

ارزیابی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی خاک و کاربری اراضی در حوضه دریاچه ارومیه

فرشته بتوخته^۱، مجتبی خوش‌روش و حسین دهقانی‌سانج

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.

batoukhtehf@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.

khoshravesh_m24@yahoo.com

دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

dehghanisanij@yahoo.com

دریافت: آذر ۱۳۹۹ و پذیرش: تیر ۱۴۰۰

چکیده

نفوذ آب به خاک یکی از مهم‌ترین فرآیندهای فیزیکی خاک است که نقش مهمی در مدیریت خاک دارد. اهداف این پژوهش، بررسی توانایی مدل‌های متداول نفوذ مانند کوستیاکوف، کوستیاکوف لوییز، هورتون، SCS و فیلپ برای تخمین میزان نفوذ، بررسی سرعت نفوذ و پتانسیل ایجاد رواناب در بارندگی‌های طولانی‌مدت در دو کاربری اراضی (مرتع و زراعی) و سه بافت خاک (لوم، کلی لوم و لوم رس سیلتی) مختلف است. برای تخمین پارامترهای مدل و یافتن مدل مناسب برای این منطقه، این مدل‌ها به داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده برازش داده شد و پس از برآورد پارامترها با استفاده از معادلات سرعت نفوذ، هر یک از مدل‌ها سرعت نفوذ برای زمان‌های ۲، ۴ و ۲۴ ساعت محاسبه شد. برای این منظور داده‌های حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری به روش استوانه‌های مضاعف در ۱۶ نقطه از مناطق مختلف منطقه جمع‌آوری گردید. پارامترهای مدل‌های یادشده به روش حداقل مجموع مربعات خطا تعیین گردید. با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، کارایی نش ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME)، صحت و دقت برازش‌ها ارزیابی شد. مقایسه میانگین آماره‌های ارزیابی با استفاده از روش توکی^۲ نشان داد که نحوه برآورد نفوذ تجمعی در مدل کوستیاکوف لوییز در مقایسه با سایر مدل‌ها، از روند پایدارتری برخوردار بوده و در اکثر کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های موردبررسی حائز رتبه نخست ارزیابی بود. مقایسه میانگین نشان داد که علی‌رغم وجود اختلاف بین مدل‌ها در برآورد نفوذ تجمعی، اختلاف بین مدل‌ها در برآورد سرعت نفوذ معنی‌دار نبوده و در یک گروه قرار گرفتند. فارغ از نوع مدل مورد استفاده، بافت خاک و کاربری اراضی دو عامل اساسی تأثیرگذار بر سرعت نفوذ نهایی آب به خاک هستند که در کاربری مرتع به دلیل ساختمان خوب و پایداری خاک سرعت نفوذ نسبت به کاربری زراعی بیشتر و پتانسیل ایجاد رواناب کمتر است. طبق نتایج سرعت نفوذ با زمان در کاربری زراعی دارای تغییرات قابل توجه ای است؛ به نحوی که سرعت نفوذ در این کاربری در ابتدا بالا بود و با افزایش زمان از ۲ به ۲۴ ساعت، به شدت افت نمود. از این رو، در راستای کاهش اثرات اقدامات کشاورزی بر تضعیف کیفیت خاک و به منظور افزایش سرعت نفوذ آب به خاک در بارندگی‌های طولانی‌مدت و کاهش رواناب، اقدامات مدیریتی از جمله گسترش کشاورزی حفاظتی و عملیات زراعی بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی نقش بسیار مؤثری خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: مدل کوستیاکوف-لوییز، مدل اس.سی.اس، مدل هورتون، مدل فیلپ، سرعت نفوذ آب به خاک

^۱ -آدرس نویسنده مسئول: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.

^۲ Tukey procedure

مدل‌های فیزیکی و تجربی گوناگونی به‌منظور کمی نمودن این فرآیند ارائه شود (کوستیاکوف، ۱۹۳۲؛ لوئیس، ۱۹۳۷؛ فیلیپ، ۱۹۵۷؛ آرگروکاستریت و کرکیدس، ۲۰۰۳). از آنجاکه اندازه‌گیری نفوذ در عرصه هزینه‌بر و مستلزم صرف زمان زیاد است، لذا از مدل‌های مختلف برای برآورد مقدار نفوذ استفاده می‌شود که هر مدل در شرایط خاص، برازش مناسبی را با داده‌های تجربی از خود نشان می‌دهد. به‌طورکلی مدل‌های نفوذ آب به خاک، شامل مدل‌های تخمینی با اساس فیزیکی و مدل‌های تخمینی تجربی است. در مدل‌های تخمینی با اساس فیزیکی با استفاده از قوانین و روابط اثبات‌شده مانند بقای جرم و قانون بقای انرژی و تلفیق آن‌ها و دست‌یابی به یک سری معادلات ریاضی مانند گرین-امپت (گرین و امپت، ۱۹۱۱) و فیلیپ (فیلیپ، ۱۹۵۷) به‌دست‌آمده‌اند. این مدل‌ها با تکیه بر مبانی فیزیکی، سعی در ساده‌سازی شرایط اولیه و شرایط مرزی در معادله جریان در محیط غیراشباع شده است. این فرضیات، داده‌های فیزیکی موردنیاز این مدل‌ها را کاهش می‌دهد اما از کارایی آن‌ها به لحاظ تغییر شرایط اولیه و مرزی می‌کاهد. مهم‌ترین حسن این معادلات که بر اساس قوانین فیزیکی وضع شده‌اند و با دانستن برخی خصوصیات فیزیکی خاک، معادله نفوذ قابل تعیین است.

مدل‌های تخمینی تجربی به لحاظ فرضیاتی که به شرایط سطح خاک و نیم‌رخ خاک مربوط می‌شود، دارای محدودیت کمتری هستند و در عوض به شرایطی که برای آن واسنجی شده‌اند محدود می‌شوند. مدل‌های تجربی بر اساس پارامترهایی هستند که از طریق برازش منحنی تعیین‌شده و یا از روش‌های دیگر تخمین زده می‌شوند. تأثیر گرفتن از شرایط زمانی، مکانی و نارسایی پارامترهای معادلات در تبیین مفاهیم فیزیکی از نقص‌های عمده این‌گونه معادلات است. در مقایسه بین مدل‌های فیزیکی و تجربی مشخص شده که معادلات فیزیکی جزئیات نفوذ را نسبت به معادلات تجربی بهتر نشان می‌دهند (لوآیکیگا و هوانگ، ۲۰۰۷؛ محمدی و رفاهی،

نفوذ آب به خاک یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه‌ی آب در طبیعت است. این ویژگی خاک به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی هیدرولیکی خاک بوده و بیانگر توانایی خاک در انتقال آب به‌صورت عمودی در نیم‌رخ خاک است (فکی و همکاران، ۲۰۱۸) سرعت وارد شدن آب به خاک یا به‌عبارت‌دیگر سرعت نفوذ از پارامترهای مهم در طراحی سامانه‌های آبیاری، مطالعات هیدرولوژی، مدیریت منابع آب و حفاظت خاک و طراحی و اجرای پروژه‌های زهکشی و کنترل فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز است. انتخاب نوع سیستم آبیاری برای هر منطقه و همچنین، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری به ویژگی‌های نفوذ آب به داخل خاک بستگی دارد.

سرعت نفوذ به عواملی مانند خصوصیات فیزیکی خاک، مقدار رطوبت اولیه خاک، شدت بارندگی یا مقدار آب آبیاری، شیب و زبری سطح زمین، درصد و نوع پوشش گیاهی و کیفیت آب بستگی دارد. زمانی که آب آبیاری از شدت نفوذ در خاک و نیز ظرفیت ذخیره سطحی فراتر رود، آب در سطح مزرعه جریان یافته و رواناب ایجاد می‌شود. کاربری اراضی و مدیریت صحیح آن یکی از فاکتورهای اصلی تأثیرگذار بر فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌ها است. کاربری اراضی تنها روشی است که انسان از طریق آن در فرایندهای طبیعی دخالت می‌کند و می‌تواند باعث افزایش تخریب خاک یا جلوگیری از آن شود (زی‌چنگ، ۲۰۱۱). گومنز و همکاران (۱۹۹۹) دریافتند که با کاهش وزن مخصوص ظاهری ناشی از عملیات خاک‌ورزی مناسب، نفوذپذیری افزایش‌یافته ولی در صورت تکرار بی‌رویه شخم و در نتیجه افزایش وزن مخصوص، کاهش خلل و فرج و فشردگی خاک، میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

نفوذ به‌عنوان یکی از موضوعات اصلی برای صرفه‌جویی در مصرف آب و طراحی یک سامانه آبیاری مناسب در نظر گرفته می‌شود (رحمان و همکاران، ۲۰۱۶؛ پاتل و همکاران، ۲۰۱۹). اهمیت این فرآیند سبب شده

۱۳۸۴). از مدل‌های تجربی می‌توان به کوستیاکوف (کوستیاکوف، ۱۹۳۲)، هورتون (هورتن، ۱۹۴۰)، کوستیاکوف-لوییز (مزنف، ۱۹۴۸) و مدل سازمان

جدول ۱- شرح مدل‌های نفوذ مورد بررسی و پارامترهای آن‌ها

مدل	پارامترها	معادله نفوذ	معادله سرعت نفوذ
فیلیپ	A, S	$I = St^{1/2} + At$	$i = \frac{1}{2}St^{-1/2} + A$
کوستیاکوف	b, k	$I = Kt^b$	$i = Kbt^{b-1}$
کوستیاکوف-لوییز	A, k, b	$I = Kt^b + At$	$i = Kbt^{b-1} + A$
هورتون	C, m, a	$I = Ct + m(1 - e^{-at})$	$i = C + ma(e^{-at})$
SCS	a, b	$I = at^b + 0.6985$	$i = abt^{b-1}$

I = نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)، i = سرعت نفوذ (سانتی‌متر در دقیقه) و t = زمان (دقیقه)

مدل‌های فیلیپ و کوستیاکوف برآورد بهتری از نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به مدل‌های هورتون و گرین-آمپ دارند. مونیرو و همکاران (۲۰۲۰) توانایی مدل‌های هورتون، کوستیاکوف و فیلیپ را برای تخمین میزان نفوذ بررسی نمودند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که مدل‌های هورتون و فیلیپ اندکی مطابقت بهتری با میزان نفوذ مشاهده‌شده نسبت به مدل‌های کوستیاکوف دارند همچنین، برآورد دقیق میزان نفوذ بر اساس پارامترهای مدل نشان داد که پارامترهای مدل نفوذ نیاز به برآورد در خاک‌های محلی دارند.

پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۸۹) عملکرد مدل‌های نفوذ گرین - آمپت، فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف - لوییز، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و هورتن در برآورد نفوذ تجمعی و نیز وابستگی عملکرد آن‌ها به کلاس‌های مختلف بافت خاک و کاربری‌های مختلف اراضی را مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور، داده‌های حاصل از آزمایش نفوذپذیری به روش استوانه‌های مضاعف در ۲۱۰ محل از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد عملکرد کوستیاکوف-لوییز در مقایسه با دیگر مدل‌ها در برآورد نفوذ تجمعی از روند پایدارتری برخوردار بود. به گونه‌ای

از آنجاکه فرضیات و پارامترهای به کار رفته در مدل‌های نفوذ باهم متفاوت است، انتظار می‌رود در یک شرایط معین، مدلی خاص دارای عملکرد بهتری در مقایسه با بقیه باشد (حقیقی و همکاران، ۲۰۱۰؛ فشی و همکاران، ۲۰۱۴).

سو و همکاران (۲۰۰۲) عملکرد مدل‌های فیلیپ، گرین-آمپت و هورتون را در بافت‌های مختلف خاک ارزیابی نمودند. در بین مدل‌های ارزیابی‌شده پارامترهای مدل گرین آمپت همخوانی بیشتر و دقیق‌تری با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد.

نشاط و پاره کار (۲۰۰۷) عملکرد مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، گرین و آمپت، فیلیپ، هورتون و سازمان حفاظت خاک آمریکا در برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده به روش استوانه‌های مضاعف را مورد ارزیابی قرار دادند. در این رابطه، از آماره ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که مدل کوستیاکوف مدل مناسب برای برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ است.

باماتوز و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی کارایی برخی مدل‌های نفوذ در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله استوانه‌های دوگانه به این نتیجه رسیدند که

که این مدل در اکثر کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های اراضی حائز رتبه نخست ارزیابی شد.

سلیمانی و همکاران (۱۳۹۵) مدل‌های فیلیپ، هورتون، گرین-آمپت، کوستیاکوف و سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) باهدف تعیین مدل مناسب برآورد نفوذ در کاربری مرتع، جنگل و زراعت، در حوزه آبخیز کاکاشرف واقع در استان لرستان، ارزیابی کردند. نتایج نشان داد در کاربری مرتع، مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا، با ضریب کارایی نش- ساتکلیف ۰/۹۱ و ضریب تبیین ۰/۹۱۵ و در کاربری‌های جنگل و زراعت، مدل فیلیپ با ضریب کارایی نش- ساتکلیف به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۷۸۴ به‌عنوان برترین مدل‌ها در هر سه کاربری و نیز مدل هورتون، ضعیف‌ترین مدل در هر سه کاربری انتخاب شد.

دهموردی و همکاران (۱۳۹۷) مدل‌های هورتون، فیلیپ، کوستیاکوف و کوستیاکوف-لوییز در برآورد نفوذ آب به خاک با استفاده از دو گروه داده اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمایش استوانه‌های دوگانه و داده‌های نفوذ عمودی شبیه‌سازی شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که در داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده با استوانه‌های دوگانه در بافت‌های مختلف، مدل کوستیاکوف-لوییز و در داده‌های نفوذ شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D، مدل هورتون بهترین عملکرد را در برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک داشتند. مدل فیلیپ نیز در هر دو گروه داده نفوذ اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده دارای کمترین کارایی در برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک بود.

بررسی پژوهش‌های داخل و خارج از کشور در سال‌های اخیر حاکی از آن است که پژوهشگران مختلف در مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های نفوذ به نتایج متفاوت و بعضاً ضدونقیضی دست‌یافته‌اند. یکی از دلایل این امر طبیعت تغییرپذیر فرایند نفوذ آب به خاک است. به‌گونه‌ای که این عامل باعث می‌شود تا حتی یک مدل نفوذ در دو خاک که به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی بسیار

مشابه با یکدیگر هستند، دارای عملکرد متفاوت باشد. به‌عنوان مثال در مطالعه تونر (۲۰۰۶) در آمریکا، مدل گرین آمپت بهترین کارایی و مدل کوستیاکوف و هورتون کمترین کارایی را در برآورد نفوذ تجمعی دارد. همچنین، بر اساس پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۸۹)، کوستیاکوف-لوییز بهترین مدل و مدل فیلیپ و گرین آمپت دارای کمترین کارایی در برآورد نفوذ تجمعی است. از دیگر دلایل تفاوت در نتایج به دست آمده را می‌توان به شیوه اندازه‌گیری نفوذ، شرایط اولیه و شرایط مرزی و همچنین استفاده از آماره‌های متفاوت به‌منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد دانست.

در پژوهش حاضر با توجه به اینکه سرعت نفوذ بالا در زمان‌های طولانی بیانگر پایداری خاک در برابر بارندگی، نفوذ بیشتر آب به خاک، کاهش رواناب و درنهایت کاهش فرسایش خاک و همچنین تغذیه آب‌های زیرزمینی است، ضمن بررسی دقت معادلات نفوذ کوستیاکوف، گرین آمپت، هورتون، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و فیلیپ در کاربری اراضی و کلاس‌های مختلف بافت خاک، سرعت نفوذ در زمان‌های طولانی مدت نیز بررسی شد.

مواد و روش‌ها

داده‌های موردنیاز این پژوهش از طریق جمع‌آوری داده‌های حاصل از پژوهش‌های خاکشناسی موسسه تحقیقات خاک و آب در مراتع آذربایجان شرقی در سال ۱۳۸۸ و داده‌های حاصل از پروژه‌های مطالعاتی انجام‌شده دانشگاه ارومیه در سال ۹۸-۱۳۹۷ به‌دست آمد. داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ با استفاده از آزمایش استوانه‌های دوگانه با سه تکرار در ۱۶ محل از مناطق حوضه دریاچه ارومیه با کاربری مرتع و زراعی است. تعداد نمونه‌های برداشت‌شده در کلاس‌های بافتی و کاربری‌های مختلف مطابق جدول (۲) است. همچنین، نتایج آزمایش خاک برخی از نمونه‌ها در جدول (۳) آمده است.

جدول ۲- تعداد داده‌های برداشت‌شده در کاربری و کلاس‌های بافتی مختلف

بافت خاک	کاربری اراضی	تعداد مناطق مطالعاتی	تکرار
loam	مرتع	۱	۳
	زراعی	۲	۶
silt clay loam	مرتع	۳	۹
	زراعی	۲	۶
clay loam	مرتع	۵	۱۵
	زراعی	۳	۹

جدول ۳- نتایج آنالیز خاک نمونه‌های زراعی در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر

کاربری	رس شن سیلت (%)	بافت	شوری (dS/m)	اسیدیته	رطوبت اشباع	کربن آلی (%)	FC	PWP (cm ³ /cm ³)		
									کاربری	
زراعی	۲۵	۲۶	۴۹	loam	۰/۵۰	۷/۳۴	۴۲	۱/۱۰	۰/۳۱	۰/۱۲
	۲۱	۳۱	۴۸	loam	۰/۸۰	۷/۵۶	۳۷	۰/۸۲	۰/۳۱	۰/۰۹
	۳۳	۳۲	۳۵	clay loam	۰/۳۰	۷/۶۴	۳۹	۱/۴۷	۰/۳۲	۰/۱۲
	۳۶	۳۶	۲۸	clay loam	۰/۶۱	۸/۰۰	۴۲	۱/۲۵	۰/۳۲	۰/۱۱
	۱۲	۴۴	۴۴	loam silt clay	۱/۲۰	۷/۷۸	۳۸/۹	۱/۱۰	۰/۳۲	۰/۰۷
	۴۴	۱۲	۴۴	loam silt clay	۱/۲۰	۷/۷۸	۴۹/۸	۱/۱۰	۰/۳۳	۰/۱۵

$$I = Kt^b \quad (۳)$$

معرفی مختصر مدل‌های نفوذپذیری

$$i = Kbt^{b-1} \quad (۴)$$

فیلیپ

که در آن‌ها:

I نفوذ تجمعی برحسب سانتی‌متر، i سرعت نفوذ برحسب سانتی‌متر بر دقیقه، t زمان، b و k پارامترهای معادله بوده و اهمیت فیزیکی نیز ندارند. در این رابطه با افزایش زمان به سمت بی‌نهایت، سرعت نفوذ به سمت صفر میل می‌کند که در طبیعت این چنین اتفاق نمی‌افتد.

یکی از مدل‌های معروف نفوذپذیری، مدل فیلیپ است. در این مدل، مقدار نفوذ تجمعی از معادله ۱ و سرعت نفوذ از مشتق آن (رابطه ۲) محاسبه می‌شود:

$$I = St^{1/2} + At \quad (۱)$$

$$i = \frac{1}{2}st^{-1/2} + A \quad (۲)$$

که در آن:

I نفوذ تجمعی برحسب سانتی‌متر، i سرعت نفوذ برحسب سانتی‌متر بر دقیقه، S ضریب اشباع خاک برحسب سانتی-متر بر جذر ساعت، A هدایت هیدرولیکی برحسب سانتی‌متر بر ساعت است.

مدل کوستیاکوف- لوییز

برای اصلاح معایب معادله کوستیاکوف در زمان‌های طولانی، لوییز در سال ۱۹۴۸ معادله تعدیل‌شده زیر را ارائه داد. این معادله اندازه‌گیری نفوذ در مزرعه را در طولانی مدت که شدت نفوذ به مقدار ثابتی بزرگ‌تر از صفر نزدیک می‌شود، نشان می‌دهد. در صورتی که با به‌کارگیری معادله کوستیاکوف مقدار آن باید صفر شود:

$$I = Kt^b + At \quad (۵)$$

$$i = Kbt^{b-1} + A \quad (۶)$$

مدل کوستیاکوف

یکی از اولین معادله‌هایی که برای توصیف نفوذ آب به داخل خاک ارائه‌شده معادله کوستیاکوف است. این معادله برای دوره‌های زمانی کوتاه نتایج رضایت بخشی به دست می‌دهد. این معادله برای نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ به شرح زیر است:

مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور پنج مدل فیلپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف لوییز، هورتون و SCS انتخاب شد و ضرایب مدل‌های نفوذ آب به خاک در هر یک از این مدل‌ها مطابق جدول (۱) از طریق برازش داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده و برآورد شده، از طریق کاهش شاخص آماری مجموع مربعات خطا (SSE) با استفاده از ابزار Solver نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۷ انجام شد. برای این منظور، تابع هدف به صورت رابطه ۱۱ تعریف شد:

$$SSE = \sum_{j=1}^n (I(m)_j - I(P)_j)^2 \quad (11)$$

که در آن:

SSE مجموع مربعات خطا $I(m)_j$ ، مقدار نفوذ اندازه‌گیری شده در زمان j ام $I(P)_j$ ، نفوذ محاسبه شده با استفاده از معادله برای زمان j ام (cm) و n تعداد مقایسه‌ها است.

پس از برآورد پارامترهای مدل‌های یادشده، با استفاده از آماره‌های صحت سنجی، صحت و دقت برازش‌ها ارزیابی شد. برای این منظور از آماره‌های صحت سنجی ضریب تعیین (R^2)، کارایی نش ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) مطابق روابط ۱۲ الی ۱۵ استفاده شد:

$$ME = \frac{\sum (P_i - O_i)}{n} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$R^2 = \frac{[\sum (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (15)$$

که در آن‌ها:

O_i داده‌های مشاهده‌ای، P_i نتایج برآوردی متناظر و \bar{O} میانگین داده‌های مشاهده‌ای ماست. مقادیر NSE خطا را در بازه بین یک و منفی بینهایت ($-\infty$)، کمی سازی می‌کند و مقادیر کمتر از صفر نشان می‌دهد که میانگین سری

که در آن‌ها: I نفوذ تجمعی برحسب سانتی‌متر، i سرعت نفوذ برحسب سانتی‌متر بر دقیقه، t زمان، k و A بزرگ‌تر از صفر و b بین صفر و یک است.

هورتون

معادله تجربی دیگری که بیشتر هیدرولوژیست‌ها از آن استفاده می‌کنند، معادله هورتون است. معادله هورتون برای شدت نفوذ در نهایت به صورت زیر در می‌آید:

$$I = Ct + m(1 - e^{-at}) \quad (7)$$

$$i = C + ma(e^{-at}) \quad (8)$$

که در آن‌ها:

I نفوذ تجمعی برحسب سانتی‌متر، i سرعت نفوذ برحسب سانتی‌متر بر ساعت، t زمان، C ، m و a ضرایب معادله و همگی مثبت می‌باشند و از طریق برازش محاسبه می‌شوند.

مدل SCS سازمان حفاظت خاک آمریکا

سازمان حفاظت خاک آمریکا معادله ساده‌ای را برای تعیین مقدار نفوذ تجمعی آب به داخل خاک ارائه نموده که به نام معادله SCS معروف است:

$$I = at^b + 0.6985 \quad (9)$$

$$i = abt^{b-1} \quad (10)$$

که در آن‌ها:

a و b تابعی از شماره منحنی نفوذ و از روی جدول ویژه‌ای بدست می‌آید. I مقدار نفوذ تجمعی از شروع نفوذ برحسب سانتی‌متر، i سرعت نفوذ برحسب سانتی‌متر بر دقیقه و t زمان از شروع نفوذ به دقیقه است. a و b ضرایب مربوط به نوع خاک هستند.

ارزیابی مدل‌های نفوذ

در این پژوهش، کارایی مدل‌های مختلف برآورد کننده نفوذ آب به خاک در کاربری‌های مرتعی و زراعی و همچنین بافت‌های لومی، لوم رسی و سیلت کلی لوم

آماره فاکتوریل با پایه طرح کاملاً تصادفی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، سرعت نفوذ در زمانها، کاربری اراضی و کلاسهای بافتی مختلف با یکدیگر مقایسه شد.

نتایج و بحث

دامنه تغییرات پارامتر مدلها

دامنه تغییرات پارامترها و نیز آماره مجموع مربعات خطای برازش (SSE) مدل‌های نفوذ در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس این جدول، مقادیر میانگین آماره‌ی SSE بیانگر آن است که مدل‌های کوستیاکوف و کوستیاکوف لوییز در مقایسه با سایر مدل‌های نفوذ دارای خطای کمتری هستند.

مشاهده شده می‌تواند برآورد کننده بهتری نسبت به مدل باشد (کراوتس و همکاران؛ ۲۰۰۵). RMSE تفاوت پارامتر برآورد شده با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. ME نیز بیش برآورد یا کم برآورد مدل را نشان می‌دهد.

پس از برازش داده‌های نفوذ تجمعی به معادلات فوق و برآورد پارامترهای هر مدل، سرعت نفوذ در زمانهای ۰.۲، ۰.۴ و ۰.۲۴ ساعت برای هر یک از نمونه خاک‌ها محاسبه شد. با مقایسه سرعت نفوذ خاک‌های گوناگون می‌توان پایداری آن‌ها را در برابر بارندگی طولانی مدت و تولید رواناب با یکدیگر مقایسه نمود.

برای مقایسه کارایی مدل‌ها در کاربری‌ها و کلاس‌های بافتی مختلف، آماره‌های صحت سنجی در قالب طرح

جدول ۴- دامنه تغییرات پارامترهای مدل‌های نفوذ

مدل	پارامترهای مدل	حداقل	حداکثر	میانگین	ضریب تغییرات (%)
فیلیپ	S	۰/۴۲	۳/۱۳	۱/۴۴	۴۱
	A	۰	-۰/۱۶	-۰/۰۴	۱۰۹
	SSE	۰/۱	۹۷/۸۳	۱۶/۲۷	۱۴۷
کوستیاکوف	k	۰/۲۶	۲/۵۸	۱/۲۲	۴۲
	b	۰/۴۲	-۰/۱۶	-۰/۵۸	۱۶
	SSE	۰/۰۵	۱۶۳/۶۹	۱۶/۹۵	۱۷۵
کوستیاکوف-لوییز	k	۰/۲۶	۲/۵۸	۱/۴۰	۴۰
	b	۰/۲۲	-۰/۷۴	-۰/۵۲	۲۴
	A	۰	-۰/۱۳	-۰/۰۲	۱۶۳
هورتون	SSE	۰/۰۵	۸۶/۱	۱۲/۱۹	۱۶۲
	C	۰	-۰/۱۸	-۰/۰۸	۵۲
	m	۲/۰۹	۷۱/۶۶	۱۲/۶۱	۹۱
scs	a	۰/۰۱	۲	-۰/۱۴	۲۴۰
	SSE	۰/۶۱	۱۳۷/۲۸	۲۰/۸۱	۱۶۰
	a	۰/۱۷	۲/۲۸	۱/۰۱	۴۸
scs	b	۰/۴۷	-۰/۸۴	-۰/۶۲	۱۳
	SSE	۰/۳۵	۸۶/۴۵	۱۴/۰۳	۱۴۰

است که روند تغییرات نفوذ با زمان در کاربری اراضی مختلف متفاوت از یکدیگر هست، به نحوی که دقت مدل-های مختلف در برازش داده‌ها تغییر می‌کند. با مقایسه نمودارهای ارائه شده در شکل (۱) می‌توان این تغییرات را مشاهده کرد. اما بر اساس ME مشاهده می‌شود که این تغییرات جهت‌دار نیست؛ یعنی کم برآوردی یا بیش

تأثیر مدل‌های نفوذ، کاربری اراضی و بافت خاک بر آماره‌های صحت سنجی بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تأثیر نوع مدل، بافت خاک و کاربری اراضی بر آماره‌های صحت سنجی (جدول ۵)، مشاهده می‌شود که کاربری اراضی بر دو آماره R^2 و RMSE تأثیر معنی‌داری دارد. این بدان معنی

صحت سنجی ندارد. همچنین معنی‌دار شدن نتایج مدل در آماره ME نشان می‌دهد که مدل‌ها ذاتاً کم برآوردی یا بیش برآوردی دارند که مقایسه میانگین مربعات آماره‌های صحت سنجی تحت تأثیر مدل‌های مختلف این تغییرات را بهتر نشان می‌دهد.

برآوردی مشخصی وجود ندارد. درعین‌حال بافت خاک تأثیر معنی‌داری بر نتایج صحت سنجی نداشته است. این می‌تواند ناشی از تنوع کم بافت‌ها، یا معنی‌دار شدن سایر عوامل از قبیل مدل و کاربری اراضی باشد؛ یعنی آماره‌های صحت سنجی بیشتر تحت تأثیر نوع مدل و کاربری اراضی می‌باشد و بافت خاک تأثیر معنی‌داری بر آماره‌های

جدول ۵- میانگین مربعات آماره‌های صحت سنجی تحت تأثیر مدل‌های نفوذ، کاربری و بافت خاک

میانگین مربعات			R ²	درجه آزادی	منابع تغییر
NSE	ME	RMSE			
۰/۰۰۱**	۰/۰۶ ns	۱۱/۹۵**	۰/۰۰۵۷**	۱	کاربری اراضی
۰/۰۰۰۱۸ ^{ns}	۲/۴۳**	۰/۴۷ ^{ns}	۰/۰۱**	۴	نوع مدل
۰/۰۰۰۱۲ ns	۰/۰۸ ns	۴/۲۳ *	۰/۰۰۰۴ ns	۲	بافت خاک
۰/۰۰۰۰۱ ns	۰/۶۳**	۳/۳۲ *	۰/۰۰۰۲ ns	۲	کاربری * بافت خاک
۰/۰۰۰۰۲ ns	۰/۶۲**	۰/۹۱ ns	۰/۰۱**	۴	کاربری * مدل
۰/۰۰۰۰۷ ^{ns}	۰/۶۸۷*	۱/۸۷ ns	۰/۰۰۰۳۸ ^{ns}	۸	مدل * بافت خاک
۰/۰۰۰۰۳ ^{ns}	۰/۳۷۹*	۱/۵۵ ns	۰/۰۰۰۳۹ ns	۸	مدل * بافت خاک * کاربری
۰/۰۱۲	۶/۵۷	۷۴/۳	۰/۰۳۸	۱۵۰	خطا

** معنی‌دار در سطح پنج درصد - * معنی‌دار در سطح یک درصد - ns غیر معنی‌دار

هورتن در بافت کلی لوم بهترین برازش و مدل فیلیپ در هر سه بافت بدترین برازش را داشته‌اند.

بر اساس آماره RMSE نوع مدل و اثرات متقابل مدل و بافت، مدل و کاربری اراضی و همچنین اثرات متقابل سه‌گانه مدل و کاربری و بافت معنی‌داری نشده و همگی در یک گروه قرار دارند و در میان بافت‌های مختلف بافت لوم و در میان کاربری‌های موردبررسی کاربری مرتع معنی‌دار شد است. همچنین، با توجه به آماره RMSE اثرات متقابل کاربری‌ها و بافت‌های مختلف بافت لوم در کاربری مرتع معنی‌دار شده است.

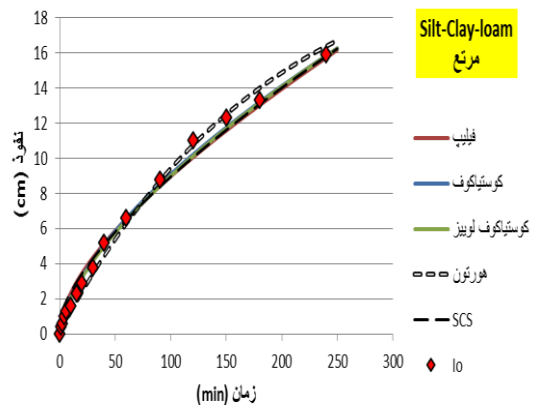
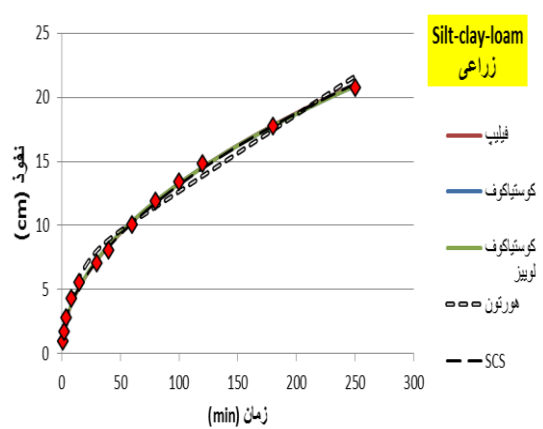
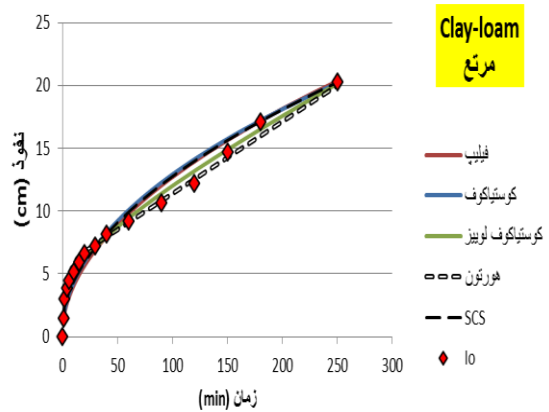
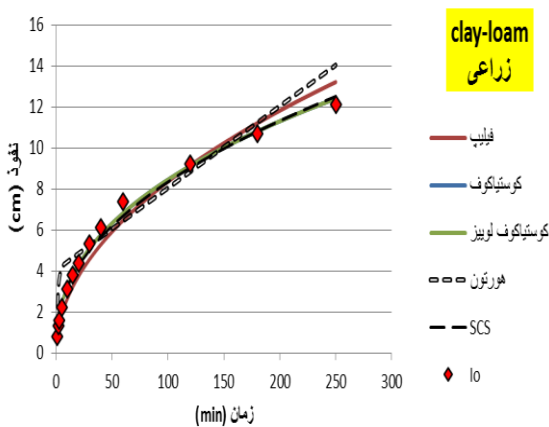
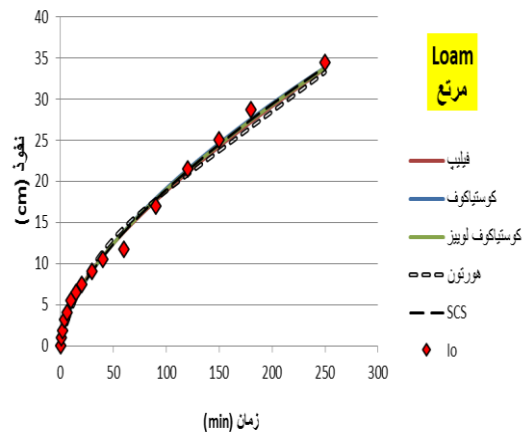
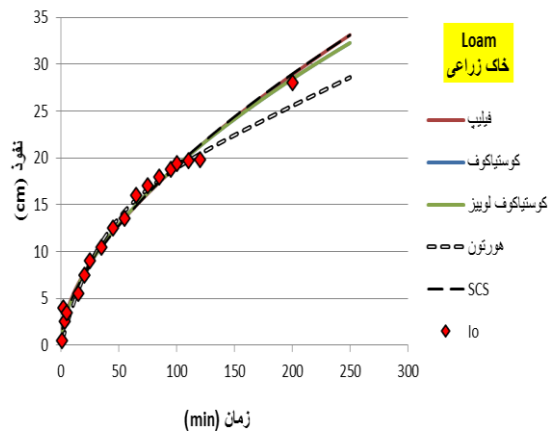
بر اساس آماره ME، مدل هورتن بدترین برازش با بیشترین بیش برآورد، مدل فیلیپ نیز با دقت کمتری برازش یافته و بیشترین کم برآوردی را دارد و مدل کوستیاکوف و کوستیاکوف لوییز بهترین برازش را داشته است. مدل هورتون در کاربری مرتع بدترین برازش

ارزیابی عملکرد مدل‌های نفوذ در کلاس‌های بافتی خاک و کاربری اراضی

اثرات متقابل مدل، کاربری و بافت خاک باتوجه به مقادیر آماره‌های ارزیابی بررسی و نتایج در جدول ۶ ارائه شد. بر اساس آماره R²، مدل کوستیاکوف لوییز بهتر از سایر مدل‌ها به داده‌ها برازش داشته، اما این اختلاف نسبت به مدل‌های کوستیاکوف، هورتن و SCS معنی‌دار نشده و در یک گروه قرار گرفته‌اند ولی اختلاف مدل فیلیپ نسبت به سایر مدل‌ها معنی‌دار شده است. بر اساس آماره یادشده، در بافت‌های مختلف اختلاف معنی‌داری وجود نداشته و هر سه بافت در یک گروه قرار دارد. اثرات متقابل مدل و کاربری اراضی نشان می‌دهد که مدل فیلیپ در کاربری زراعی بدترین برازش و مدل کوستیاکوف و کوستیاکوف لوییز در کاربری مرتع بهترین برازش را داشته است. همچنین، بررسی اثرات متقابل مدل و بافت خاک بر اساس آماره R² مدل کوستیاکوف لوییز و

خاک نیز مشابه نتایج اثرات متقابل کاربری بوده و مدل هورتون در بافت لوم بدترین برازش با بیشترین بیش برآورد و مدل فیلیپ در بافت لوم نیز بیشترین کم برآوردی را دارد و مدل کوستیاکوف و کوستیاکوف لوییز در بافت لوم رس سیلتی بهترین برازش را داشته است.

با بیشترین بیش برآورد و مدل فیلیپ در کاربری مرتع نیز با دقت کمتری برازش یافته و بیشترین کم برآوردی را دارد. همچنین مدل کوستیاکوف و کوستیاکوف لوییز در کاربری مرتع بهترین برازش را داشته است و مقدار ME نزدیک به صفر است. نتایج اثرات متقابل مدل و بافت



شکل ۱- داده‌های اندازه‌گیری شده و برازش داده‌شده با مدل‌های مختلف در بافت و کاربری‌های مختلف

جدول ۶- اثرات متقابل پارامترها بر اساس مقایسه میانگین با استفاده از روش توکی (Tukey procedure)

آماره‌های ارزیابی								اثرات متقابل
NSE		ME		RMSE		R ²		
گروه	متوسط	گروه	متوسط	گروه	متوسط	گروه	متوسط	
کاربری اراضی								
B	۰/۹۸۱	ns		B	۰/۱۷۶	B	۰/۹۸۴	زرعی (۱)
A	۰/۹۹۶	ns		A	۰/۶۹۱	A	۰/۹۹۵	مرتع (۲)
مدل								
AB	۰/۹۹۲۶	C	-۰/۰۶	ns		B	۰/۹۷۴	فیلیپ (۱)
AB	۰/۹۹۲	B	۰/۰۷۸	ns		A	۰/۹۹۳۶	کوستیاکوف (۲)
AB	۰/۹۹۴۹	BC	-۰/۰۲۲	ns		A	۰/۹۹۵	کوستیاکوف لوبیز (۳)
B	۰/۹۵۹	A	۰/۲۵	ns		A	۰/۹۹۴۲	هورتون (۴)
AB	۰/۹۹۲۸	BC	-۰/۰۴۵	ns		A	۰/۹۹۳۲	SCS (۵)
کاربری * بافت								
ns		B	۰/۰۰۵	B	۰/۴۲۵	A	۰/۹۹۶۴	۲ *
ns		A	۰/۱۶۹۸	A	۱/۰۸	A	۰/۹۹۶۰	۱ *
ns		B	۰/۰۰۲	B	۰/۵۵۹	AB	۰/۹۹۵۱	۳ *
ns		AB	۰/۰۶۹۷	B	۰/۲۰۲	ABC	۰/۹۸۸۱	۲ *
ns		B	-۰/۰۳۳	B	۰/۲۱۱	BC	۰/۹۸۳۶	۱ *
ns		AB	۰/۰۲۸	B	۰/۱۱۵	C	۰/۹۸۱۹	۳ *
مدل * کاربری								
ns		B	-۰/۰۵۲۶	ns		A	۰/۹۹۶۳	۲ *
ns		B	-۰/۰۱۶۵	ns		A	۰/۹۹۶۱	۲ *
ns		B	-۰/۰۹۸۱	ns		A	۰/۹۹۵۷	۲ *
ns		B	-۰/۰۲۲۷	ns		A	۰/۹۹۵۶	۲ *
ns		A	-۰/۳۷۹۹	ns		A	۰/۹۹۵۳	۲ *
ns		B	-۰/۰۲۹۳	ns		A	۰/۹۹۳۷	۱ *
ns		B	۰/۱۲۴۰	ns		A	۰/۹۹۳۱	۱ *
ns		B	۰/۱۰۴۱	ns		A	۰/۹۹۰۹	۱ *
ns		B	-۰/۰۶۷۵	ns		A	۰/۹۹۰۹	۱ *
ns		B	-۰/۰۲۳۲	ns		B	۰/۹۵۴۱	۱ *
مدل * بافت خاک								
A	۰/۹۹۳۲	BC	-۰/۰۳۸۲	ns		A	۰/۹۹۶۶	۲ *
A	۰/۹۸۷۱	ABC	۰/۱۳۶۱	ns		A	۰/۹۹۶۶	۲ *
A	۰/۹۸۹	BC	-۰/۰۵۷۰	ns		AB	۰/۹۹۴۸	۲ *
A	۰/۹۹۴۱	A	۰/۴۱۷۱	ns		AB	۰/۹۹۴۷	۱ *
A	۰/۹۹۳۳	BC	-۰/۰۵۰۸	ns		AB	۰/۹۹۴۴	۱ *
A	۱	BC	-۰/۰۱۷۸	ns		AB	۰/۹۹۴۲	۱ *
A	۱	BC	-۰/۰۱۲۹	ns		AB	۰/۹۹۳۹	۳ *
A	۱	BC	۰/۰۰۰۷	ns		ABC	۰/۹۹۳۴	۳ *
A	۰/۹۹۳۹۸	ABC	۰/۰۱۸۳۶	ns		ABC	۰/۹۹۳۱	۲ *
B	۰/۸۹۸	BC	-۰/۰۶۱۷	ns		ABC	۰/۹۹۳۰	۳ *
A	۰/۹۹۱	BC	-۰/۰۱۶۷	ns		ABC	۰/۹۹۲۰	۱ *
A	۰/۹۹۴۰۵	AB	-۰/۲۰۲۸	ns		ABC	۰/۹۹۱۳	۳ *
A	۰/۹۹۳۴	BC	-۰/۰۳۷۱	ns		ABC	۰/۹۸۰۱	۲ *
A	۰/۹۹۶۸	C	-۰/۰۹۳۱	ns		BC	۰/۹۷۳۶	۱ *
A	۰/۹۹۲۶	BC	-۰/۰۵۱۷	ns		C	۰/۹۷۱۰	۳ *

مدل: ۱- فیلیپ، ۲- کوستیاکوف، ۳- کوستیاکوف-لوبیز، ۴- هورتون، ۵- SCS

** بافت: ۱- لوم، ۲- کلی لوم، ۳- لوم رس سیلتی

*** کاربری اراضی: ۱- زراعی، ۲- مرتع

مقایسه سرعت نفوذ مدل‌ها در زمان‌های مختلف

پس از برآزش داده‌های نفوذ تجمعی به معادلات مدل‌های یادشده و برآورد پارامترها، در ادامه سرعت نفوذ با استفاده از پنج مدل در دو کاربری (مرتع و زراعی) و سه بافت خاک (لوم، کلی لوم و لوم رس سیلتی) در زمان‌های ۲، ۴ و ۲۴ ساعت محاسبه شد.

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۷) عامل‌های زمان، نوع کاربری و نوع بافت اثر معنی‌داری بر سرعت نفوذ دارند، ولی نوع مدل اثر معنی‌داری بر سرعت نفوذ نداشته است. این نشان می‌دهد که علی‌رغم اختلافات موجود بین مدل‌ها در برآزش به داده‌های نفوذ،

تمام مدل‌های مورد بررسی سرعت نفوذ را در زمان‌های طولانی تقریباً یکسان برآورد نموده و ویژگی‌های خاک تعیین می‌کند که در هر زمان نفوذ آب به خاک با چه سرعتی صورت می‌گیرد.

اثرات متقابل زمان در کاربری و کاربری در بافت معنی‌دار شده و اثرات متقابل سه‌گانه زمان، کاربری و مدل، همچنین اثرات متقابل سه‌گانه زمان، کاربری و بافت و اثرات متقابل سه‌گانه مدل، بافت خاک و کاربری معنی‌دار نشده است. برای بررسی این موضوع مقایسه میانگین با استفاده از روش توکی (Tukey procedure) انجام شد که نتایج در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۷- جدول تجزیه واریانس سرعت نفوذ

میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر
۰/۲۰۹**	۲	زمان
۰/۲۳۷**	۱	کاربری اراضی
۰/۰۱۲ <i>ns</i>	۴	نوع مدل
۰/۰۵۳۷**	۲	بافت خاک
۰/۰۱*	۲	زمان * کاربری
۰/۰۲۴ <i>ns</i>	۸	زمان * مدل
۰/۰۰۴ <i>ns</i>	۴	زمان * بافت
۰/۰۰۲ <i>ns</i>	۴	کاربری * مدل
۰/۰۰۰۲*	۲	کاربری * بافت خاک
۰/۰۰۴ <i>ns</i>	۸	مدل * بافت خاک
۰/۰۰۱۴ <i>ns</i>	۸	زمان * کاربری * مدل
۰/۰۰۷۹ <i>ns</i>	۴	زمان * کاربری * بافت
۰/۰۰۲۵ <i>ns</i>	۸	کاربری * مدل * بافت
۰/۷۶۵	۴۸۲	خطا

** معنی‌دار در سطح پنج درصد - * معنی‌دار در سطح یک درصد - *ns* غیر معنی‌دار

جدول ۸- میانگین سرعت نفوذ (سانتی‌متر در دقیقه) با استفاده با روش توکی

گروه	میانگین	تعداد داده	اثرات متقابل	گروه	میانگین	تعداد داده	اثرات متقابل
بافت				زمان			
A	۰/۰۹۱	۱۸۰	لوم	A	۰/۱۰۳	۱۸۰	۲ ساعت
A	۰/۰۸۳	۱۸۰	کلی لوم	B	۰/۰۸۳	۱۸۰	۴ ساعت
B	۰/۰۶۷	۱۸۰	لوم رس سیلتی	C	۰/۰۵۵	۱۸۰	۲۴ ساعت
زمان*بافت				کاربری اراضی			
A	۰/۱۱	۶۰	۱*۱	B	۰/۱	۲۷۰	زراعی
AB	۰/۱	۶۰	۲*۱	A	۰/۰۵	۲۷۰	مرتع
B	۰/۰۹۴	۶۰	۱*۲	مدل			
BC	۰/۰۸۷	۶۰	۳*۱	A	۰/۰۸۱	۱۰۸	فیلیپ
BC	۰/۰۸۶	۶۰	۲*۲	A	۰/۰۷۵	۱۰۸	کوستیاکوف
CD	۰/۰۶۹	۶۰	۳*۲	A	۰/۰۷۹	۱۰۸	کوستیاکوف لوییز
DE	۰/۰۶	۶۰	۱*۳	A	۰/۰۸۹	۱۰۸	هورتون
DE	۰/۰۶	۶۰	۲*۳	A	۰/۰۷۷	۱۰۸	SCS
E	۰/۰۴۴	۶۰	۳*۳	زمان*کاربری			
کاربری*بافت				A	۰/۱۲۹	۹۰	۲*۱
A	۰/۱۳۹	۹۰	۱*۲	B	۰/۱۰۵	۹۰	۲*۲
B	۰/۰۹۸	۹۰	۲*۲	C	۰/۰۷۶	۹۰	۱*۱
C	۰/۰۶۸	۹۰	۲*۱	C	۰/۰۷	۹۰	۲*۳
C	۰/۰۶۷	۹۰	۱*۱	C	۰/۰۶۱	۹۰	۱*۲
C	۰/۰۶۷	۹۰	۳*۲	D	۰/۰۳۹	۹۰	۱*۳
D	۰/۰۴۲	۹۰	۳*۱				

*مدل: ۱- فیلیپ، ۲- کوستیاکوف، ۳- کوستیاکوف-لوییز، ۴- هورتون، ۵- SCS

**بافت: ۱- لوم، ۲- کلی لوم، ۳- لوم رس سیلتی

***کاربری اراضی: ۱- زراعی، ۲- مرتع

نشان‌دهنده صحت و دقت لازم مدل‌ها در برآورد سرعت نفوذ آب به خاک است. بررسی اثرات متقابل زمان در کاربری نشان می‌دهد که با افزایش زمان سرعت نفوذ در کاربری مرتع بیشتر از کاربری زراعی است لذا پتانسیل ایجاد رواناب در کاربری مرتع کمتر است. طبق اثرات متقابل کاربری در بافت کاربری مرتع با بافت لوم بیشترین سرعت نفوذ و کاربری زراعی با بافت لوم رس سیلتی کمترین سرعت نفوذ را دارند.

مطالعات نشان می‌دهد که در مراتع مقدار کربن الی خاک بیشتر از اراضی کشاورزی بوده و از همین رو ساختمان پایدارتری دارند که در برابر نفوذ آب و بارندگی مقاوم است. در سال‌های اخیر با روشن شدن اهمیت ماده آلی خاک در ساختمان، تغذیه گیاه و کاهش فرسایش، استفاده از عملیات کشاورزی حفاظتی و به‌خصوص

طبق نتایج، زمان اثر معنی‌داری بر میزان سرعت نفوذ دارد به طوری که باگذشت زمان سرعت نفوذ کاهش می‌یابد. البته این روند در طبیعت ادامه می‌یابد تا به یک مقدار ثابت می‌رسد. مطابق جدول ۸ مقدار سرعت نفوذ در کاربری مرتع بیشتر از کاربری زراعی است که نشان از ساختمان خوب و پایداری خاک در کاربری مرتع است. در اراضی زراعی هرچند سرعت نفوذ در زمان شروع به دلیل عملیات خاک‌ورزی بالا است، ولی باگذشت زمان و تثبیت خاک نفوذ به سرعت کاهش می‌یابد. بافت خاک نیز اثر معنی‌داری بر سرعت نفوذ دارد به طوری که در کلاس بافت لوم رس سیلتی مقدار نفوذ کمتر از دو بافت دیگر است. بافت ریزتر این خاک نسبت به دو خاک دیگر می‌تواند دلیل پایین بودن سرعت نفوذ آن باشد. همچنین، مدل‌های مختلف مورد بررسی تفاوت معنی‌داری در برآورد سرعت نفوذ نداشتند و همگی در یک گروه قرار دارند که

لوییز، هورتن، کوستیاکوف، SCS و فیلیپ به ترتیب در رده‌های نخست تا پنجم ارزیابی قرار گرفتند؛ با توجه به اینکه روش تعیین پارامترهای مدل‌های یادشده روش برازشی است، یکی از دلایل برتری مدل کوستیاکوف-لوییز بیشتر بودن تعداد پارامترهای آن نسبت به مدل‌های SCS، کوستیاکوف، هورتن و فیلیپ است. این ویژگی باعث انعطاف‌پذیری بیشتر این مدل به هنگام تعیین پارامترها در کوتاه‌مدت شد.

از آنجایی که ضرایب مدل کوستیاکوف، SCS و کوستیاکوف لوییز نسبت به سایر مدل‌ها تغییرات بیشتری دارد و استفاده از مدل‌هایی که ضرایب آن‌ها مبنای تجربی دارد و از داده‌های کوتاه‌مدت به دست آمده است برای برآورد داده‌های بلندمدت همراه با خطا خواهد بود و معادله هورتن و فیلیپ در درازمدت مناسب‌تر تشخیص داده شد. البته بر اساس آزمون توکی، اختلاف بین مدل‌ها برای برآورد سرعت نفوذ در زمان‌های طولانی معنی‌دار نبوده و در یک گروه قرار گرفتند. در برآورد سرعت نفوذ در زمان‌های ۲، ۴ و ۲۴ ساعت مشاهده شد که در زمان‌های طولانی بارش در کاربری مرتع به دلیل ساختمان خوب و پایداری خاک، سرعت نفوذ نسبت به کاربری زراعی بیشتر و پتانسیل ایجاد رواناب کمتر است.

بر اساس نتایج این پژوهش مشخص شد که پنج مدل مورد بررسی هرچند در برآورد نفوذ تجمعی دارای دقت متفاوتی هستند، اما در صورت برازش به داده‌های میدانی، برای برآورد سرعت نفوذ در زمانی‌های طولانی مدت دقت مناسبی خواهند داشت. همچنین، بافت خاک و کاربری اراضی از عوامل مهم تأثیرگذار بر سرعت نفوذ در زمان‌های طولانی مدت بوده و هرچه بافت خاک درشت و ساختمان خاک پایدارتر باشد، سرعت نفوذ نهایی بیشتر خواهد بود. نکته دیگری که نتایج این پژوهش مشخص کرد تغییرات قابل توجه سرعت نفوذ با زمان در کاربری زراعی است، به نحوی که سرعت نفوذ در این کاربری در ابتدا بالا بود و با افزایش زمان از دو ساعت به ۲۴ ساعت به شدت افت نمود. می‌توان این‌گونه

کشاورزی بدون خاک‌ورزی^۳ گسترش بسیاری داشته است تا شرایط مزارع به مراتب نزدیک شود و نتایج این پژوهش نیز روشن کرد که در کاربری مرتع سرعت نفوذ به طور معنی‌داری بیشتر از کاربری زراعی است که باعث کاهش مقدار تخریب خاک می‌شود.

نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف بررسی صحت مدل‌های مختلف در برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب به خاک در کاربری‌های اراضی و کلاس بافتی گوناگون انجام شد. بر اساس مقادیر R^2 در کاربری مرتع چون خاک تراکم بالاتر و دست‌خوردگی کمتری دارد فرایند نفوذ به صورت یکنواخت‌تری اتفاق می‌افتد و در بین بازه‌های زمانی مختلف مقدار تغییرات متعادل‌تر است و لذا برازش مدل‌ها به داده‌ها از صحت بالاتری برخوردار است اما بر اساس آماره RMSE در کاربری زراعی هرچند در زمان‌های مختلف مقدار نفوذ از یک‌روند ثابت پیروی نمی‌کند، اما تغییرات موجود به نحوی است که داده‌های مشاهده‌ای فاصله کمتری از مقادیر مدل‌سازی شده دارند. همچنین، بافت خاک تأثیر معنی‌داری بر نتایج نفوذ تجمعی نداشته است.

نتایج به دست آمده از ارزیابی عملکرد مدل‌های نفوذ فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز، هورتن و SCS نشان داد مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش در کلاس‌های مختلف بافت خاک و کاربری اراضی همخوانی نزدیک با داده‌های میدانی دارند. با این وجود بر اساس مقایسه مدل‌ها، نحوه برآورد نفوذ تجمعی در مدل کوستیاکوف لوییز از روند پایدارتری برخوردار بوده و در اکثر کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های مورد بررسی حائز رتبه نخست ارزیابی شد حال این که این روند در دیگر مدل‌ها مشاهده نشد. با توجه به نتایج به دست آمده از ارزیابی کلی برآورد نفوذ تجمعی با استفاده از مدل‌های نفوذ مورد بررسی در این پژوهش مدل‌های کوستیاکوف-

^۳ No tillage system

جمع‌بندی نمود که مدیریت خاک نقش بسیار مؤثری در
 از جمله کشاورزی حفاظتی، می‌توان کیفیت خاک را بهبود
 میزان نفوذپذیری دارد و با انجام اقدامات کشاورزی به‌روز
 داد و از فرسایش جلوگیری نمود.

فهرست منابع

۱. پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی‌دشتکی، ش. و مهدیان، م.ح. ۱۳۸۹. ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی خاک و کاربری اراضی، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲۰۵-۱۹۳:۲(۴)
۲. سلیمانی، ل.، حقی زاده، ع. و زینی وند، ح. ۱۳۹۵، تعیین بهترین مدل‌های برآورد نفوذ در کاربری‌های مختلف، به‌منظور مدیریت بهینه حوزه‌های آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کاکاشرف، استان لرستان)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۴۱-۳۳:۷(۱۳).
۳. محمدی، م.ح. و رفاهی، ح. ۱۳۸۴. برآورد پارامترهای معادلات نفوذ با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک. مجله علوم کشاورزی ایران. ۱۳۹۸-۱۳۹۱:۳۶(۶).
۴. موسوی دهموردی، ا.، قربانی دشتکی، ش. و مشایخی، پ. ۱۳۹۸، مقایسه کارایی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از استوانه‌های دوگانه و نرم‌افزار HYDRUS-1D. نشریه تحقیقات کاربردی خاک. ۱۹۵-۱۸۲:۷(۲).
۵. واقفی، م. و موحدزاده، م. ۱۳۹۳. بررسی و مقایسه مدل‌های مختلف نفوذپذیری در حوزه آبریز مند دشتی با استفاده از نتایج آزمایش‌های استوانه مضاعف. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۱۲-۱:۴(۱۵).
6. Bamutaze, Y., Makooma, T., Gilbert, M., Vanacker, V., Bagoora, F., Magunda, M., Obando, J. and Wasigeh, J. 2010. Infiltration characteristics of volcanic sloping soils on Mt. Elgon, Eastern Uganda Yazidhi. *Catena*, 80(2):122–130.
7. Fashi, F. H., Sharifi, F. and Kamali, K. 2014. Modelling infiltration and geostatistical analysis of spatial variability of sorptivity and transmissivity in a flood spreading area. *Spanish Journal of Agricultural Research* 12(1): 277–288
8. Feki, M., Ravazzani, G., Ceppi, A., Milleo, G. and Mancini, M. 2018. Impact of infiltration process modeling on soil water content simulations for irrigation management. *Water*. 10(7): 850. <https://doi.org/10.3390/w10070850>
9. Green, W.H. and Ampt, G. 1911. Studies of soil physics, Part 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4: 1-24.
10. Goamez, J.A., Giraldez, J.V., Pastor, M. and Fereres, E. 1999. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil Till. Res.*, 52: 167-175.
11. Haghghi, F., Gorji, M., Shorafa, M., Sarmadian, F. and Mohammadi, M. H. 2010. Evaluation of some infiltration models and hydraulic parameters. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8: 210–217.
12. Holtan, H.N. 1961. A concept of infiltration estimates in watershed engineering. ARS41-51, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC.
13. Horton, R.E. 1940. An Approach towards a Physical Interpretation of Infiltration Capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5: 399-417.
14. Hsu, S.M., Ni, C.F. and Hung, P.F. 2002. Assessment of three infiltration formulas based on model fitting and Richards's equation. *Journal of Hydrology Engineering*, 7: 373-379.
15. Kostiaikov, 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. *Transactions Congress International Society for Soil Science*, 6th, Moscow, Part A: 17-21.

16. Krause, P., Boyle, D.P. and Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89-97.
17. Lewis, M.R. 1937. The rate of infiltration of water in irrigation practice. *Eos Trans AGU* 18:361–368. Loaiciga, H.A. and A. Huang. 2007. Pounding Analysis with Green-Ampt Infiltration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12: 109-112.
18. Muneeraa, A.S., Naba Sayelba, K. and Hatem Kamalca, A. 2020. A comparative study to assess the suitable models for predicting the infiltration rate in an arid region. *Iraqi Journal of Civil Engineering* (2020) 014–001. Available online at <https://www.iasj.net/>
19. Neshat, A. and Porehkar, M. 2007. The comparison of methods for determining the vertical infiltration rate. *Journal of Agriculture and Natural Resources Sciences*. 14(3): 186-195.
20. Turner, E.R. 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. MSc. Thesis, University of Maryland, USA. 202 pp.
21. Zi-cheng, Z., He, S.Q. and Li, T.x. 2011. Fractal dimensions of soil structure and soil anti-erodibility under different land use patterns. *African Journal of Agricultural Research*. 6 (24): 5496-5504.