد شده امکان‌پذیر خواهد بود. بنابراین، هدف از این پژوهش، امکان‌سنجی برآورد غیرمستقیم نفوذ تجمعی آب به خاک در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰، ۲۴۰ و ۲۷۰ دقیقه پس از آغاز فرآیند نفوذ آب به خاک و نیز برآورد مقدار نفوذ تجمعی در زمان نفوذ پایه با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک و به کمک توابع انتقالی خاک بوده است.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز: در این پژوهش، داده‌های مربوط به نفوذپذیری خاک با انجام آزمایش نفوذپذیری به روش استوانه‌های مضاعف^۱ با ۳ تکرار در ۲۱۰ نقطه در مناطق مختلف کشور جمع‌آوری شد. در آزمایش‌های بالا، اندازه‌گیری نفوذ تا زمانی که سرعت نفوذ به مقدار ثابتی برسد، ادامه یافت. همچنین، رطوبت خاک در زمان شروع آزمایش نفوذپذیری از ۰/۴۷-۰/۰۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب متغیر بود. شکل ۱ پراکنش مناطق مطالعاتی در سطح کشور را نشان می‌دهد. مناطق مورد مطالعه دارای تنوع آب و هوایی مختلف و در نتیجه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی متفاوت بودند. خاک‌های مناطق مورد مطالعه در رده‌های خاکی مالی‌سول^۲، اینسپتی‌سول^۳، انتی‌سول^۴ و اریدی‌سول^۵ قرار می‌گرفت. کاربری اراضی در مناطق مورد مطالعه شامل کشت گندم، برنج، یونجه، مرتع، آیش و اراضی بایر بود. در مطالعات انجام شده با حفر پروفیل در نزدیکی نقاط انجام آزمایش‌های نفوذپذیری، لایه‌های پدوژنیک خاک مشخص و از دو افق بالایی (پدوژنیک) نمونه‌برداری و ویژگی‌های موردنظر اندازه‌گیری شد.

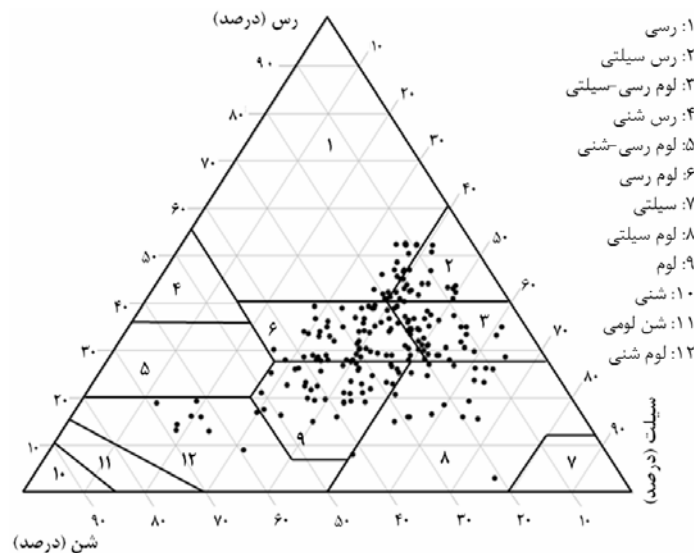
- 1- Double Rings
- 2- Mollisols
- 3- Inceptisols
- 4- Entisols
- 5- Aridisols



شکل ۱- پراکنش مناطق مطالعاتی در سطح کشور.

همچنین، اندازه‌گیری رطوبت اولیه خاک به روش وزنی، جرم ویژه ظاهری خاک به روش سیلندر (بلیک و هارتگ، ۱۹۸۶)، فراوانی نسبی ذرات به روش هیدرومتری (گی و باودر، ۱۹۸۶)، میزان ماده آلی به روش والکلی و بلک (۱۹۳۴)، درصد سنگ‌ریزه به روش حجمی و مقدار آهک خاک به روش کلسیمتری (نلسون، ۱۹۸۲) اندازه‌گیری شد. همین‌طور، رطوبت ظرفیت زراعی (۳۰ کیلوپاسکال) و رطوبت پژمردگی دائم (۱۵۰۰ کیلوپاسکال) با استفاده از دستگاه صفحات فشاری^۱ تعیین گردید. همچنین، میانگین هندسی قطر ذرات و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک با استفاده از رابطه‌های پیشنهادی توسط شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) محاسبه گردید. توزیع بافتی مربوط به افق سطحی خاک‌های مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه گردیده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، بافت خاک افق سطحی مناطق مورد مطالعه شامل بافت‌های لوم شنی، لوم، لوم سیلتی، لوم رسی-سیلتی، لوم رسی، رس سیلتی و رسی می‌باشد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه گردیده است. با توجه به این جدول، بیش‌تر خاک‌های مورد مطالعه دارای مقادیر زیادی آهک بوده و در شمار خاک‌های آهکی قرار می‌گیرند.

1- Pressure Plates



شکل ۲- توزیع بافتی خاک افق سطحی در مناطق مورد مطالعه.

جدول ۱- دامنه تغییرات ویژگی‌های مورد استفاده در پی‌ریزی توابع انتقالی خاک.

ویژگی خاک	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
شن (درصد)	۴/۰	۶۸/۰	۲۷/۸	۱۲/۶
سیلت (درصد)	۱۲/۲	۷۵/۷	۴۴/۲	۱۰/۲
رس (درصد)	۳/۱	۵۲/۲	۲۷/۹	۸/۶
جرم ویژه ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۹۶	۱/۸	۱/۴	۰/۱
تخلخل (درصد)	۲۸/۴	۵۴/۲	۴۴/۰	۵/۳
سنگریزه (درصد)	۰/۰	۲۴/۳	۲/۴	۵/۴
کربن آلی (درصد)	۰/۰۷	۳/۰۵	۰/۷۴	۰/۵۱
آهک (درصد)	۰/۰	۶۵/۳	۲۸/۱	۱۸/۶
رطوبت ظرفیت زراعی (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۱۱	۰/۳۸	۰/۲۷	۰/۰۶
رطوبت نقطه پژمردگی (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۰۴	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۰۴
زمان نفوذ پایه (دقیقه)	۸۰	۳۵۶	۱۹۰	۷۲
نفوذ تجمعی در زمان نفوذ پایه (سانتی‌متر)	۵/۰۶	۹۰/۰۰	۳۳/۵۴	۱۶/۸۱

از آنجا که آزمایش‌های نفوذپذیری خاک در هر نقطه در ۳ تکرار انجام شده بود، به‌منظور بررسی اعتبار نتایج هر آزمایش و نیز تعیین بهترین تکرار از روش تحلیل اعتباریابی^۱ به روش پایایی داخلی^۲ استفاده گردید. یکی از روش‌های بررسی پایایی داخلی یک آزمایش، استفاده از آماره آلفای کرونباخ^۳ می‌باشد. این آماره به‌صورت زیر تعریف می‌گردد (بلند و آلمن، ۱۹۹۷):

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k s_i^2}{s_T^2} \right) \quad (1)$$

که در آن، k : تعداد تکرارها، s_i^2 : واریانس تکرار i ام، s_T^2 : واریانس مجموع تکرارها می‌باشد. در صورتی که تکرارها کاملاً از هم مستقل باشند، مجموع واریانس‌های تکرارها با واریانس مجموع تکرارها برابر بوده و مقدار آلفا برابر با صفر می‌گردد. همچنین، اگر تکرارها کاملاً مشابه با یکدیگر باشند، در این صورت، مقدار آلفا برابر با ۱ خواهد بود (بلند و آلمن، ۱۹۹۷). به‌عنوان یک قاعده کلی، اگر مقدار این آماره بیش‌تر از ۰/۸ باشد، در این صورت، همه تکرارها قابل اعتماد محسوب می‌گردد. اگر مقدار آلفا کم‌تر از ۰/۸ باشد، در این صورت، حداقل یکی از تکرارها معتبر نیست (هو، ۲۰۰۶). به‌منظور تعیین بهترین تکرار آزمایش نفوذپذیری با این روش، مقدار آماره آلفای کرونباخ در صورت حذف هر یک از تکرارها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. به این ترتیب، تکراری که با حذف آن، مقدار این آماره کاهش بیش‌تری یافت، به‌عنوان بهترین تکرار انتخاب شد. همچنین، در صورتی که مقدار این آماره برای هر سه تکرار کم‌تر از ۰/۸ بود و با حذف هیچ‌یک از تکرارها مقدار این آماره از ۰/۸ بیش‌تر نگردید، از نتایج آن آزمایش چشم‌پوشی گردیده و وارد دیگر مراحل تجزیه و تحلیل نشد.

پی‌ریزی توابع انتقالی: با استفاده از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده مربوط به دو افق سطحی و زیرسطحی (پدوژنیک) خاک‌رخ، توابع انتقالی موردنظر برای برآورد نفوذ تجمعی در زمان‌های یاد شده به روش رگرسیون خطی چندگانه پی‌ریزی گردید. از سوی دیگر، اندازه و توزیع خلل و فرج درشت خاک سطحی بیش‌ترین تأثیر را در میزان نفوذ آب به خاک دارد (شوکلا و همکاران، ۲۰۰۳). مشخصات و ویژگی‌های شبکه خلل و فرج درشت لایه سطحی خاک متأثر از نوع عملیات انجام شده بر روی زمین است (ادواردز، ۱۹۸۲). گروه‌بندی داده‌ها براساس نوع کاربری اراضی موجب می‌گردد تا تفاوت در نوع تخلخل درشت خاک که متأثر از نوع کاربری اراضی است، تا حدی حذف شده و مدل‌سازی نفوذ آب به

- 1- Reliability Analysis
- 2- Internal Consistency
- 3- Cronbach's Alpha

خاک به کمک متغیرهای متعارف و متداول با دقت بیش تری امکان پذیر گردد (قربانی دشتکی، ۲۰۰۸). از سوی دیگر، به عنوان یک قاعده کلی، تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای استخراج یک مدل رگرسیونی باید حداقل ۲۰ برابر تعداد متغیرهای مستقل باشد (هو، ۲۰۰۶). در این پژوهش به علت محدود بودن داده‌های گردآوری شده، امکان پی‌ریزی توابع انتقالی برای هر یک از کاربری‌های اراضی به صورت جداگانه امکان پذیر نگردید. از آنجا که یکی از فرض‌های اصلی در تجزیه رگرسیون، نرمال بودن توزیع متغیرهای وابسته می‌باشد، نرمال بودن توزیع مقادیر نفوذ تجمعی در زمان‌های یاد شده از طریق آزمون نرمال بودن^۱ به روش رایان و جونیر (۱۹۷۶) مورد ارزیابی قرار گرفت. در مواردی که داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمی‌نمود، توزیع آن‌ها با تبدیلات^۲ مناسب، به توزیع نرمال تبدیل گردید. همچنین، به منظور بررسی وجود یا نبود هم‌راستایی در توابع ایجاد شده از آماره عامل تورم واریانس^۳ استفاده شد. به گونه‌ای که اگر مقدار آماره عامل تورم واریانس برای هر کدام از متغیرهای مستقل از ۱۰ بزرگ‌تر باشد، ضعف برآورد ضرایب رگرسیون بر اثر هم‌راستایی چندگانه مشهود خواهد بود (هو، ۲۰۰۶). به منظور انتخاب بهترین زیرمجموعه از ویژگی‌های زود یافت خاک در برآورد میزان نفوذ تجمعی در هر یک از زمان‌های یاد شده از روش گام به گام^۴ استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا ورود هر متغیر مستقل (فراوانی نسبی ذرات، جرم ویژه ظاهری، کربن آلی، آهک، درصد سنگ‌ریزه، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، رطوبت اولیه، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت پژمردگی دائم و تخلخل کل خاک) به مدل رگرسیونی براساس آزمون آماری F و در سطح معنی داری ۰/۰۵ صورت گرفت. همچنین، خروج متغیر وارد شده به مدل رگرسیونی، وابسته به بالا رفتن سطح معنی داری آن از ۰/۱۰ در حضور دیگر متغیرهای وارد شده قبلی صورت گرفت. به منظور مقایسه کارایی مدل‌های رگرسیونی پی‌ریزی شده از ضریب تبیین تعدیل شده^۵ استفاده گردید (هاکینگ، ۲۰۰۳). از سوی دیگر، براساس نتایج پژوهش قربانی دشتکی و همکاران (۲۰۰۹a) مدل کوستیاکوف- لوییز در مقایسه با مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ دارای عملکرد بهتری در برآورد نفوذ تجمعی است. بنابراین، به منظور تعیین زمان نفوذ پایه و مقدار نفوذ تجمعی در زمان فوق از مقادیر برآورد شده توسط این مدل استفاده گردید. معادله کوستیاکوف- لوییز به شرح زیر است (مزسنو، ۱۹۴۸):

- 1- Normality Test
- 2- Transformation
- 3- Variance Inflation Factor
- 4- Stepwise
- 5- Adjusted R²

$$I = Kt^b + f.t \quad (2)$$

که در آن، I: نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)، t: زمان از ابتدای آزمایش نفوذپذیری (دقیقه) و b، k و f: ضرایب ثابت که از طریق برازش بر داده‌های آزمایش نفوذ تعیین می‌شوند، می‌باشد. پارامترهای این مدل به روش حداقل مجموع مربعات خطا تعیین گردید (قربانی‌دشتکی و همکاران، ۲۰۰۹a). براساس قرارداد علمی، هنگامی که آهنگ تغییرات سرعت نفوذ در مدت یک ساعت به اندازه ۱۰ درصد باشد، سرعت نفوذ به حد نهایی خود رسیده است (سرویس حفاظت منابع طبیعی آمریکا، ۲۰۰۵). در این پژوهش نیز به منظور تعیین زمان نفوذ پایه از این معیار پیروی شد. به این ترتیب، زمان سرعت نفوذ نهایی از طریق حل رابطه زیر برای t، محاسبه گردید (والکر و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\frac{dI}{dt} = \left(-\frac{b}{t}\right) \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

ارزیابی اعتبار توابع انتقالی پی‌ریزی شده: در ادامه، بررسی اعتبار توابع ایجاد شده در برآورد نفوذ تجمعی در هر یک از زمان‌های مورد بررسی با استفاده از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا^۱، میانگین خطا^۲ و ضریب همبستگی پیرسون^۳ صورت گرفت. آماره‌های موردنظر از طریق مقایسه مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی محاسبه شد. همچنین، به منظور مقایسه کارایی توابع پی‌ریزی شده در زمان‌های مختلف، از آماره ضریب کارایی مدل^۴ استفاده گردید. آماره‌های بالا به صورت زیر محاسبه می‌گردد (قربانی‌دشتکی و همکاران، ۲۰۰۹a؛ نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰):

$$ME = \frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - I(m)_j)}{n} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - I(m)_j)^2}{n}} \quad (5)$$

-
- 1- Root Mean Square Error
 - 2- Mean Error
 - 3- Pearson Correlation Coefficient
 - 4- Model Efficiency Coefficient

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - \bar{I}(p)_j)(I(m)_j - \bar{I}(m)_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - \bar{I}(p)_j)^2 \times \sum_{j=1}^n (I(m)_j - \bar{I}(m)_j)^2}} \quad (6)$$

$$EF = 1 - \left(\frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - I(m)_j)^2}{\sum_{j=1}^n (I(m)_j - \bar{I}(m))^2} \right) \quad (7)$$

که در آن‌ها، $I(m)_j$: مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در زمان j ام (سانتی متر)، $I(p)_j$: مقدار نفوذ تجمعی برآورد شده برای زمان j ام (سانتی متر)، n : تعداد مقایسه‌ها، $\bar{I}(m)$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی (سانتی متر) و $\bar{I}(p)$: میانگین مقادیر برآورد شده نفوذ تجمعی (سانتی متر) می‌باشد. ارزیابی عملکرد توابع انتقالی پی‌ریزی شده در برآورد منحنی نفوذ تجمعی: به‌منظور بررسی عملکرد توابع انتقالی پی‌ریزی شده در برآورد منحنی نفوذ تجمعی نسبت به زمان، از داده‌های مربوط به مرحله اعتباریابی توابع پی‌ریزی شده، استفاده گردید. به این ترتیب، در این مرحله، قابلیت توابع انتقالی پی‌ریزی شده در برآورد منحنی نفوذ تجمعی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا پارامترهای مدل کوستیاکوف-لوییز از طریق برازش آن بر داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده نفوذ تجمعی برای هر یک از زمان‌های مورد بررسی و هر یک از خاک‌ها تعیین گردید. سپس، منحنی‌های نفوذ تجمعی به‌دست آمده از برازش مدل کوستیاکوف-لوییز بر داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از آماره‌های میانگین خطا^۱، ریشه مربعات خطا^۲ و ضریب همبستگی پیرسون، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. این آماره‌ها مشابه رابطه‌های ۴، ۵ و ۶ با جایگزینی عملگر انتگرال به‌جای عملگر مجموع در رابطه‌های بالا و قرار دادن بازه زمانی a تا b به‌عنوان کران‌های انتگرال‌گیری، قابل محاسبه می‌باشد (قربانی‌دشتکی و همایی، ۲۰۰۷). همچنین، از آماره‌های میانگین قدرمطلق میانگین خطاهای برآورد منحنی نفوذ تجمعی و انحراف معیار آماره ریشه مربعات خطا نیز برای ارزیابی عملکرد توابع انتقالی پی‌ریزی شده، استفاده شد. از سوی دیگر، مقدار آماره آلفای کرونباخ به‌ازای منحنی‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و برآورد شده نیز محاسبه گردید. به‌طوری‌که اگر مقدار این آماره از $0/8$ بیش‌تر باشد، منحنی نفوذ تجمعی برآورد شده را می‌توان به‌عنوان یکی از تکرارهای یک آزمایش نفوذپذیری معتبر پذیرفت.

1- Mean Difference

2- Root of the Mean Square Difference

نتایج و بحث

توابع پی‌ریزی شده به‌منظور برآورد نفوذ تجمعی در زمان‌های یاد شده در جدول ۲ ارائه گردیده است. در توابع ارائه شده در این جدول، متغیرهای I_1 ، I_2 ، I_3 ، I_4 ، I_5 ، I_6 ، I_7 ، I_8 ، I_9 ، I_{10} ، I_{11} ، I_{12} ، I_{13} ، I_{14} ، I_{15} ، I_{16} ، I_{17} ، I_{18} ، I_{19} و I_{20} به ترتیب، مقدار برآورد شده نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰، ۲۴۰ و ۲۷۰ دقیقه از ابتدای آزمایش نفوذپذیری و زمان نفوذ پایه و نمای این متغیرها بیانگر تبدیل مورد استفاده به‌منظور نرمال کردن توزیع آن‌ها می‌باشد. همچنین، در این توابع، متغیرهای مستقل شامل میزان شن (درصد)، رس (درصد)، تخلخل (درصد)، انحراف معیار هندسی قطر ذرات (بدون بعد)، میانگین هندسی قطر ذرات (میلی‌متر)، کربن آلی (درصد)، رطوبت نقطه پژمردگی (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) و رطوبت ظرفیت زراعی (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد. زیرنگاره‌های ۱ و ۲ به ترتیب، بیانگر افق‌های سطحی و زیرسطحی خاک‌رخ است. همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌گردد، با افزایش زمان از ابتدای آزمایش نفوذپذیری، قدرت تبیین مدل‌های رگرسیونی استخراج شده افزایش یافته است. به این معنی که با گذشت زمان از آغاز فرآیند نفوذ، ویژگی‌های زودپافت اندازه‌گیری شده مربوط به دو افق سطحی و زیرسطحی خاک‌رخ، توانسته‌اند تغییرات نفوذ تجمعی در یک زمان مشخص را به‌طور کامل‌تری توجیه کنند. اما همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد، مقادیر ضرایب تبیین توابع پی‌ریزی شده بیانگر آن است که این توابع قادر به بیان کامل تغییرات نفوذ تجمعی در زمان‌های مورد بررسی نبوده‌اند. علت این امر طبیعت بسیار تغییرپذیر فرآیند نفوذ و نیز وابستگی آن به ویژگی‌های غیرسرسشتی خاک (مانند کاربری اراضی) می‌باشد (شوکلا و همکاران، ۲۰۰۳).

همچنین، بخشی از کاهش توان تبیین مدل‌های رگرسیونی پی‌ریزی شده را نیز می‌توان به‌وجود روابط غیرخطی بین ویژگی‌های دیرپافت و زودپافت نسبت داد که مدل‌های رگرسیونی خطی قادر به استخراج این رابطه‌ها نمی‌باشند (سای، ۲۰۰۶). همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، از زمان ۱۵۰ دقیقه به بعد، ویژگی‌های فیزیکی مربوط به افق زیرسطحی خاک نیز به توابع استخراج شده وارد شده‌اند. از آنجا که متغیرهای مستقل در هر یک از توابع ارائه شده براساس وزن و اهمیت آن‌ها (با توجه به ضرایب رگرسیونی استاندارد شده) مرتب شده است، مشاهده می‌گردد که در تمامی توابع پی‌ریزی شده، ویژگی‌های فیزیکی مربوط به افق سطحی خاک‌رخ، همواره دارای بیش‌ترین اهمیت

بوده‌اند. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، قدرت تبیین مدل رگرسیونی استخراج شده به‌منظور برآورد نفوذ تجمعی در زمان نفوذ پایه در مقایسه با زمان ۲۷۰ دقیقه از ابتدای آزمایش نفوذپذیری، کاهش یافته است. بخشی از این کاهش در قدرت تبیین، ناشی از خطای برآزش مدل کوستیاکوف- لوییز بر داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری و نیز خطای محاسبه زمان نفوذ نهایی می‌باشد. اما علت اصلی این امر آن است که در بیش‌تر خاک‌های مورد مطالعه، زمان نفوذ پایه قبل از زمان ۲۷۰ دقیقه از ابتدای آزمایش نفوذپذیری رخ داده است. همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌گردد، متوسط زمان نفوذ پایه در خاک‌های مورد مطالعه قبل از زمان ۲۷۰ دقیقه از ابتدای آزمایش نفوذپذیری می‌باشد. به عبارت دیگر، در بیش‌تر خاک‌های مورد مطالعه، نفوذ تجمعی برآورد شده تا زمان ۲۷۰ دقیقه از ابتدای آزمایش نفوذپذیری، زمان نفوذ پایه را نیز پوشش داده است.

جدول ۲- توابع انتقالی استخراج شده به‌منظور برآورد نفوذ تجمعی در زمان‌های مختلف.

R^2_{adj}	توابع انتقالی استخراج شده
۰/۵۶۶	$(I_2)^{1/10} = 0/600 + 0/002(Sand)_1 + 0/16(PWP)_1 + 0/06(Porosity)_1 - 0/06(FC)_1 + 0/06(\sigma_g)_1$
۰/۵۸۶	$(I_{10})^{1/10} = 0/613 + 0/002(Sand)_1 + 0/17(PWP)_1 + 0/06(Porosity)_1 - 0/05(FC)_1 + 0/05(\sigma_g)_1 + 0/49(d_g)_1$
۰/۶۲۳	$(I_{10})^{1/20} = -0/485 + 0/007(Sand)_1 + 0/07(PWP)_1 + 0/24(Porosity)_1 - 0/21(FC)_1 + 0/18(\sigma_g)_1 + 1/822(d_g)_1$
۰/۶۲۴	$(I_7)^{1/20} = -0/399 + 0/06(Sand)_1 + 0/65(PWP)_1 + 0/23(Porosity)_1 + 2/085(d_g)_1 - 0/18(FC)_1 + 0/19(\sigma_g)_1$
۰/۶۶۷	$(I_7)^{1/30} = -0/607 + 0/007(Sand)_1 + 0/07(PWP)_1 + 0/27(Porosity)_1 + 2/675(d_g)_1 + 0/24(\sigma_g)_1 - 0/19(FC)_1$
۰/۶۹۴	$(I_{10})^{1/40} = -1/842 + 0/14(Sand)_1 + 0/126(PWP)_1 + 0/46(Porosity)_1 + 4/897(d_g)_1 + 0/41(\sigma_g)_1 - 0/30(FC)_1$
۰/۷۰۳	$(I_7)^{1/40} = -2/014 + 0/14(Sand)_1 + 0/129(PWP)_1 + 0/49(Porosity)_1 + 5/674(d_g)_1 + 0/46(\sigma_g)_1 - 0/29(FC)_1$
۰/۷۰۷	$(I_9)^{1/45} = -3/049 + 0/21(Sand)_1 + 0/131(PWP)_1 + 0/66(Porosity)_1 + 9/306(d_g)_1 + 0/65(\sigma_g)_1$
۰/۷۱۳	$(I_{10})^{1/45} = -3/826 + 0/22(Sand)_1 + 0/141(PWP)_1 + 0/73(Porosity)_1 + 10/951(d_g)_1 + 0/72(\sigma_g)_1$
۰/۷۳۴	$(I_{10})^{1/50} = -5/599 + 0/075(Sand)_1 + 0/191(PWP)_1 + 0/100(Porosity)_1 + 7/881(d_g)_1 + 0/57(\sigma_g)_1$
۰/۷۳۵	$(I_{18})^{1/50} = -5/830 + 0/070(Sand)_1 + 0/201(PWP)_1 + 0/108(Porosity)_1 + 8/082(d_g)_1 + 0/60(\sigma_g)_1$
۰/۷۳۷	$(I_{11})^{1/50} = -6/360 + 0/085(Sand)_1 + 0/210(PWP)_1 + 0/114(Porosity)_1 + 8/044(d_g)_1 + 0/59(\sigma_g)_1$
۰/۷۴۰	$(I_{14})^{1/50} = -6/744 + 0/088(Sand)_1 + 0/217(PWP)_1 + 0/121(Porosity)_1 + 8/089(d_g)_1 + 0/59(\sigma_g)_1$
۰/۷۴۰	$(I_{17})^{1/50} = -5/901 + 0/030(Sand)_1 + 0/244(PWP)_1 + 0/123(Porosity)_1 + 17/170(d_g)_1 + 0/159(\sigma_g)_1 - 0/30(Clay)_1$
۰/۷۰۳	$(I_{نهایی})^{1/20} = 1/040 + 0/19(\sigma_g)_1 + 2/624(d_g)_1 + 0/034(PWP)_1 - 0/07(FC)_1 + 0/08(OC)_1$

ارزیابی اعتبار توابع پی‌ریزی شده: مقادیر آماره‌های محاسبه شده به منظور ارزیابی اعتبار توابع انتقالی پی‌ریزی شده در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد، مقادیر آماره میانگین خطا بیانگر آن است که تمامی توابع پی‌ریزی شده، نفوذ تجمعی را کم‌برآورد نموده‌اند. همچنین، با افزایش زمان از ابتدای آزمایش نفوذپذیری، مقدار آماره ریشه میانگین مربعات خطا افزایش یافته است. مقادیر مثبت آماره کارآیی مدل در تمامی توابع استخراج شده بر این نکته دلالت دارد که برآوردهای مدل‌های پی‌ریزی شده در مقایسه با متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده، تخمین بهتری از نفوذ تجمعی در هر یک از زمان‌های مورد بررسی ارائه می‌دهد. همچنین، مقدار این آماره در زمان ۲۷۰ دقیقه از ابتدای آزمایش نفوذپذیری به حداکثر مقدار خود رسیده است. این امر بیانگر آن است که با افزایش زمان از ابتدای آزمایش نفوذپذیری و در یک زمان مشخص، پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی حول میانگین آن‌ها، افزایش یافته است. بنابراین، می‌توان گفت که با گذشت زمان از ابتدای آزمایش نفوذپذیری، به‌رغم افزایش آماره ریشه میانگین مربعات خطای مربوط به هر یک از مدل‌های رگرسیونی پی‌ریزی شده، کارآیی آن‌ها بهبود یافته است.

جدول ۳- مقادیر آماره‌های مورد استفاده در ارزیابی اعتبار توابع انتقالی پی‌ریزی شده.

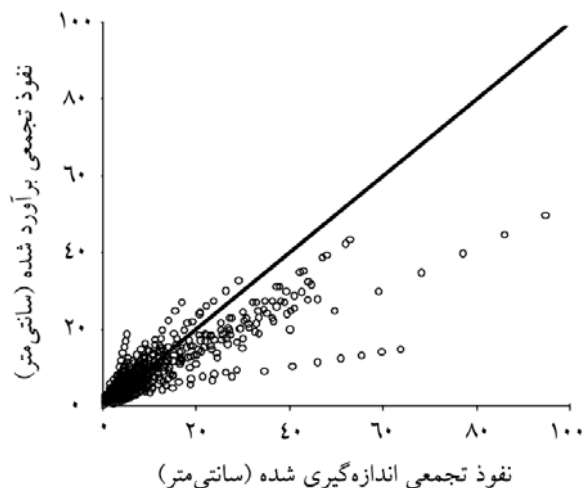
آماره‌های ارزیابی				توابع
کارآیی مدل	ریشه میانگین مربعات خطا (سانتی‌متر)	میانگین خطا (سانتی‌متر)	ضریب همبستگی پیرسون	انتقالی
۰/۲۷	۱/۱۹	-۰/۴۰	۰/۵۸	I _۰
۰/۲۸	۱/۷۲	-۰/۰۸	۰/۵۴	I _۱
۰/۲۸	۲/۲۵	-۰/۱۱	۰/۵۶	I _۵
۰/۳۳	۲/۶۳	-۰/۲۵	۰/۵۶	I _۲
۰/۳۳	۳/۳۷	-۰/۱۵	۰/۵۶	I _۳
۰/۳۵	۴/۳۴	-۰/۰۳	۰/۵۸	I _۴
۰/۳۵	۵/۲۴	-۱/۸۴	۰/۶۵	I _۶
۰/۳۸	۶/۷۵	-۲/۵۷	۰/۶۹	I _۹
۰/۳۸	۸/۲۲	-۳/۵۷	۰/۷۲	I _{۱۲}
۰/۳۶	۹/۹۱	-۴/۴۱	۰/۷۰	I _{۱۵}
۰/۳۶	۱۱/۳۱	-۵/۱۲	۰/۷۲	I _{۱۸}
۰/۳۷	۱۲/۷۱	-۵/۸۱	۰/۷۳	I _{۲۱}
۰/۴۳	۱۳/۵۴	-۴/۹۷	۰/۷۱	I _{۲۴}
۰/۵۰	۱۳/۹۳	-۴/۸۲	۰/۷۶	I _{۲۷}
۰/۴۰	۹/۹۴	-۱/۹۵	۰/۶۵	I _{نهایی}

ارزیابی قابلیت توابع انتقالی در برآورد منحنی نفوذ تجمعی: مقادیر آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی عملکرد توابع انتقالی در برآورد منحنی نفوذ تجمعی در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این جدول، مقادیر آماره میانگین میانگین خطاها بیانگر آن است که منحنی نفوذ تجمعی به دست آمده از برازش بر داده‌های برآورد شده کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد گردیده، اما با توجه به مقادیر آماره میانگین قدرمطلق میانگین خطاها مشخص است که این کم‌برآوردگری به صورت سیستماتیک نبوده است. این نکته از شکل ۳ نیز قابل استنباط می‌باشد. در این شکل مقادیر نفوذ تجمعی به دست آمده از برازش مدل کوستیاکوف- لوییز بر داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده نفوذ تجمعی توسط توابع انتقالی نشان داده شده است. همچنین، آماره میانگین ریشه میانگین مربعات خطا بیانگر آن است که به طور متوسط، خطای برآورد منحنی نفوذ تجمعی برابر با ۶/۹۰ سانتی‌متر بوده است. همان‌گونه که در جدول ۴ ملاحظه می‌گردد، مقدار انحراف معیار آماره ریشه مربعات خطا تقریباً برابر با مقدار میانگین آن‌ها بوده است. به این معنی که دقت توابع انتقالی پی‌ریزی شده در برآورد منحنی نفوذ تجمعی از تغییرپذیری بالایی برخوردار بوده که دلیل آن افزایش خطای برآورد نفوذ تجمعی در خاک‌های با نفوذپذیری بالا بوده است که این نکته در شکل ۳ نیز قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۴- مقادیر آماره‌های ارزیابی عملکرد توابع انتقالی در برآورد منحنی نفوذ تجمعی.

آماره	مقدار آماره
میانگین ضریب همبستگی پیرسون	۰/۸۸
میانگین میانگین خطاها (سانتی‌متر)	-۳/۵۴
میانگین قدرمطلق میانگین خطاها (سانتی‌متر)	۵/۹۱
میانگین ریشه میانگین مربعات خطاها (سانتی‌متر)	۶/۹۰
انحراف معیار ریشه مربعات خطاها (سانتی‌متر)	۶/۸۱
میانگین آلفای کروناخ	۰/۹۲**

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.



شکل ۳- مقادیر نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) اندازه‌گیری شده و برآورد شده (سانتی‌متر).

همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی، با افزایش زمان از ابتدای آزمایش نفوذپذیری، بر انحراف منحنی‌های نفوذ برآورد شده از خط ۱:۱ افزوده شده است. همین‌طور، با توجه به جدول ۴، مقدار میانگین آماره آلفای کرونیخ بیانگر آن است که در سطح احتمال ۱ درصد، می‌توان منحنی نفوذ تجمعی برآورد شده را به‌عنوان یکی از تکرارهای یک آزمایش نفوذپذیری معتبر پذیرفت.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که توابع انتقالی پی‌ریزی شده قادر به برآورد مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی می‌باشند و به‌طور کلی، با گذشت زمان از ابتدای آزمایش نفوذپذیری، کارایی توابع پی‌ریزی شده افزایش یافت. همچنین، نتایج این پژوهش نشان داد که رویکرد به‌کار رفته در مدل‌سازی فرآیند نفوذ امیدبخش بوده و بر برآورد پارامتریک نفوذ برتری دارد. زیرا با وجود آن‌که توابع انتقالی جداگانه‌ای برای کاربری‌های اراضی مختلف پی‌ریزی نشد، اما مقادیر برآورد شده همگی در دامنه معقول فیزیکی قرار داشته و بازه زمانی که پارامترهای مدل نفوذ برازش‌یافته در آن صدق می‌کنند، مشخص است. از سوی دیگر، متوسط خطای برآورد منحنی نفوذ تجمعی به مراتب کم‌تر از پژوهش قربانی‌دشتکی (۲۰۰۸) به‌دست آمد. همچنین، در این رویکرد، محدودیتی از نظر انتخاب مدل نفوذ برای برازش بر داده‌های برآورد شده وجود نداشته و خطای برازش مدل نفوذ بر داده‌های برآورد شده مشخص می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، توابع پی‌ریزی شده در بیش‌تر خاک‌های مورد مطالعه، مقدار نفوذ تجمعی را کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد نموده و عملکرد آن‌ها در خاک‌های با نفوذپذیری بالا با خطای بیش‌تری همراه بوده است. در خاک‌های دارای مقادیر نفوذ تجمعی بالا، تأثیر تخلخل درشت خاک در نفوذ آب به خاک افزایش می‌یابد (شوگلا و همکاران، ۲۰۰۳؛ قربانی‌دشتکی، ۲۰۰۸). از آنجا که در توابع اشتقاق‌یافته، شاخصی کمی برای بیان چگونگی رفتار منافذ درشت خاک وجود ندارد، عملکرد توابع پی‌ریزی شده در این خاک‌ها با خطای بیش‌تری همراه بوده است. بنابراین، به‌منظور بهبود عملکرد توابع انتقالی پی‌ریزی شده، وجود متغیری کمی برای بیان اثر ساختمان خاک و وضعیت ریشه‌های موجود در خاک بر نفوذ آب به خاک اجتناب‌ناپذیر می‌نماید.

منابع

1. Argyrokastritis, I. and Kerkides, P. 2003. A note to the variable sorptivity infiltration equation. *Water Resour. Manage.* 17: 133-145.
2. Blake, G.R. and Hartge, K.H. 1986. Bulk Density, P 363-375. In: Klute, A. (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison. WI.*
3. Bland, J.M. and Altman, D.G. 1997. Statistics notes: Cronbach's alpha. *Br. Med. J.* 314: 572-522.
4. Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.* 9: 177-213.
5. Edwards, W.M. 1982. Predicting tillage effects on infiltration, P 105-115. In: Unger, P.W., D.M. Van Doren, F.D. Whisler, and E.L. Skidmore, (eds.), *Predicting tillage effects on soil physical properties. ASA special publication 44, ASA, SSSA, Madison, USA.*
6. Gee, G.W. and Bauder, J.W. 1986. Particle Size Analysis, P 383-411. In: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Second ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison. WI.*
7. Ghorbani Dashtaki, S. and Homaeae, M. 2007. Estimating soil water infiltration parameters using pedotransfer functions. *Iranian. J. Irrig. Drain.* 1: 1. 21-39. (In Persian)
8. Ghorbani Dashtaki, S. 2008. Estimating Soil Water Infiltration Parameter Using Pedotransfer Functions, Artificial Neural Networks and Geostatistics. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Iran, 256p. (In Persian)
9. Ghorbani Dashtaki, S., Homaeae, M. and Mahdian, M.H. 2009a. Estimating soil water infiltration parameters using Artificial Neural Networks. *J. Water and Soil*, 23: 1. 185-198. (In Persian)

10. Ghorbani Dashtaki, S., Homaei, M., Mahdian, M.H. and Kouchakzadeh, M. 2009b. Site-Dependence Performance of Infiltration Models. *Water Resour. Manage.* 23: 1573-1650.
11. Ho, R. 2006. *Handbook of univariate and multivariate data analysis and interpretation with SPSS*. Chapman and Hall/CRC, 403p.
12. Hocking, R.R. 2003. *Methods and applications of linear models*. New Jersey: Wiley, 741p.
13. Horton, R.E. 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5: 399-417.
14. Jain, A. and Kumar, A. 2004. An evaluation of artificial neural network technique for the determination of infiltration model parameters. *Applied Soft Computing*, 6: 3. 272-282.
15. Kostikov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration, P 17-21. *Transactions Congress International Society for Soil Science*, 6th, Moscow, Part A.
16. Machiwal, D., Jha, M.K. and Mal, B.C. 2006. Modelling Infiltration and quantifying Spatial Soil Variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*, 95: 4. 569-582.
17. Mezentsev, V.J. 1948. Theory of formation of the surface runoff. *Meteorologiae Hidrologia*. 3: 33-40.
18. Mohammadi, M.H. and Refahi, H. 2005. Estimating parameters of infiltration equations using soil physical properties. *J. Agric. Sci. Iran*, 36: 6. 1391-1398. (In Persian)
19. Mukheibir, P. 2008. Water resources management strategies for adaptation to climate-induced impacts in South Africa. *Water Resour Manage.* 22: 1259-1276.
20. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 3. 282-290.
21. US Department of Agriculture, Natural Resources and Conservation Service. 2005. *National Engineering Handbook, Part 623, Surface Irrigation*. National Technical Information Service, Washington, DC, Chapter 4.
22. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and Gypsum, P 181-197. In: Page, A.L., R.H. Miller, and D.R. Keeney, (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2*. Second edition. *Agron. Monogr.* 9. ASA. Madison. WI.
23. Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.* 83: 345-357.
24. Ryan Jr., T.A. and Joiner, B.L. 1976. Normal probability plots and tests for normality. Technical Report. Statistics Department, the Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, Pp: 9-10.
25. Shirazi, M.A. and Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 142-147.

26. Shukla, M.K., Lal, R. and Unkefer, P. 2003. Experimental Evaluation of Infiltration Models for Different Land Uses. *Soil Sci.* 168: 3. 178-191.
27. Sy, N.L. 2006. Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrol. Sci. J.* 51: 1. 3-20.
28. Tsanis, I.K. 2006. Modeling leachate contamination and remediation of groundwater at a landfill site. *Water Resour Manage.* 20: 109-132.
29. Turner, E.R. 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. M.Sc. Thesis, University of Maryland, USA, 202p.
30. Walker, W.R., Prestwich, C. and Spofford, T. 2006. Development of the revised USDA-NRCS intake families for surface irrigation. *Agric. Water Manage.* 8: 5. 157-164.
31. Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-39.
32. Weiler, M. 2005. An infiltration model based on flow variability in macropores: development, sensitivity analysis and applications. *J. Hydrol.* 310: 294-315.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 17(3), 2010
www.gau.ac.ir/journals

Estimating cumulative soil water infiltration using pedotransfer functions in calcareous soils

**F. Parchami Araghi¹, *S.M. Mirlatifi², Sh. Ghorbani Dashtaki³
and M.H. Mahdian⁴**

¹M.Sc. Student, Dept. of Irrigation and Drainage, Tarbiat Modares University, Tehran,

²Associate Prof., Dept. of Irrigation and Drainage, Tarbiat Modares University, Tehran,

³Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Shahrekord University, ⁴Assistant Prof.,

Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran

Received: 2009/12/15; Accepted: 2010/08/07

Abstract

In order to prevent land degradation and soil and water pollution, realizing the respective processes and quantifying their relationships is unavoidable. Infiltration process is one of the most important components of the hydrological cycle. On the other hand, the direct measurement of infiltration process is laborious, time consuming and expensive. In this study, the possibility of predicting cumulative infiltration in specific time intervals, using readily available soil data and Pedotransfer Functions (PTFs) was investigated. For this purpose, 210 double ring infiltration data were collected from different regions of Iran. Soil texture ranged from loam to clay. Basic soil properties of the two upper pedogenic horizons including initial water content, bulk density, particle-size distributions, organic carbon, gravel content, CaCO₃ percent and soil water contents at field capacity and permanent wilting point were determined on each soil sample. The parametric PTFs were then developed to predict the cumulative infiltration at times 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 minutes after the start of the infiltration test and the time of basic infiltration rate, using the stepwise regression method. The results of reliability test indicated that all derived PTFs underestimated the cumulative infiltration. Also, the obtained RMSEs at small times were lower than those obtained at the ending times of the infiltration process. EF statistic had positive values and increased with time increasing. The EF values indicated that the efficiency of the derived PTFs improved during the time increasing. Also, developed PTFs had a mean RMSD of 6.90 cm in estimating the cumulative infiltration curve. Results indicated that at the 1% probability level, the estimated cumulative infiltration curve can be accepted as one of the replicates of a reliable infiltration test.

Keywords: Cumulative infiltration, Infiltration process, Pedotransfer functions

* Corresponding Author; Email: mirlat_m@modares.ac.ir